Suelos volcánicos endurecidos

III Simposio Internacional (Quito, diciembre de 1996)

Claude Zebrowski
Paul Quantin
Germán Trujillo

con la colaboración de
María Dolores Villamar

Quito, diciembre de 1997

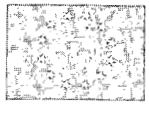
Suelos volcánicos endurecidos

III Simposio Internacional (Quito, diciembre de 1996)

Claude Zebrowski
Paul Quantin
Germán Trujillo

con la colaboración de
María Dolores Villamar

Quito, diciembre de 1997



ORSTOM

Fotografías: Claude Zebrowski
Diseño de la portada: Claude Zebrowski y María Dolores Villamar
Edición, diagramación y gráficos: María Dolores Villamar

Impreso en el Ecuador
Impresora Polar
Pasaje «A» # 116 y Zamora
QUITO
Telf.: (593.2) 434 374

ÍNDICE

página

Presentación i
Palabras del Dr. Michel Portais, Representante del ORSTOM en el Ecuador ii
Palabras del Dr. Hernán Andrade S.J., Rector de la PUCE iv
Palabras del Ing. Alberto Ortega Urrutia, Decano de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la UCE v
Discurso inaugural a cargo del Abogado Hugo Encalada Mora, Ministro de Agricultura y Ganadería del Ecuador vi

Introducción al Simposio 1
Claude ZEBROWSKI, Paul QUANTIN, Germán TRUJILLO

Tema 1
Síntesis del tema : Caracterización, génesis y cartografía de los suelos volcánicos endurecidos 11
Paul QUANTIN

1. CARACTERÍSTICAS Y GÉNESIS

La cangahua en el Ecuador y Colombia
- El origen y la edad de la cangahua superior, valle de Tumbaco, Ecuador 19
  Minard HALL, Patricia MOTHES
- Caractérisation et formation de la *cangahua* en Équateur 29
  Paul QUANTIN, Claude ZEBROWSKI
- Pedogénesis de capas endurecidas de suelos volcánicos del altiplano de Nariño (Colombia) 48
  Lucy N. MORA P., David FLORES R.

El tepetate en México
- The Micromorphological Appearance of Free Silica in some Soils of Volcanic Origin in Central Mexico 56
  Thomas POETSCH, Kyriaskos ARIKAS
- Caracterización mineralógica de los tepetates tipo fragipán del valle de México 65
  Claudia HIDALGO, Paul QUANTIN, Françoise ELSASS
- Secuencia de transformación de un suelo ferralítico en tepetate silicificado en la región de Xalapa (Veracruz, México) 73
  Jean-Pierre ROSSIGNOL, Paul QUANTIN
- Calibración de los métodos no destructivos en los tepetates del estado de México 83
  Klaudia OLESCHKO, María Eugenia MIRANDA
- Análisis fractal de los tepetates 90
  Klaudia OLESCHKO, María Eugenia MIRANDA, Christian PRAT

Otros tipos de suelos
- Pine Root-induced Petrocalcic Horizons in Volcanic Ashsoils of the Mexican Altiplano 98
  Didier DUBRŒUCQ, Daniel GEISSERT, Pierre ROGER
- Indurated Volcanic Ash Soils in Kyushu of Japan, their Properties and Typology 107
  Hideo KUBOTERA, Ichiro YAMADA

- Characterization of Three Andosols of the Azores Archipelago (Portugal) Showing Differents Types of Indurated Horizons 116
  Jorge PINHEIRO
- Dissolution Kinetics of Silicon and Aluminium in a Mollic Fragiudalf of Central Italy, Derived from a Volcanoclastic Sediment 121
  Paolo LORENZONI, Paul QUANTIN, Massimo SPADONI

2. GEOGRAFÍA DE LA CANGAHUA Y DEL TEPETATE
- Los suelos con cangahua en el Ecuador 128
  Claude ZEBROWSKI
- Évaluation spatiale et multi-temporelle de la cangahua à partir d'images SPOT 138
  Georges DE NONI, Marc VIENNOT
- Estudio espacial de los tepetates del eje neovolcánico mexicano: metodología para un programa de investigación 149
  Alice SERVENAY, Christian PRAT, Valentino SORANI, Eduardo GONZÁLEZ

Tema 2
Síntesis del tema: Factores físicos, químicos y biológicos que afectan a la productividad de los suelos volcánicos endurecidos 155
Jorge D. ETCHEVERS B.

1. FACTORES FÍSICOS
- Propiedades físicas de suelos volcánicos endurecidos (tepetates t3) después de su rehabilitación, en Tlaxcala (México) 162
  Ulrich FECHTER-ESCAMILLA, Gustavo FLORES G.
- Formación de agregados estables a partir de un duripán del estado de Morelos (México) por parte de especies vegetales perennes en condiciones de invernadero 170
  Alma VELÁSQUEZ R., David FLORES R.
- Efecto de especies vegetales en la agregación y disgregación en dos tipos de tepetates del estado de México, en condiciones de invernadero 178
  Otillo A. ACEVEDO S., David FLORES R.

2. FACTORES QUÍMICOS
- Diagnóstico del contenido de elementos en dos cangahuales de la provincia de Pichincha 185
  Gem B. CISNEROS S., Jorge A. FLOR I., Germán TRUJILLO
- Nutrient Supply of Reclamated Indurated Volcanic Ash Soils and Evaluation of Productivity with the QUEFTS-Model 194
  Jürgen Baumann, Gerd Werner
- Leventamiento nutrimental de los tepetates de México y Tlaxcala 202
  Jorge D. ETCHEVERS B., Hortensia BRITO
- Dinámica de la materia orgánica y el N en tepetates habilitados para la producción agrícola 213
  Jorge D. ETCHEVERS B., María Antonia PÉREZ, Hermilio NAVARRO G.

3. FACTORES BIOLÓGICOS
- Uso de la materia orgánica en la recuperación de tepetates y su influencia en los microorganismos 225
  Ronald FERRERA-CERRATO, Andrés ORTIZ, Julián DELGADILLO, Salustio SANTAMARÍA
- *Melilotus albus* inoculado con *Rhizobium meliloti* y aplicación de materia orgánica en la recuperación de un tepetate 238
  Julián DELGADILLO, Ronald FERRERA-CERRATO

- Adición de vermicomposta e inoculación de endomicorriza en seis variedades criollas de maíz cultivadas en tepetate 244
  Salustio SANTAMARÍA, Ronald FERRERA-CERRATO
- Uso de vermicomposta y micorriza arbuscular en cebolla, para la rehabilitación de tepetates 251
  Alberto FLORES, Ronald FERRERA-CERRATO

Tema 3
Síntesis del tema: Experimentos agronómicos y productividad 255
Hermilio NAVARRO G.

1. EXPERIMENTOS AGRONÓMICOS
- Productivad en cangahua rehabilitada, Ecuador : Ensayos agronómicos 260
  Germán TRUJILLO, José ARIAS
- Productividad potencial y costos de producción en cangahua recuperada 271
  Edison SUÁREZ O.
- Rendimiento de maíz-frijol en un tepetate en el segundo año de rehabilitación agrícola 279
  Dionisio BENÍTEZ, Hermilio NAVARRO G.
- Manejo agronómico diferencial de la asociación maíz-haba en tepetate de quinto año de uso agrícola 287
  Hermilio NAVARRO G., Diego FLORES
- Análisis del comportamiento de cultivos en tepetate t3 incorporado a la agricultura de temporal, Texcoco (México) 296
  Aurelio BÁEZ, Eduardo ASCENCIO, Christian PRAT, Alfonso MÁRQUEZ

2. MANEJO DE LA CANGAHUA Y DEL TEPETATE
- Evaluación del cultivo de cebada (*Hordeum vulgare*) bajo dos sistemas de siembra en terrazas y en surcos a nivel 311
  Rúsvel R. RÍOS V.
- Maíz bajo labranza reducida en un suelo volcánico endurecido (tepetate t3) rehabilitado en Tlaxcala, México 317
  Ulrich FECHTER-ESCAMILLA, Francisco TEHÓZOL I., Primo MUÑOZ T.

Tema 4
Síntesis del tema: Erosión, conservación e hidrodinámica 325
Christian PRAT

1. ESTUDIOS BAJO LLUVIA NATURAL

En el Ecuador
- Ruissellement et érosion sur des parcelles de *cangahua* réhabilitée (période 1994-1996) 331
  Georges DE NONI, Marc VIENNOT, Germán TRUJILLO Y., Edmundo CUSTODE

En México
- Erodibility of Volcanic Ash Soils in the Central Mexican Highlands 343
  Jürgen BAUMANN, Gerd WERNER
- Erosión hídrica en un suelo volcánico endurecido (tepetate t3) en el bloque de Tlaxcala, México 351
  Ulrich FECHTER-ESCAMILLA, Andrea VERA, Gerd WERNER
- Análisis de las características de las precipitaciones de 1992 a 1995 en San Miguel Tlaixpan (Texcoco, México) 359
  Christian PRAT

- Erosión y escurrimiento en parcelas de tepetate t3 en Texcoco, México 371
  Christian PRAT, Aurelio BÁEZ, Alfonso MÁRQUEZ
- Uso de modelos matemáticos de erosión hídrica para la optimización de la rehabilitación de tepetates con fines agrícolas 384
  José Luis OROPEZA M., José Donaldo RÍOS B., José SALAZAR L.
- Factores de la erosión y prácticas agronómicas productivas en suelos formados sobre estrato de tepetate 397
  José Donaldo RÍOS B., José Luis OROPEZA M.

En Chile
- Evaluación de la erosión del suelo mediante parcelas experimentales en suelos volcánicos del sur de Chile 406
  Carlos E. OYARZÚN, Anton W. HUBER, Rúben PEÑALOZA, Renato SANZANA

2. ESTUDIOS BAJO LLUVIAS SIMULADAS
- Evaluación del potencial hidrológico y de la producción de sedimentos en tepetates tipo t3 con lluvia simulada 412
  Pedro RIVERA R., José Luis OROPEZA M.
- Hidrodinámica y producción de sedimentos de un tepetate de la cuenca del río Los Sauces, Michoacán (México) 420
  Maria ALCALÁ DE JESÚS, José Luis OROPEZA M.

3. ESTUDIO DE LOS ESTADOS DE SUPERFICIE
- Caractérización hidrodinámica de un suelo volcánico endurecido del Ecuador (cangahua), influencia de los estados de superficie 430
  Yann LEROUX, Jean Louis JANEAU
- Organización superficial de los tepetates cultivados (Texcoco, México) 443
  Marc LAUFFER, Yann LEROUX, Christian PRAT, Jean Louis JANEAU

Tema 5
Síntesis del tema: Manejo agrícola y problemas socioconómicos 457
Rubén PEÑALOZA, Iván ÁLVAREZ P.

1. COSTOS DE REHABILITACIÓN
- Los costos de rehabilitación de los suelos volcánicos endurecidos 462
  Claude ZEBROWSKI, Benjamin SÁNCHEZ

2. EL CULTIVO DE LOS SUELOS VOLCÁNICOS ENDURECIDOS EN EL MEDIO CAMPESINO
- El cultivo de la cangahua en el medio campesino tradicional en el Ecuador 472
  Claude ZEBROWSKI, Azucena VICUÑA
- Los sistemas agropecuarios de producción en tepetates, en cuatro comunidades del altiplano mexicano 482
  Christian PRAT, Boun-Tieng LY, Isabelle LEPIGEON, Garance FAUGÈRE, Jean-Louis ALEXANDRE
- Uso de recursos, rentabilidad y sustentabilidad en los Sistemas Económicos Familiares (SEF) 492
  Salvador MUÑOZ A., Hermilio NAVARRO G.

3. EXPERIENCIAS DE REHABILITACIÓN DE LA CANGAHUA
- Experiencia de recuperación de cangahua en la provincia del Carchi (Ecuador) 501
  Jaime CANGÁS, Germán TRUJILLO
- La recuperación de suelos cangahuosos en el proyecto Licto 506
  Guillermo TERÁN T.

Presentación

Los suelos volcánicos endurecidos han sido observados en la mayoría de países latinoamericanos de las regiones de los Andes, de Centroamérica y de México. Se localizan en los piedemontes de los volcanes, en regiones muy pobladas, y han estado sometidos a la erosión debido a prácticas de cultivo inapropiadas. La extensión de las zonas degradadas plantea un grave problema de recursos de suelos, lo que nos ha llevado a emprender estudios sobre: las características de esos materiales endurecidos; los factores que condicionan su productividad, en particular a través de experimentos agronómicos; la erosión y las prácticas de conservación; las condiciones socioeconómicas de su rehabilitación para su uso agrícola, e incluso agro-pastoral o forestal durable.

Un primer programa de estudios, en el marco de un contrato con la Unión Europea (N° TS2-A 212-C CEE/ORSTOM) fue desarrollado de 1989 a 1992 en México, donde tuvo lugar un primer simposio internacional sobre el tema, en 1991.

Un segundo programa de la Unión Europea (contrato ORSTOM/UE N° TS3 CT 930252) permitió, de 1994 a 1997, proseguir los estudios en México y ampliarlos al Ecuador y a Chile. Durante este programa, se realizó, en julio de 1994 en Acapulco, un segundo simposio destinado a presentar los resultados a la comunidad internacional en el XV Congreso Internacional de la Ciencia del Suelo.*

Al finalizar el programa, tuvo lugar en Quito, en diciembre de 1996, el tercer simposio en el que participaron no solamente los miembros asociados al programa (Chile, Ecuador, México, Alemania y Francia), sino también científicos de Colombia, Japón, Italia, Portugal y Estados Unidos.

La organización del simposio fue posible gracias a la colaboración de Dominique Cadier e investigadores de las universidades Central (UCE) y Católica (PUCE) del Ecuador, de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), del MAG, de la AID y del ORSTOM. Deseamos expresar nuestro reconocimiento particularmente a las personas que aceptaron conducir los diferentes talleres del simposio: Azucena Vicuña (PUCE), Patricia Mothes (EPN), Mario Lalama (UCE), Klaudia Oleschko (UNAM), Fausto Maldonado (AID), Edmundo Custode y Germán Trujillo (MAG), Christian Prat, Paul Quantin, Marc Viennot y Claude Zebrowski (ORSTOM), Rubén Peñaloza (Universidad Austral de Chile, Valdivia), Jorge Etchevers, Ronald Ferrera-Cerrato, Hermilio Navarro, José Luis Oropeza (CP de Montecillo), Gerd Werner (Universität Justus Liebig, Gießen).

La edición y publicación de estas memorias se realizaron gracias al aporte financiero de la PUCE, del ORSTOM y de la Unión Europea y a la participación del personal de la representación del ORSTOM en Quito. Que María Dolores Villamar, responsable de esta publicación, Cristina Carrión, Michel Portais, representante del ORSTOM en el Ecuador de 1995 a 1997, y Francis Kahn, su sucesor, reciban nuestro profundo agradecimiento.

Palabras del Representante del ORSTOM en el Ecuador

Bienvenidos a Quito al tercer simposio internacional sobre los problemas planteados por la rehabilitación y la recuperación de los suelos volcánicos endurecidos en América Latina.

La red de investigadores, de diez nacionalidades, formada en torno a este tema, trae a Quito conclusiones sumamente importantes que serán debatidas a lo largo de toda esta semana y que desembocarán en resultados que, esperamos, serán directamente utilizables para el desarrollo de ambiciosos programas de rehabilitación y recuperación de esos suelos.

Múltiples mapas que comparan la situación a 20 años de intervalo, muestran la extensión del afloramiento de los suelos volcánicos endurecidos debido a la erosión de la capa no consolidada y fértil que los recubría. Se plantea entonces un problema esencial ligado a uno de los grandes desafíos de nuestra época: el manejo adecuado del patrimonio natural por parte de las sociedades humanas. Esto concierne centenares de miles de hectáreas, en México, en el Ecuador y en otras partes.

Ahora bien, a este reto de orden ecológico, se suma otro de orden social: estos suelos están situados en regiones sumamente pobladas, donde los campesinos buscan desesperadamente ampliar la frontera agrícola, desplazando los límites altitudinales de las tierras cultivadas, en condiciones cada vez más precarias.

Finalmente, los resultados de las investigaciones desarrolladas desde el simposio anterior parecen demostrar que la rehabilitación y la recuperación de esos suelos, a condición de que exista un posterior manejo adecuado, pueden constituir operaciones muy rentables en términos económicos.

Quisiera entonces subrayar, al dar la bienvenida a todos los participantes de este segundo simposio, la importancia de sus trabajos y los desafíos que implican las investigaciones que llevan a cabo, en algunos casos, desde hace casi diez años:

- *Se trata, en primer lugar, de un desafío científico. Desde el inicio de este programa de investigación, a ustedes se deben los dos tercios de la publicaciones sobre este tipo de suelos, en el mundo. Las actas del actual simposio y las de los dos anteriores constituirán, por muchos años, la referencia internacional sobre el tema.*
- *Se trata, en segundo término, de un desafío ecológico capital: el manejo adecuado de un patrimonio natural de la humanidad. En efecto, dada su expansión, el potencial de estos suelos es considerable.*
- *Se trata luego de un desafío social: ustedes tienen una gran responsabilidad en la supervivencia posible, en las tierras de sus ancestros, de decenas y hasta centenares de miles de campesinos mexicanos y andinos .*
- *Se trata finalmente de un desafío económico: en los tiempos de la mundialización, se deben encontrar los medios de rentabilizar, en las condiciones de los mercados internacionales, los trabajos de rehabilitación de estas inmensas superficies, hoy en día erosionadas o en vías de serlo.*

En la actualidad, los científicos ya no pueden vivir en su torre de marfil. Las diversas crisis biológicas, con la última, la de la encefalitis bovina espongiforme llamada de la

«vaca loca», lo demuestran ampliamente, a través del compromiso de los científicos con tales temas.

Agradezco entonces a todos quienes organizaron este simposio de gran importancia, en especial a Germán Trujillo y Claude Zebrowski, al igual que a Paul Quantin, quien lanzó este gran programa y ha efectuado su seguimiento hasta hoy. Pero debo detenerme, pues tendría que citar a muchos, y no es ese el objetivo de estas palabras de bienvenida.

Me congratulo de que conjuntamente con la Pontificia Universidad Católica del Ecuador y la Universidad Central del Ecuador, el Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación (ORSTOM), haya podido, con la ayuda de la Unión Europea, organizar este simposio que da continuación al organizado por el Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, representado aquí por numerosos investigadores. Mi reconocimiento igualmente a la Universidad de Gießen en Alemania, la Universidad Autónoma de Tlaxcala en México, la Universidad Nacional Autónoma de México, la Universidad Austral de Valdivia en Chile, así como a todos los investigadores de Alemania, Colombia, Ecuador, Francia, Japón, México, Portugal y Estados Unidos, que participan en este evento.

A todos mil gracias y que tengan una fecunda semana de debate y de trabajo.

Dr. Michel Portais
Representante del ORSTOM en el Ecuador

Palabras del Rector de la PUCE

Para la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, la firma del convenio PUCE-ORSTOM sobre «Problemática socioeconómica de la población asentada en suelos volcánicos endurecidos (cangahua)» ha constituido una oportunidad de poner al servicio del pueblo necesitado la aplicación dinámica de la ciencia geográfica, a través del Departamento de Geografía y Ciencias Ambientales.

Con la íntima satisfacción de participar en esta investigación interdisciplinaria juntamente con ORSTOM y la Universidad Central del Ecuador, me permito enumerar las actividades que la PUCE ha realizado para el avance del proyecto y señalar el sentido que reviste esta colaboración de acuerdo a la orientación educativa específica de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

- *Con el apoyo del ORSTOM se ha realizado la investigación socioeconómica de la población que se asienta en las zonas con suelos de cangahua. Se logró explorar a una significativa muestra de la población, en las provincias de Carchi, Imbabura, Pichincha, Cotopaxi, Tungurahua y Chimborazo, cubriendo todo el ámbito espacial de las áreas de cangahua.*
- *De la misma manera, se logró identificar las áreas donde el suelo, según el mapa realizado por PRONAREG-ORSTOM, debería ser modificado, debido a que en los últimos diez años la cangahua ha aflorado a la superficie, lo que permite deducir que la erosión cada vez es mayor.*
- *La contribución que la PUCE otorga con estos estudios para la realización del proyecto, se puede situar en estos campos específicos e importantes:*
  1. *En cuanto a la ciencia y el conocimiento científico de la geografía aplicada, se ponen en juego las disciplinas aprendidas en la carrera. Estas son: demografía, geología, geomorfología, edafología, geografía rural, economía y otras del área social y física.*
  2. *En cuanto a la solución de los problemas que se plantean en las comunidades asentadas en suelo de cangahua, la investigación de los alumnos de la PUCE ha conseguido demostrar que el sistema de vida que tienen los habitantes de estos lugares requiere de inmediato apoyo en el tratamiento de los espacios físicos a los cuales se encuentran adheridos. El manejo adecuado de los suelos constituye una excelente fuente de producción agrícola y deberá ser la meta que perseguirán los científicos de las áreas agrológicas, con el afán de implantar nuevas técnicas en el uso del espacio terrestre.*
  3. *Un beneficio que llegará a tener repercusión nacional es la incorporación de la población de estos sectores a las esferas productivas del país, con el uso del suelo y la producción en grande o pequeña escala. Esto tendrá su repercusión positiva en la economía nacional, porque las áreas en las cuales se encuentra cangahua están ubicadas en la parte centro y norte del espacio andino ecuatoriano, lugares estratégicos de la vida de poblaciones con niveles económicos bajos y calidad de vida deficitaria.*

La participación de la PUCE, es una experiencia positiva en la medida en que tanto alumnos como profesores, además de participar de la vivencia de las comunidades ecuatorianas, encuentran un espacio abierto hacia el aprendizaje del proceso investigativo, aplicado a la ciencia de la geografía.

4. *Este trabajo investigativo y de apoyo social se enmarca en la nueva visión de la geografía en la que se encuentra la interrelación de la sociedad con la naturaleza, con la acción del hombre que causa múltiples impactos en el medio natural, produciendo un medio geográfico intervenido en muchos casos de un modo negativo.*

La PUCE ha ofrecido el apoyo que requieren los estudiantes y profesores para lograr una vinculación eficaz con el trabajo y demás aspectos aplicados que sirven para el conocimiento y el planteamiento de soluciones de graves problemas que aquejan al país.

Se eleva el nivel de participación en el contexto de la acción pastoral de la PUCE, en la que los alumnos y profesores, además de identificarse con los grupos sociales campesinos desposeídos, han logrado sensibilizar su espíritu, conduciéndolos a un comportamiento humano más profundo en la fe y la práctica de la religión católica, ante la conducta del cienitista social consciente de la situación de la comunidad en la que vive.

Por todas estas razones, la PUCE continuará aportando su decidido apoyo hasta alcanzar los objetivos de carácter científico y social en que se inspira este proyecto.

Dr. Hernán Andrade S.J.
Rector de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador

Palabras del Decano de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la UCE

Señor Ministro de Agricultura, Señor Representante de la Embajada de Francia, Señor Representante de la Unión Europea, Señor Representante del ORSTOM, señores de la mesa directiva, delegaciones de técnicos y científicos de los diferentes países, que hoy nos visitan, damas y caballeros.

Es para mí un honor dirigirme a vosotros en nombre y representación del Señor Rector y de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Central del Ecuador. La vinculación que se ha dado entre esta institución y el ORSTOM ha permitido abordar un tema muy crítico para el sector agrícola del Ecuador, la zona andina y el mundo.

No es desconocido que la presión demográfica existente sobre los valles especialmente interandinos ha provocado que la agricultura y ganadería suban como en conquista de los declives de cordillera y aun los páramos donde la topografía, la falta de tecnologías para el cultivo, la alta pluviosidad y vientos coadyuvaban con el agricultor que, en busca de sustento, sin ningún apoyo educativo y de investigación complementaria, ha hecho un uso irracional de este recurso, permitido que aquellos suelos se hayan erosionado y degradado al punto que se han convertido en sectores improductivos, donde aflora la cangahua, motivo de este evento.

Es consecuentemente plausible la intervención del ORSTOM porque a través de los programas de investigación se generará información útil para la zona andina y el mundo, y con ello se aportará con soluciones a uno de los problemas para la producción mundial de alimento. Este aporte del organismo internacional constituye además un importante estímulo para que nuestros estudiantes de pre y postgrado se incorporen en el desarrollo de este conocimiento, pues en los diferentes experimentos y eventos académico-científicos participan fortaleciendo su desarrollo intelectual y capacidad técnica.

Ciertamente el día de hoy, la Universidad Central quiere expresar con motivo de este evento, su reconocimiento por la oportunidad que el ORSTOM y la Unión Europea han brindado para abordar, con investigación, estos temas de alta incidencia y motivos de pobreza rural. La ubicación geográfica de la granja universitaria en Tumbaco permitió establecer un espacio de investigación in situ para la recuperación de los cangahuales, en él se ensayan diversas formas de roturación, diferentes sucesiones de rotación en cultivos, formas de abonadura orgánica, etc., es decir opciones tecnológicas que pueden ser realizadas por los campesinos aun de escasos recursos, para la recuperación de sus suelos.

Conocemos que el trabajo es arduo y la mancomunidad de esfuerzos entre la Universidad y el ORSTOM están permitiendo éxitos insospechados en la investigación y con seguridad las generaciones de agricultores se beneficiarán porque no solo que esta tecnología permitirá recuperar los cangahuales para la agricultura sino que contribuirá a desarrollar acciones preventivas para las zonas altamente expuestas a la presión de cultivos y la erosión desertizante.

Con esta oportunidad, también ratificaremos nuestro compromiso para seguir fortaleciendo los compromisos bilaterales con el ORSTOM y colaterales con la Universidad Católica y con otras instituciones que se integran en el desarrollo de estos programas.

Por último quiero expresar mi mejor deseo para que el evento académico-científico que hoy se desarrolla tenga el mayor de los éxitos, a sabiendas de que aquello constituirá valiosa referencia para el desarrollo de programas paralelos en los países de donde provienen tan representativas delegaciones aquí presentes.

Ing. Alberto Ortega Urrutia
Decano de la Facultad de Ciencias Agrícolas
de la Universidad Central del Ecuador

Discurso inaugural del Ministro de Agricultura y Ganadería del Ecuador

Es muy grato para mí dirigirme a tan selecto auditorio de científicos y más personalidades reunidos en este simposio, para tratar sobre la rehabilitación de los suelos volcánicos endurecidos.

No soy un experto en la materia a tratarse, pero en el Ecuador los suelos erosionados constituyen el más grave problema no solo ambiental, sino también social, por la magnitud de la extensión que abarcan y por el esfuerzo que los campesinos deben realizar para lograr su incorporación a la agricultura.

Deseo transmitir a ustedes un mensaje de confraternidad, inspirado en la certeza de que la investigación científica es universal y que los conocimientos que aquí se expongan serán válidos para los gobernantes, para la sociedad en general y para el sector rural en particular.

Quiero expresar mi gratitud a los organizadores, de que se me haya invitado a participar en este evento y mi intervención representa el agradecimiento de miles de campesinos de la Sierra ecuatoriana, marcados por un entorno geográfico estéril, seco y un ambiente social desesperanzador, con signos de pobreza.

Cuánto ha tenido que transcurrir para que tomemos conciencia de que hay que mantener el equilibrio entre el hombre y la naturaleza, entre la producción y la vocación de los recursos naturales.

Cabe entonces aquí mirar hacia atrás, analizar nuestra historia, la historia latinoamericana y reflexionar sobre la sabiduría de nuestras culturas indígenas, las terrazas, el riego, los períodos de descanso, cuando se producía para satisfacer la demanda de alimentos de una sociedad específica que al cambiar por la de producción de excedentes que generan enormes ganancias, ha provocado la erosión y deterioro de los suelos.

Creo, en este sentido, que el manejo y la recuperación de los suelos es una necesidad de todos los pueblos, y que estas acciones deben estar acompañadas de prácticas de conservación y retención del agua, por lo que el aporte científico a presentarse en el contexto de este evento debe permitir a los gobernantes adoptar políticas de desarrollo social que permitan incorporar estas áreas erosionadas al sistema productivo con la utilización de la fuerza de trabajo de los grupos rurales allí asentados.

Quiero poner énfasis en el rol de la investigación aplicada y de la generación de tecnología como motor del desarrollo económico al servicio de toda sociedad y en particular de los grupos rurales asentados en áreas deprimidas, a través de la transferencia tecnológica, por lo que me permito plantear la necesidad de que la investigación no se quede allí, sino que se considere su aplicación a nivel de campo, a la escala campesina, mediante la asignación de recursos nacionales e internacionales, de la participación de la empresa pública y privada, para que los conocimientos no vayan a dar a los escritorios de los técnicos o engrosen los libreros de las bibliotecas, sino que representen un verdadero beneficio social para quienes más lo necesitan.

Aquí radica la importancia de la investigación, que no puede ser puntual ni temporal, ya que la rehabilitación de la cangahua, tepetate o talpetate, es una necesidad

ecológica y social, o, para utilizar términos modernos, que conduzca al ecodesarrollo sustentable de zonas y grupos deprimidos. Creo que estas razones justifican plenamente mi presencia aquí, porque el gobierno al cual represento en este acto se identifica con la integración de los pobres, de los grupos rurales marginales, de los suelos erosionados, de la rehabilitación del medio ambiente, pero sobre todo de la incorporación de los grupos rurales marginados.

Quiero dejar testimonio de mi imperecedera gratitud para la Universidad Central del Ecuador, la Pontificia Universidad Católica de Quito, el ORSTOM de Francia, los centros de investigación de México, Chile y los coordinadores del evento, así como para la Unión Europea y otros investigadores e instituciones que, gracias a su trabajo y apoyo mancomunado, han hecho posible este evento.

Muchos de ustedes, distinguidos visitantes, ya han podido ver parte del paisaje andino ecuatoriano y de los suelos volcánicos endurecidos, y su aguda percepción científica me inhibe de entrar en detalles sobre su degradación, sus causas y efectos. Sin embargo, quiero dar a conocer que el Ecuador tiene una superficie de 274.000 km^2 y somos 12'000.000 de habitantes. El Ecuador tiene cuatro regiones geográficas bien definidas: la Costa, zona tropical localizada junto al Océano Pacífico, con una temperatura media de 24 a 28°; la Sierra, ubicada en la parte alta de la cordillera andina, con una temperatura promedio de 13°, con su monte más alto el Chimborazo a 6.370 m de altura, una alta densidad poblacional y la más afectada por la erosión; la Amazonía, también tropical, con una temperatura que oscila entre 24 y 28°, localizada en la vertiente oriental de la cordillera de los Andes, una baja concentración poblacional, pero de una alta susceptibilidad a la degradación; y finalmente la región insular Galápagos, zona considerada por la UNESCO como patrimonio de la humanidad, debido a su belleza escénica y a la originalidad de sus especies vegetales y animales.

Pero el Ecuador es algo más que un espacio geográfico y geofísico, es también el centro de una cultura milenaria con una vocación agrícola. Pueblos como los Huancavilcas, los Quitus, los Puruhaes y otros que supieron adaptarse a condiciones difíciles como las inundaciones y la pendiente para el cultivo del maíz principalmente, son los actores que nos dejaron una tecnología que no hemos sabido aprovechar y que nos ha dejado como lección la erosión de los suelos que antaño fueron productivos.

Sin embargo, los tiempos cambian, la población en el Ecuador ha pasado de 1 millón en 1920 a 12 millones en 1996. Esto ha provocado una fuerte presión sobre los recursos naturales y su consecuente erosión. Esto no se resuelve únicamente con inversión pública o con la predisposición de los productores, esto se resuelve también con acciones como las que los tiene aquí reunidos, que es el conocimiento científico, la posibilidad de incorporar suelos erosionados a la cultura productiva, con la utilización de la tecnología moderna que permita una rehabilitación más humana y económica de los suelos volcánicos endurecidos.

Finalmente, quiero declarar formalmente inaugurado este simposio, con el ferviente anhelo de que sea un éxito en el aspecto científico, técnico y ambiental, que llene las expectativas de todos los estratos aquí presentes y sobre todo de los ausentes que constituyen esa gran masa poblacional que vive, padece y disfruta de la cangahua.

Muchas gracias.

Ab. Hugo Encalada Mora
Ministro de Agricultura y Ganadería del Ecuador

Introducción al simposio

Claude Zebrowski, Paul Quantin, Germán Trujillo

Los suelos volcánicos ocupan cerca de la cuarta parte de la superficie de los países andinos de América del Sur (Chile, Ecuador, Colombia), de América Central y de México (Zebrowski, 1992). Son suelos fértiles que han sido, desde siempre, cultivados preferentemente con respecto a otros tipos de suelo. Sin embargo, algunos de estos suelos presentan horizontes endurecidos, que la erosión antrópica ha hecho aflorar, dejando al descubierto superficies estériles. Así, particularmente en México y en el Ecuador, los suelos volcánicos endurecidos y erosionados cubren importantes superficies. Estas se sitúan, desgraciadamente, en regiones con fuerte densidad poblacional y su integración a la agricultura, realizada tradicionalmente por los pueblos prehispánicos, se impone en nuestros días, más aún considerando que la presión demográfica no ha dejado de aumentar.

Pero la recuperación agrícola de estos suelos, ya sea para cultivo o para forestación, no puede realizarse de forma rentable sin un buen conocimiento de sus características y de los factores que limitan su productividad, y sin un estudio profundo del medio socioeconómico correspondiente.

Conscientes de estos problemas, algunos científicos de América Latina y Europa han estudiado estos suelos y las posibilidades de su recuperación. Los primeros estudios fueron puntuales y dispersos, pero desde finales de los años ochentas, se emprendió un estudio sistemático gracias a una estrecha colaboración entre investigadores europeos y latinoamericanos, y al apoyo financiero de la Unión Europea.

Un primer programa llamado «Génesis, características y rehabilitación de los suelos volcánicos endurecidos de México (tepetates)» se inició en 1989 en México, en el marco de un contrato entre el ORSTOM y la Unión Europea (contrato N° TS2-A 212-C CEE/ORSTOM). Este programa comprendía dos proyectos: uno en la región de la ciudad de México, realizado por el Colegio de Postgraduados de Montecillo asociado al ORSTOM, y el otro en la región de Tlaxcala, realizado por la Universidad Justus Liebig de Gießen (Alemania), asociada a la Universidad Autónoma de Tlaxcala y a la Comisión de Planificación del Estado de Tlaxcala (COPLADET). En total, 27 investigadores y asistentes y 20 estudiantes participaron en el programa, entre 1989 y 1993. Los estudios realizados dieron lugar a numerosas publicaciones así como a un informe de fin de contrato (Quantin, 1992). Dos simposios (México 1991 y Acapulco 1994) permitieron realizar intercambios científicos no solo entre los miembros de los diferentes equipos de México, sino también con investigadores de otros países. Durante esos encuentros, surgió la necesidad de extender los estudios hacia otros países de América Latina, donde estos suelos están presentes, con el propósito de confirmar algunos resultados y generalizar los conocimientos adquiridos.

Un segundo programa de investigación, que contaba nuevamente con el apoyo financiero de la Unión Europea (contrato ORSTOM/CEE N° ERB-TS3*CT 930252) fue establecido a principios del año 1994, por un período de 3 años (01/01/94 - 01/04/97).

Los estudios, realizados en México con los mismos equipos de investigadores, estuvieron orientados sobre todo hacia una experimentación en el campo, en condiciones similares a aquellas que se encuentran en la pequeña explotación agrícola (minifundio). Estos trataron sobre el restablecimiento de la fertilidad y la conservación de los suelos endurecidos incorporados a la agricultura, así como sobre los aspectos socioeconómicos de la rehabilitación de dichas formaciones.

En el Ecuador, el objetivo era tener un buen conocimiento de la extensión de los suelos volcánicos endurecidos, conocidos con el nombre de cangahua, y de las zonas erosionadas; comparar la génesis y las características de la cangahua con las del tepetate, y comprobar si la incorporación a la agricultura de esta formación presenta analogías con aquella del tepetate. Estos estudios fueron realizados en el marco de una colaboración entre la Universidad Central del Ecuador y el ORSTOM. Finalmente, los estudios socioeconómicos, que permitieron una aproximación al medio rural de las zonas en donde la cangahua está presente, fueron llevados a cabo gracias a la participación del Departamento de Geografía de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

En Chile, el proyecto se realizó en el marco de una colaboración entre la Universidad Austral de Chile (Valdivia) y la Universidad de Gießen. La experimentación fue realizada en andosoles sin horizonte endurecido, en una zona de desarrollo de explotaciones agro-pastorales, realizadas en perjuicio del bosque. Esta zona es equivalente a aquellas del Ecuador y de México situadas a mayor altitud que los suelos volcánicos endurecidos, donde se desarrolla la agricultura después de haber abandonado las áreas de suelos endurecidos, descubiertos por la erosión.

Así, al cabo de ocho años de estudios sobre los suelos volcánicos endurecidos, en vísperas de clausurar este segundo ciclo, pareció necesario reunir a todos los participantes de este programa, así como a algunos expertos nacionales y extranjeros, con el fin de realizar una síntesis de los conocimientos adquiridos y discutir acerca de los problemas pendientes, para reorientar, de ser necesario, futuros trabajos de investigación. Queremos recordar aquí los diferentes estudios realizados, presentar algunos resultados principales e introducir los principales temas que serán abordados durante este tercer simposio. Estos se refieren esencialmente a la génesis de los suelos volcánicos endurecidos y a los problemas ligados a su rehabilitación agrícola.

Origen y génesis de los horizontes endurecidos

El origen de los materiales ha sido durante mucho tiempo motivo de controversia. Algunos autores, tales como Sauer (1965) en lo que se refiere a la cangahua del Ecuador, Heine y Schönhals (1973) en cuanto al tepetate de México, pensaban que los horizontes endurecidos se habían formado en los depósitos de *loess* después de grandes glaciaciones. Hoy en día, esta hipótesis ha sido prácticamente abandonada, ya que se ha probado que los materiales originales de los suelos con horizontes endurecidos, con excepción de algunos lahares (Valdez, 1970; Vera y López, 1986 y 1992), son producto de caídas piroclásticas más o menos consolidadas en el momento de su depósito.

Los horizontes endurecidos pueden tener un origen geológico: son entonces tobas o brechas, a menudo intercaladas con lluvias de lapillí y de cenizas. Tal es el caso de los talpetates de Nicaragua (Prat, 1991), de algunos *hardpans* del Perú (Nimlos y Zamora, 1992) y de ciertos horizontes endurecidos de Colombia (Faivre y Gaviria, 1992). La dureza del horizonte es más o menos importante según el grado de alteración del material. El endurecimiento puede ser eventualmente reforzado por procesos edafológicos secundarios (acumulación de arcilla, de hierro o de sílice y de caliza en las regiones más secas).

Sin embargo, a veces los procesos edafológicos pueden ser los únicos causantes del endurecimiento del suelo. Este puede deberse a acumulaciones tanto de hierro, como es el caso del fierillo de los suelos Nadis de Chile (Luzio y Palma, 1994), como de sílice en el caso de algunos suelos de México (Rossignol *et al.*, 1992; Dubrœucq y Thierry, 1994) o de los suelos masa del Japón (Yamada *et al.*, 1994), o aun de caliza, en las regiones áridas.

En México, los trabajos (Quantin, 1992) mostraron que la gran mayoría de horizontes endurecidos son de origen geológico y surgen durante erupciones de tipo freatopliniano. Los procesos de arcillación y de silificación discreta solo vendrían a reforzar el endurecimiento inicial (Hidalgo, 1995). Los trabajos de Flores y Quantin, que serán presentados durante este simposio deberían confirmar este hecho.

En el Ecuador, Vera y López (1992) admiten que la mayoría de horizontes de cangahua provienen de caídas de cenizas y lapillí, así como de flujos piroclásticos. Sin embargo, la alteración de los materiales, siempre antiguos (más de 10.000 años), es de tal magnitud, que a menudo es difícil reconocer si se trata de caídas aéreas o de tobas alteradas. Estos horizontes conservan un endurecimiento marcado, por el hecho de estar situados en regiones secas (Winckell y Zebrowski, 1992). Los recientes trabajos de Quantin y Zebrowski presentados en el transcurso de este simposio, así como el examen de algunos perfiles durante las excursiones, permitirán probablemente determinar con mayor precisión el origen de la cangahua.

Extensión de los suelos endurecidos en México y el Ecuador, y origen de la erosión

Cuando los suelos volcánicos endurecidos afloran por erosión, están situados en las zonas subáridas a subhúmedas (P ≈ 800 a 1.000 mm).

En México, los mapas edafológicos elaborados por el INEGI permitieron determinar la superficie de los suelos volcánicos que presentan horizontes endurecidos (Zebrowski *et al.*, 1991). Estos cubren una superficie de 30.700 km^2, es decir 27 % de la superficie del eje neovolcánico. La erosión en ellos fue particularmente grave. En el estado de Tlaxcala, cerca de la tercera parte (60.000 ha) de los suelos con tepetate han sido erosionados (Werner, 1992), pero debido a la falta de estudios detallados, se ignora la extensión de las zonas erosionadas a nivel nacional. Las tentativas de identificación de dichas zonas mediante tratamiento de imágenes satélite, que serán presentadas en este simposio por De Noni *et al.* deberían permitir una rápida cuantificación de estas zonas.

En el Ecuador, la planimetría de los mapas edafológicos elaborados en el marco de un inventario realizado por el MAG y el ORSTOM (1975-1984) muestra que los suelos con cangahua representan una superficie de 240.000 ha en la región septentrional de la Sierra, entre Alausí y Tulcán. En esta región, 80.000 ha, es decir la décima parte de las tierras cultivadas, han sufrido una erosión antrópica importante que ha dejado la cangahua al descubierto o a muy poca profundidad (< 20 cm). Esta situación es aún más grave si consideramos que las zonas erosionadas se sitúan en tierras bajas, y por lo tanto en regiones relativamente cálidas, que son a menudo las más cultivadas y pueden admitir una amplia gama de cultivos.

La erosión de los suelos endurecidos, tanto en México como en el Ecuador, no es un fenómeno únicamente reciente (Quantin y Zebrowski, 1995), pero sí un fenómeno cíclico, que presenta períodos erosivos, seguidos de períodos de tregua, o inclusive de reintegración a la agricultura de las zonas erosionadas. En México, la erosión, con afloramiento del tepetate, ya era importante en la época prehispánica (William, 1972; O'Hara *et al.*, 1993).

No hay duda de que la introducción de la crianza de la oveja y de nuevos cultivos con la llegada de los españoles a América Latina ocasionó un recrudecimiento de la erosión. Sin embargo, este fue probablemente menos intenso que el ocasionado por la mecanización de los cultivos y muy recientemente por la reforma agraria, que provocó un aumento de población en zonas frágiles. Estos últimos factores desencadenaron una migración de los campesinos hacia las tierras altas, que a su vez están sometidas a la erosión. Los trabajos de Asseline *et al.* (1996), así como aquellos presentados en este simposio, sobre todo el de Oyarzún *et al.*, permitirán determinar si los riesgos de extensión de las zonas endurecidas y erosionadas son importantes. Los andosoles situados en tierras altas tienen una potencialidad agrícola limitada, por el hecho de que la mayoría presentan una poca fertilidad, así como riesgos de heladas para los cultivos. Además, al ser importantes acumuladores de agua lluvia, tal reservorio desaparece después de la erosión. La protección de las tierras altas sería entonces tan importante como el aprovechamiento de las tierras bajas erosionadas.

Rehabilitación agrícola de los suelos endurecidos

Límites y carencias

Los horizontes endurecidos presentan una estructura maciza y una microporosidad tan baja (< 5 %), que impiden la penetración del agua y el desarrollo de las plantas. Se impone por lo tanto la roturación y preparación de un lecho de semilla adecuado al inicio de su incorporación a la agricultura. Además, aun cuando algunas propiedades físico-químicas son favorables para su incorporación a la agricultura (15 a 50 % de arcilla, 35 a 70 % de arcilla + limo fino, capacidad de intercambio >15 me/100g de suelo, alto contenido de Ca, Mg y K intercambiables), esta se ve limitada por el bajo contenido de materia orgánica y por lo tanto de nitrógeno, y de fósforo asimilable.

La roturación de los horizontes endurecidos se realiza manualmente (utilizando un pico) o mecánicamente (subsoleo). Después, los bloques son reducidos mediante pulverización, hasta que alcanzan un tamaño lo suficientemente pequeño como para permitir el brote de las plantas. Según Martínez y García (1990), bloques de entre 3 y 4 mm permiten una buena penetración del agua y una erosión mínima. Sin embargo, los trabajos de Jerome (1991) en México, así como los de Leroux (de 1994 sobre los tepetates, y de 1996 sobre la cangahua) mostraron que los agregados finos (< 2 mm) se desintegran rápidamente bajo el efecto de las lluvias y que sería necesario realizar una preparación del suelo lo suficientemente gruesa para contrarrestar este fenómeno. Los seguimientos de las parcelas experimentales a lo largo de varios años, realizados en tepetate por Prat y Báez, deberían permitir evaluar la importancia de este fraccionamiento y establecer por lo tanto algunas recomendaciones referentes al tamaño inicial que se debe dar a los agregados.

Los numerosos trabajos realizados en la primera fase de nuestros estudios en parcelas Wischmeier, tanto en México como en Ecuador, muestran que solo algunos eventos de fuerte intensidad (130 > 50 mm/h) provocan erosiones importantes que pueden superar las 100 t/ha. Estas son más elevadas en suelos endurecidos trabajados que en suelos agrícolas (Quantin, Baumann y Werner, 1996).

Aunque la medición de la erosión en parcelas Wischmeier es un método de referencia, es muy difícil extrapolar los resultados al campo. Por esta razón, paralelamente a este tipo de medición, durante el segundo ciclo de estudio, se midió la erosión igualmente en parcelas de tamaño similar a aquellas de los campesinos (trabajos de Fechter-Escamilla *et al.*

y de Prat *et al.*, expuestos en este simposio). Se realizaron igualmente algunas mediciones de desprendibilidad de los elementos (trabajos de Ruiz, Alcala y Oropeza).

La erosión puede ser disminuida mediante métodos de cultivo específicos u obras antierosivas. De esta manera, en México, la influencia de la preparación del suelo (subsoleo profundo, tamaño de las partículas) fue probada por Prat *et al.* Del mismo modo, se buscaron métodos de cultivo menos erosivos: efecto de la disminución de las labores de cultivo estudiado por Fechter-Escamilla *et al.* en parcelas campesinas o en parcelas Wischmeier por Oropeza *et al.*, efectos de la compartimentación de los surcos («contreo»), estudiados por Prat *et al.*

En el Ecuador se probaron las medidas anti-erosivas (De Noni *et al.*, 1996): el objetivo era comparar la erosión en terrazas con pendiente nula y en terrazas de formación progresiva, así como probar el efecto de una cobertura vegetal, avanzado la fecha de la siembra, gracias a las variadas posibilidades de riego presentes en el país.

Todos los suelos volcánicos endurecidos presentan carencias en nitrógeno (N < 0,05 %) y en fósforo (P Olsen < 3 ppm). Los ensayos de productividad en macetas con tepetate (Etchevers *et al.*, 1992) y con cangahua (Cisneros *et al.*, en este volumen) confirman este hecho. Además, Etchevers y Brito (en este volumen) demostraron cierta deficiencia de los tepetates calcáreos en microelementos extraíbles (Zn, Mn et Fe).

Sin embargo, estos materiales son ricos en bases intercambiables, de manera que bastó una fertilización de 80 a 120 unidades de N y de 60 unidades de P para garantizar una producción igual o superior a la obtenida en suelo agrícola de cebada o trigo desde el primer año de cultivo y de maíz desde el segundo año de cultivo (Marquez *et al.*, 1992; Navarro y Zebrowski, 1992). Sería recomendable no obstante conocer las fórmulas ideales de abonos para los diferentes cultivos. En efecto, el maíz es más exigente en N y P que el trigo o la cebada, en el momento de la floración: hay un límite mínimo para obtener una buena fructificación (Navarro *et al.*, 1996).

El aporte de abono es recomendable. Produce en efecto un aumento de los microorganismos y de la mesofauna (Ferrera-Cerrato *et al.*, en este volumen). La mayoría de estudios realizados en estaciones experimentales, tanto en México como en el Ecuador, han demostrado que un aporte de abono orgánico, a razón de 40 t/ha, lo que representa aproximadamente 150 unidades de nitrógeno y 50 a 60 unidades de fósforo, proporciona rendimientos tan elevados como un abono mineral de tipo 120-60-0. Además de su aporte nutritivo y de su actividad biológica, la materia orgánica mejora las propiedades físicas del suelo, aumenta la retención de agua y disminuye el efecto del estrés hídrico, ayudando así a la germinación, la floración y la fructificación de las plantas. La materia orgánica y la actividad biológica desempeñan un papel fundamental en la creación de una buena estructura del suelo.

La evolución de la estabilidad estructural del tepetate cultivado ha sido objeto de algunos trabajos (Fechter *et al.*, Acevedo y Flores) que confirman la relación entre estabilidad estructural, infiltración y retención del agua.

Aprovechamiento de los suelos endurecidos y productividad

En la época prehispánica, el cultivo de los suelos endurecidos ya era practicado (García, 1986; Williams, 1972). El interés de los investigadores en cuanto a la utilización agrícola de estos suelos, al igual que los primeros intentos de rehabilitación, surgieron aproximadamente hace treinta años, tanto en el Ecuador como en México. Los poderes públicos siguieron de muy cerca y con gran interés los primeros resultados de dichos

intentos. Fueron sobre todo programas de forestación realizados con la finalidad de reducir la erosión, y algunos programas de incorporación a la agricultura (desde 1972 en México, desde 1976 en el Ecuador).

No existen datos completos ni precisos sobre las superficies reforestadas. En el Ecuador, De Noni *et al.* (1992) las estiman en 15.000 ha, lo que parece exagerado. Se trata esencialmente de reforestación con eucalipto plantado en huecos de 20 x 20 x 20 cm, sin medidas de conservación. En México, las especies plantadas fueron más variadas (pino, eucalipto, ciprés, fresno, etc.). Las medidas de conservación de suelos (terrazas, zanjas) fueron generales. El pino «montezumae» y el eucalipto dieron los mejores resultados (Llerena y Sánchez, 1992).

Para la mayor parte de campesinos de escasos recursos económicos, la incorporación de los suelos endurecidos a la agricultura es una necesidad, a fin de aumentar la superficie agrícola de sus explotaciones (Navarro y Zebrowski, 1994; Zebrowski y Vicuña, en este volumen). Esta es practicada de forma bastante diferente en los dos países.

En el Ecuador, la gran mayoría de pequeños campesinos que poseen superficies agrícolas muy pequeñas (más de la mitad de las explotaciones tienen una superficie inferior a 1 ha), realizan la incorporación a la agricultura de los suelos endurecidos después de una roturación manual utilizando un pico. El uso de abono no es muy común y los aportes de estiércol son siempre escasos. Los rendimientos son evidentemente muy bajos (< 600 kg de maíz, de trigo o de cebada). Algunos agricultores con mayores recursos practican la roturación mecanizada de la cangahua pero generalmente lo hacen sin medidas de conservación de los suelos. Sin embargo, un proyecto reciente de rehabilitación de la cangahua, emprendido por una ONG nacional (CESA), pone en práctica una roturación mecanizada de los materiales, así como medidas de conservación de los suelos (realización de terrazas de formación progresiva).

En México, los métodos mecanizados son generalizados. Se practica, en el marco de proyectos para-gubernamentales, la realización, al momento de la roturación, de terrazas con pendiente nula. Por su parte, los campesinos que financian íntegramente los trabajos de subsoleo de sus parcelas de tepetate, por el elevado costo de realización de terrazas con pendiente nula, hacen simplemente muretes de tierra al borde de sus parcelas para limitar las pérdidas de suelo.

Los numerosos estudios realizados por Navarro *et al.* muestran que la productividad del tepetate en el medio campesino es igual, o inclusive superior, a la obtenida en suelo agrícola normal, a partir del tercer año de incorporación a la agricultura. Esos autores señalan igualmente un mejoramiento de las propiedades químicas del suelo (disminución del pH, aumento de los contenidos de N y P). En efecto, las cantidades de abono utilizadas por los campesinos son elevadas y hasta algunas veces excesivas (Navarro *et al.*, 1995 y 1996).

Los costos de las operaciones de rehabilitación son altos (Zebrowski y Sánchez, 1996). Están comprendidos entre 350 y 550 US dólares/ha en lo que se refiere únicamente al subsoleo, pero alcanzan los 1.600-2.200 dólares/ha con la realización de terrazas con pendiente nula. Sin embargo, en el caso de terrazas de formación progresiva, ascienden solo a 850-1.000 dólares. Los costos de estas obras, su eficacia contra la erosión (Custode *et al.*, 1992; De Noni *et al.*, 1996), su reciente adopción en el programa de rehabilitación de la cangahua realizado por la CESA, merecerán especial atención durante este simposio.

Conclusión

Este simposio se sitúa al final de un programa de estudios que ha representado una inversión financiera (1,2 millón de dólares, tomando en cuenta únicamente el presupuesto

de funcionamiento y de equipos, atribuido por el ORSTOM y la Unión Europea) y una inversión humana muy importantes. Sesenta y dos personas participaron en el proyecto, de las cuales aproximadamente treinta lo hicieron de manera permanente. El programa, realizado en cooperación con algunas universidades, tenía también el propósito de dedicar un espacio a la capacitación: dio lugar a la defensa de cuarenta tesis de doctorado y licenciatura, y más de cien estudiantes efectuaron trabajos prácticos en el marco de sus estudios, efectuando encuestas en el campo.

Las publicaciones científicas fueron numerosas: más de un centenar de artículos, es decir aproximadamente las dos terceras partes de la literatura escrita sobre el tema durante este período. La síntesis general de todos los trabajos será presentada y discutida durante este simposio.

Si bien ciertos temas, tales como el origen y génesis de los suelos volcánicos endurecidos, han sido ampliamente estudiados y prácticamente no necesitan investigaciones adicionales, otros sin embargo están menos avanzados, por lo que deberán ser profundizados. Así, no se conoce la extensión de las zonas reforestadas, la producción forestal no ha sido estimada de forma precisa, la productividad agrícola debe ser mejorada mediante la investigación de métodos de cultivo más rentables, que permitan además una rápida regeneración del suelo y de su estructura. El perfeccionamiento de métodos de cultivo orientados a disminuir la erosión merecería igualmente un estudio detallado.

A pesar de las limitaciones físico-químicas de los suelos endurecidos, las zonas erosionadas en las cuales afloran estas formaciones son, han sido y serán aprovechadas. En efecto, estas formaciones están situadas en regiones donde una densidad poblacional muy elevada ha obligado al campesino a reintegrar a la agricultura esas zonas calificadas de marginales. Se ha demostrado la productividad de estos suelos endurecidos, cuando son correctamente acondicionados. El empleo de métodos mecanizados para su rehabilitación es costoso; ellos pueden ser difundidos y adoptados por los campesinos únicamente en el caso de programas gubernamentales o para-gubernamentales de asistencia, cuyo papel fue decisivo en México.

En el Ecuador, las acciones llevadas a cabo para la difusión de los métodos modernos de rehabilitación de estos suelos, acompañadas de medidas anti-erosivas son positivas pero muy limitadas. Debería desarrollarse un amplio proyecto piloto de rehabilitación de estas tierras y establecerse una política de intervención, sobre todo en lo que se refiere a la elección entre las zonas que se deben reforestar y aquellas que se deben integrar a la agricultura. Nuestros conocimientos posibilitan tales acciones.

En México, debería realizarse el inventario de las zonas erosionadas con suelos endurecidos que presentan posibilidades de ser regenerados, con miras a su rehabilitación agrícola.

Esperamos que este simposio aporte conclusiones y métodos adecuados para satisfacer estas necesidades.

Références bibliographiques

ASSELINE, J.; DE NONI, G.; TRUJILLO, G.; VIENNOT, M., 1996: *L'homme, la montagne et l'érosion des sols : cas des Andes équatoriennes,* ORSTOM, Montpellier, en prensa.

BAUMANN, J.; WERNER, G., 1997: Erodibility of Volcanic Ash Soils in the Central Mexican Highlands, en este volumen.

CUSTODE, E.; DE NONI, G.; TRUJILLO, G.; VIENNOT, M., 1992: La cangahua en el Ecuador: caracterización morfoedafológica y comportamiento frente a la erosión, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 332-346.

DE NONI, G.; TRUJILLO, G.; VIENNOT, M., 1992: Análisis histórico, social y económico de la cangahua en Ecuador, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 503-514.

DE NONI, G.; VIENNOT, M.; TRUJILLO, G.; CUSTODE, E., 1997: Ruissellement et érosion sur des parcelles de *cangahua* récupérée (période 1994-1996), en este volumen.

DUBRŒUCQ, D.; THYRI, M., 1994: Indurations siliceuses dans les sols volcaniques. Comparaison avec des silcrètes anciens, in *Transactions of the 15th World Congress of Soil Science*, Acapulco, México, Vol. 6a, p. 445-459.

ETCHEVERS, J.; CRUZ, L.; MARES, J., 1992: Fertilidad de los tepetates I. Fertilidad actual y potencial de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada (México), en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 379-384.

FAIVRE, P.; GAVIRIA, S., 1992: Suelos y formaciones piroclásticas endurecidas en los Andes de Colombia, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 89-99.

GARCÍA COOK, A., 1986: El control de la erosión en Tlaxcala. Un problema secular, en *Erdkunde*, 40, p. 251-261.

HEINE, K.; SCHÖNHALS, E., 1973: Entstehung und Alter der Toba-Sedimente in Mexiko, in *Eiszeitalter u. Gegenwart*, Band 23/24, p. 201-215

HIDALGO, C., 1995: *Étude d'horizons indurés à comportement de fragipan, appelés « tepetates », dans les sols volcaniques de la vallée de Mexico*, Thèse de Doctorat en Pédologie, Université Henri Poincaré, U.F.R. Sciences & Techniques de la Matière et des Procédés, Nancy, France, 215 p.

JEROME, G., 1991: *Étude des réorganisations superficielles sous pluies naturelles sur sol volcanique induré,* tepetate, *dans la vallée du fleuve Texcoco au Mexique,* Mémoire de fin d'études, ISTOM, Cergy Pontoise, Francia, 119 p.

LEROUX, Y., 1994: *Étude des réorganisations superficielles de différentes parcelles de* tepetate *cultivées sur un versant nord-est de la vallée de Mexico, au Mexique*, Mémoire de maîtrise, ISTOM, París, France, 77 p.

LEROUX, Y.; JANEAU, J.-L., 1997: Caracterización hidrodinámica de un suelo volcánico endurecido del Ecuador: influencia de los estados de superficie, en este volumen.

LLERENA, A.; SÁNCHEZ, B., 1992: Recuperación de tepetates en la vertiente oriental del valle de México, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos vndurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 302-308.

LUZIO, W.; PALMA, T., 1994: Indurated Horizons in Poorly Drained Volcanic Soils from Chile, in *Transactions of the 15th World Congress of Soil Science*, Acapulco, México, Vol. 6a, p. 516-527.

MÁRQUEZ R., A.; ZEBROWSKI, C.; NAVARRO, H., 1992: Alternativas agronómicas para la recuperación de tepetates, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos vndurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 465-473.

MARTÍNEZ, M.; GARCÍA, R., 1990: *Naturaleza de los cementantes de algunos tepetates del valle de México*, Tesis de Licenciatura, UACH, Chapingo, México.

NAVARRO, H.; FLORES, D.; PÉREZ M. A., 1997: Desarrollo agroecológico y factores agronómicos de la productividad en suelos volcánicos endurecidos, en este volumen.

NAVARRO, H.; ZEBROWSKI, C., 1992: Análisis agronómico comparativo en tepetates, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 451-459.

NAVARRO, H.; ZEBROWSKI, C., 1994: La réhabilitation agricole des sols volcaniques indurés et érodés en Équateur et au Mexique, dans *Transactions of the 15th World Congress of Soil Science*, Acapulco, México, Vol. 6a, p. 445-459.

NAVARRO, H.; ZEBROWSKI, C.; PÉREZ, M. A., 1995: La rehabilitación de los tepetates. Productividad agrícola y condiciones socioeconómicas de producción en la región de Hueyotlipan (Tlaxcala, México), en *Terra*, Vol. 12, en prensa.

NIMLOS, T.; ZAMORA, C., 1992: Indurated Volcanic Ash Soils in Peru, in *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 283-289.

O'HARA, S.; STREET-PERROTT, F.; BURT, T., 1993: Accelerated Soil Erosion around a Mexican Highland Lake Caused by Prehispanic Agriculture, in *Nature*, Vol. 362, p. 48-50.

PRAT, C. 1991: *Étude du* talpetate *de la région Centre Pacifique du Nicaragua*, Thèse, Université Paris VI, Paris, France.

QUANTIN, P., 1992: *Étude des sols volcaniques indurés « tepetates » des bassins de Mexico et de Tlaxcala, en vue de leur réhabilitation agricole*, Rapport scientifique final, contrat CEE/ORSTOM TS2-0212, 77 p.

QUANTIN, P.; ZEBROWSKI, C., 1995: Impact de l'homme sur l'érosion des sols à « tepetate » de la région de Mexico, dans *Réseau érosion*, Bulletin 15: Environnement humain de l'érosion, ORSTOM-CTA, p. 104-110.

ROSSIGNOL, J.-P.; CAMPOS, A.; QUANTIN, P., 1992: Las condiciones regionales de desarrollo de los tepetates en la zona Xalapa-Coatepec, Veracruz, México, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 210-220.

SAUER, W., 1965: *Geología del Ecuador*, Editorial Ministerio de Educación, Quito, 383 p.

VALDEZ, L., 1970: *Características morfológicas y mineralógicas de los suelos de tepetate de la cuenca de México*, Tesis, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

VERA, R.; LÓPEZ, R., 1986: El origen de la cangahua, en *Paisajes geográficos*, N° 16, Quito, p. 21-28.

VERA, R.; LÓPEZ, R., 1992: Tipología de la cangahua, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 113-119.

WERNER, G., 1992: Suelos volcánicos endurecidos (tepetates) en el estado de Tlaxcala: distribución, rehabilitación, manejo y conservación, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 318-331.

WILLIAMS, B. J., 1972: Tepetate in Valley of México, in *Annals of the Association of American Geographers*, Vol. 62, N° 4, p. 618-632.

WINCKELL, A.; ZEBROWSKI, C., 1992: La cangahua en Équateur : le contexte paléogéographique de sa formation, dans *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 107-112.

YAMADA, I.; KUBOTERA, H.; SHOJI, S., 1994: Indurated Volcanic Ash Soils in Japan. Their Characterization, Land Use and Management, in *Transactions of the 15th World Congress of Soil Science*, Acapulco, México, Vol. 6a, p. 487-496.

ZEBROWSKI, C.; QUANTIN, P.; ARIAS, H.; WERNER, G., 1991: Les « tepetates ». Récupération et mise en valeur des terres volcaniques indurées au Mexique, dans *ORSTOM Actualités*, N° 33.

ZEBROWSKI, C. 1992: Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 15-23.

ZEBROWSKI, C.; SÁNCHEZ, B., 1996: Los costos de rehabilitación de los suelos volcánicos endurecidos, en este volumen.

Síntesis del tema 1
Caracterización, génesis y geografía de los horizontes endurecidos de suelos volcánicos

Paul QUANTIN

INTRODUCCIÓN

Los suelos de origen volcánico ocupan cerca de la cuarta parte de la superficie de los países andinos de América Latina (Chile, Perú, Ecuador, Colombia), de América Central y de México (Zebrowski, 1992). Su extensión es igualmente importante en los países costaneros del Pacífico Occidental, sobre todo en el Japón, Filipinas, Indonesia, Nueva Guinea y Nueva Zelanda, así como en ciertos archipiélagos del Atlántico (Azores, Canarias, Cabo Verde, Caribe), del Océano Índico (Comores, La Reunión, Mauricio) del Pacífico (Hawai, Fiji, Vanuatu, Polinesia) y del Mediterráneo (Eólicas, Sicilia). Su presencia en los continentes es más puntual y dispersa, aunque notable.

Los suelos volcánicos presentan a menudo horizontes endurecidos que afloran debido a la erosión antrópica, dejando al descubierto superficies estériles. Desgraciadamente, estas se ubican en regiones muy pobladas y limitan seriamente el desarrollo agrícola. En varios países, sobre todo en México, Ecuador, Perú, Japón y en las Canarias, se han emprendido trabajos para la rehabilitación agrícola de los suelos endurecidos o trabajos de reforestación y de conservación de los suelos.

Sin embargo, la rehabilitación agrícola de estos materiales endurecidos, la necesidad de protegerlas contra la erosión, así como el conocimiento de su coyuntura, de su variedad y de su distribución geográfica requieren un estudio profundo de su origen, de su modo de formación y de sus propiedades. Ello fue objeto del primer taller del Tercer Simposio «Suelos volcánicos endurecidos», que lleva por título «Caracterización, génesis y geografía de los suelos volcánicos endurecidos».

LOS TRABAJOS PRESENTADOS

En su mayoría, los trabajos presentados completan o precisan estudios realizados anteriormente, expuestos con ocasión del primer simposio en 1991 en México (*Terra*, volumen 10, Número Especial, 1992), y posteriormente del segundo en el XV Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo en Acapulco en 1994 (Actas, volúmenes 6a y 6b, 1994).

En la introducción al simposio de 1994, se evocó la variedad de las denominaciones locales y de la naturaleza de los materiales volcánicos endurecidos, así como los diferentes procesos conocidos —geológicos y edafológicos— de su formación, y las ambigüedades persistentes y aún discutidas en lo que se refiere a la preeminencia de un proceso geológico y/o edafológico, o acerca de la naturaleza del cementante o del factor principal de su endurecimiento (arcilla o sílice, por ejemplo).

La contribución de este tercer simposio a este tema se limita a quince trabajos, en su mayoría de América Latina (siete de México, cuatro del Ecuador y uno de Colombia) así como uno del Japón, uno de las Azores y uno de Italia. Diez de estos trabajos son realmente novedosos y se refieren a:

- la edad y la velocidad de formación de diversas cangahuas del Ecuador (Hall y Mothes);
- caracterización y génesis de la cangahua en el Ecuador, gracias a la observación de una secuencia topoclimática (Quantin y Zebrowski);
- las propiedades de un fragipán y de un duripán del Sur de Colombia (Mora Palomino y Flores Román);
- la formación biogénica de encostramiento calcáreo en un andosol vítrico, en clima semiárido, en México (Dubroeucq *et al.*);
- las formas de sícilice extraíble mediante soda en una toba volcanoclástica alterada de Italia Central (Lorenzoni *et al.*);
- el endurecimiento irreversible del horizonte Bw de un andosol perhidratado (*Hydrudand*) de las Azores (Pinheiro);
- el uso de métodos no destructivos (TDR, GPR) para la detección de tepetates en el campo (Oleschko y Miranda);
- el análisis fractal de tepetates (Oleschko *et al.*);
- un estudio espacial de tepetates por teledetección (Servenay y Prat);
- una evaluación espacial y multitemporal de la cangahua en el Ecuador a partir de imágenes SPOT (De Noni y Viennot).

Tres trabajos aportan una información nueva, más precisa o más profundizada en lo que se refiere a los horizontes endurecidos, y son:

- un estudio profundizado de los tepetates de tipo fragipán del altiplano central de México (Hidalgo *et al.*);
- las formas microscópicas de sílice no cristalino de esos mismos tepetates (Poetsch y Arikas);
- las características, la génesis y la clasificación de dos tipos de horizontes endurecidos en los andisoles del Japón (Kubotera y Yamada).

Por otra parte, Zebrowski precisa la geografía y la superficie de varias unidades de suelos con cangahua en el Ecuador.

Del conjunto de trabajos, uno no es otra cosa que una evocación de trabajos anteriores en la región de Xalapa (Veracruz) en México: una secuencia de transformación de suelos ferralíticos con haloisita en un tepetate silicificado (Rossignol *et al.*).

APORTES DE LAS PRESENTACIONES Y DISCUSIÓN

1. Caracterización, génesis y geografía de los tepetates en México

Dos tipos de tepetate han sido particularmente bien estudiados: el tipo «fragipán» en la región de México y de Tlaxcala y el tipo «silicificado» (duripán) cerca de Xalapa (Veracruz). También se aborda la génesis del tipo «petrocálcico», en un estudio de encostramiento calcáreo cerca de Perote (Veracruz).

1.1. Tepetate fragipán

Poetsch y Arikas, en referencia a los trabajos de Hessmann (1992), precisan diferentes formas de sílice no cristalino (gel, ópalo A, biolitas), confirmando así cierta silicificación del tepetate.

Hidalgo *et al.* muestran que el tepetate fragipán es una toba alterada en la base de un paleosol. Estos autores caracterizaron tres niveles estratigráficos (2, 3, 4) con tepetate. La composición de los minerales arcillosos, interestratificados haloisita-esmectita, se relaciona con una climo-topo-secuencia de alteración y con cierta variación climática del Pleistoceno superior. La cohesión del fragipán se debe esencialmente a la organización cara a cara y compacta de las hojas arcillosas, aunque existe también cierta cantidad de geles de sílice y de ópalo A, que contribuyen al endurecimiento del material en estado seco. Sin embargo, esta propiedad es reversible a causa del predominio de arcillas hinchables.

1.2. Tepetate silicificado

Rossignol *et al.* recuerdan que los tepetates silicificados de la región de Veracruz están localizados en una secuencia de transformación por redoximorfia de un suelo muy arcilloso con haloisita en ópalo y cristobalita.

1.3. Encostramientos calcáreos

Dubroeucq *et al.* describen en detalle las formas de la calcita en un horizonte que presenta caliza friable y en un horizonte encostrado, dentro de un andosol vítrico con vegetación de pino (Perote, Veracruz). Estos autores muestran que la acumulación calcárea es primero biogénica en la esfera de la raíz actual (caliza friable), y luego se moviliza, se acumula en forma de costra, acompañada entonces de ópalo A.

1.4. Nuevos métodos de caracterización

Oleschko y Miranda demuestran el interés de tres métodos no destructivos de la estructura original, como la micromorfometría en laminas delgadas, para evaluar la «porosidad efectiva» y la conductividad hidráulica, o en la escala macro del campo, el uso del TDR para determinar la «humedad volumétrica» y del GPR (radar portátil) para la detección precisa de las capas de tepetate. Se comparan los resultados con los obtenidos anteriormente mediante métodos tradicionales.

1.5. Nuevos métodos de análisis de imágenes y de cartografía

Oleschko *et al.* aplicaron el análisis fractal al estudio de la distribución espacial de tepetates al mapa de suelos de Peña y Zebrowski (1992) en el valle de México. Se muestra una buena dimensión fractal, lineal y de masa, en las áreas de tepetate aflorante, en relación con el grado de erosión de los suelos superficiales, pero no en las diversas unidades de tepetate mapeadas. En la escala micro no hay tampoco dimensión fractal en la distribución de minerales volcánicos gruesos, confirmando así el estado poco alterado del material original (toba). Falta sin embargo el análisis de los rasgos pedogénicos y de la alteración de vidrios.

Servenay y Prat realizaron un ensayo metodológico de cartografía de tepetates por teledetección a partir de imágenes Landsat-TM del valle de México. Se determinaron tres unidades de tepetate: aflorante, discontinuo y potencial. Los autores comparan el mapa y la evaluación de la superficie con tepetates obtenida mediante esa técnica, con el mapa de Peña y Zebrowski (1992). A pesar de una cierta concordancia, se observa una divergencia en algunas áreas y en la superficie global. Se realiza además una extrapolación a algunas otras regiones del altiplano central mexicano a partir de imágenes Landsat-TM y de mapas del INEGI, con miras a la elaboración de un SIG de esa región.

2. Geografía, origen y datación, características y génesis de la cangahua en el Ecuador

2.1. Geografía

Zebrowski presenta una síntesis cartográfica de los suelos con cangahua en el valle interandino, distinguiendo cuatro unidades según una zonación climática altitudinal y la diferenciación tanto de los horizontes endurecidos o no, y proporciona la superficie de cada unidad.

La cangahua existe únicamente en las formaciones piroclásticas anteriores al Holoceno. Hay diferentes capas y diferentes formas, pero su definición varía también según los autores, ya que el límite entre suelo y cangahua no siempre es claro.

2.2. Origen y datación

Hall y Mothes describen una bella secuencia estratigráfica cerca de Quito, donde alternan flujos y caídas piroclásticos, cangahua, eventualmente sedimentos y suelos. Distinguen once series estratigráficas y por lo menos dieciocho capas de cangahua, todas formadas probablemente en el Pleistoceno superior, y anteriores al Holoceno. Asemejan las características químicas y mineralógicas de las capas piroclásticas y de cangahua a emisiones volcánicas conocidas en la región. Así, la mayoría de capas de cangahua se derivan de formaciones piroclásticas, variables según los focos de erupción. Los autores, basados en la hipótesis de Sauer (1965), piensan que los productos que originaron la cangahua fueron en su mayoría redistribuidos por el viento, en condiciones particularmente áridas y frías de los períodos glaciares, o eventualmente coladas de lodo. Aunque señalan algunos rasgos edafológicos, hay pocas referencias a la pedogénesis en la formación de la cangahua. Sin embargo, citando a MacLellan (1995), los autores reconocen que el origen piroclástico es predominante y que no es evidente el efecto de una modificación eólica en los minerales. Esta interpretación debe por lo tanto ser discutida a la luz de otros datos, sobre todo edafológicos.

En una segunda parte, Hall y Mothes presentan una datación relativa de diversas capas de cangahua del Ecuador, entre emisiones volcánicas que han sido datadas. Conociendo el espesor de estas formaciones, deducen una velocidad de formación de miles de años por metro de depósito, basándose en la hipótesis de un depósito continuo (redistribución por el viento) entre dos erupciones piroclásticas mayores. Constatan además que el periodo necesario de depósito de un metro de cangahua varía entre 1.000 y 2.000 años en las formaciones antiguas, y entre 2.000 y 5.000 años en las formaciones recientes. Este método, al igual que la hipótesis del modo de depósito, son discutibles.

2.3. Características y génesis de la cangahua

Quantin y Zebrowski estudiaron en detalle los suelos con cangahua en una secuencia topo-climática cercana a Bolívar (Carchi, Ecuador), así como diferentes muestras de la cangahua superior de otras regiones. Analizaron únicamente las formaciones más recientes (grupo K de Hall y Mothes), distinguiendo dos capas, la superior y la inferior. La superior, con un encostramiento calcáreo datado de 14.000 BP, se habría formado entre 15 y 20.000 BP. Los autores confirman que la cangahua es de origen piroclástico, en forma de ceniza consolidada (toba). La composición y el origen varían según los depósitos y la localización de dacita a riolita. Se trata con seguridad de una toba alterada en la base de un suelo, que presenta rasgos edafológicos y biológicos, pese a tener muy poco carbono orgánico. La composición de las arcillas de alteración, al igual que en los suelos,

varía según las zonas climáticas. Las acumulaciones de caliza y de sílice se producen en la parte baja de la secuencia en clima semiárido. Es posible que una fase más árida haya precedido a la génesis del suelo actual, sobre todo en el caso de la cangahua superior. La hipótesis planteada es que la cangahua y el suelo subyacente provienen de una sucesión de toba y cenizas no consolidadas en una misma serie eruptiva, como ha sido observado en México (Quantin, 1992). Por lo tanto, habría que tomar en consideración la pedogénesis, por lo menos en lo que se refiere a las formaciones superiores de la cangahua.

2.4. Nuevos métodos de cartografía

De Noni, Viennot y Servenay (1996) realizaron un primer ensayo metodológico de determinación de áreas con cangahua en la región de Quito, a partir de imágenes SPOT de 1995. En la misma región establecieron una comparación multitemporal entre imágenes de 1986 y 1995, observando una casi triplicación de las áreas con cangahua aflorante o discontinua al cabo de solamente diez años, como consecuencia de una acelerada erosión.

Conjuntamente con Faure (1996), los autores aplicaron la misma técnica al valle interandino, elaborando un mapa regional de la cangahua y comparándolo con el mapa anterior de Zebrowski (1996). A pesar de una cierta concordancia de las áreas con cangahua y de la superficie global (2.600/2.400 km^2), se observa que el 30 % de las áreas no se superponen. El método por teledetección ameritaría entonces una afinación.

3. Los horizontes volcánicos endurecidos de Colombia

Mora Palomino y Flores Román estudiaron, en la región del altiplano de Nariño, cercana al Ecuador, formaciones superficiales similares a la cangahua. Presentan algunas características químicas y físicas de las mismas, entre ellas su dureza y estabilidad. Distinguen dos tipos, fragipán y duripán, cuya formación piensan que está ligada a la posición topográfica, en la pendiente o al pie de ella.

4. Horizontes endurecidos del Japón

Kubotera y Yamada profundizaron, en la isla de Kyushu, la caracterización de diversos horizontes endurecidos de diferentes tipos llamados Kashinomi, Nigatsuchi, Banban, Hanamure y Kora. A través de depósitos piroclásticos ya datados, se conoce la edad de estas formaciones cuyas propiedades físicas y químicas permiten distinguir dos tipos mayores:

- un horizonte Bw de andosol rico en alófano aluminoso, que se endurece irreversiblemente después de la desecación con el aire;
- un horizonte C de material piroclástico poco alterado, endurecido pero friable, tanto en estado húmedo como en seco.

El primer tipo de formación edafológica se deriva de cenizas que datan de 10.000 a 30.000 BP. El agente causante del endurecimiento, probablemente un gel de alúmina, no ha sido aclarado. El segundo tipo es de formación geogénica, ya sea que el depósito de ceniza sea reciente (1.000 a 4.000 BP) o más antiguo pero poco alterado. El agente de cementación, rico en Al, Fe y Si, no ha sido tampoco aclarado.

5. Horizontes endurecidos de las Azores

Pinheiro estudió dos tipos de horizontes endurecidos de andosoles: un horizonte plácico (Bsm) en un andosol ácido y un horizonte Bsw en un andosol perhidratado (*Hydrudand*) que se endurece irreversiblemente después de la desecación con el aire. El primero se encuentra permanentemente cementado por una acumulación de óxido de hierro. El segundo,

al igual que en el caso de los andosoles ácidos del Japón, debe su endurecimiento al aire de un alófano rico en alúmina.

6. Horizontes endurecidos de Italia

Lorenzoni *et al.* estudiaron, en la base de un alfisol, una toba alterada con propiedades de fragipán. El análisis de las arcillas, la disolución selectiva por soda y la microscopía muestran que esta toba alterada posee propiedades semejantes a las del tepetate «fragipán» de México. La matriz arcillosa está constituida de haloisita, pero contiene también una cantidad importante de gel de sílice y de sílice no cristalino probablemente en forma de ópalo A y de biolitas.

CONCLUSIÓN

1. Caracterización y génesis

El conocimiento de los tepetates mexicanos de tipo fragipán está bastante avanzado en nuestros días, tanto en lo que se refiere a su origen piroclástico, como a sus elementos constitutivos y sus propiedades. Su cohesión depende sobre todo de la naturaleza hinchable y de la micro-organización, compacta, de los minerales arcillosos, así como de los revestimientos de sílice no cristalino. Los tepetates silicificados (duripanes) y su génesis se conocen mejor. La acumulación calcárea puede iniciarse por un proceso biológico.

El conocimiento de la cangahua del Ecuador también ha progresado bastante. Los estudios estratigráficos demuestran la importancia de los aportes piroclásticos y precisan la edad y la duración de su formación. Sin embargo, el papel de una modificación eólica de los depósitos piroclásticos es aún discutible. Los estudios edafológicos de las dos últimas capas de cangahua confirman el origen piroclástico y demuestran la importancia de la pedogénesis en la composición de las arcillas y en la acumulación de la caliza y del sílice. La cangahua es una toba piroclástica alterada (horizonte C) en la base de un suelo del mismo origen eruptivo, pero constituida por una ceniza consolidada y un depósito de ceniza no consolidada.

En Colombia, las formaciones endurecidas, por lo menos aquellas de depósitos piroclásticos pleistocénicos, son similares a las del Ecuador.

En Italia, es probable que una toba piroclástica alterada en la base de un alfisol sea comparable al tepetate «fragipán».

En el Japón y las Azores, el endurecimiento irreversible de un horizonte Bw de andosol ácido y muy hidratado se debe a algunos geles alofánicos ricos en alúmina. Los otros tipos de horizonte, tales como el ferruginoso (plácico) de formación pedogénica o la ceniza consolidada poco alterada de formación geogénica, son ya bastante conocidos.

Quedan sin duda algunos estudios por realizar en lo que se refiere a la diversidad de los horizontes endurecidos, al modo de formación de los depósitos de ceniza consolidada y de consolidación y cementación pedogénica o geogénica. Por el momento, se debería comenzar por comunicar de mejor manera la información adquirida, debatir sobre ella y sintetizarla.

Una clasificación sencilla de los materiales endurecidos (que afloran o podrán aflorar por erosión del suelo agrícola) puede abarcar: en primer lugar, las rocas volcánicas sin o con muy poca alteración (de tipo brecha, ignimbrita y toba con un grado decreciente de dureza); en segundo término, las rocas piroclásticas semi-alteradas en la base de un suelo, ya sea frágiles de tipo fragipán o duras de tipo duripán (con sílice) o duripán

cálcico (con caliza y sílice); finalmente, los horizontes de suelo transformados por degradación de arcillas y acumulación de sílice (duripán) o de hierro de tipo plácico, o por endurecimiento irreversible de aluminio y hierro en ciertos andosoles que se pueden calificar de tipo «alu-ándico».

Además del tipo, hay que precisar su grado de dureza, si es reversible o no, y su fertilidad potencial (después de su fragmentación en agregados óptimos, factores limitantes o favorables...).

Para la cartografía y el uso de la tierra, es muy útil relacionar las formaciones pedogénicas con una zonación climática o topoclimática: duripán cálcico o duripán con un clima semi-árido o subhúmedo; fragipán con un clima subhúmedo; formaciones muy friables con un clima húmedo o perhúmedo.

En cuanto a los nuevos métodos de caracterización física *in situ* del objeto natural y de sus propiedades:

- a la escala macro del campo, el uso del TDR y del GPR es probablemente muy eficaz y rápido;
- a varias escalas, macro y micro, el análisis de imagen con la determinación de parámetros fractales puede ser eficaz para evaluar varias áreas irregulares y propiedades físicas de sistemas complejos, sin olvidar una calibración preliminar mediante métodos tradicionales.

2. Geografía y cartografía

La primera fase de cartografía de tepetate en México y de cangahua en el Ecuador se realizó con métodos tradicionales (reconocimiento de campo, análisis de suelos de referencia y caracterizaron de los tipos de tepetate o cangahua, definición de unidades y mapeo a partir de foto-interpretacion y de mapas topográficos). Este proceso demanda mucho tiempo, por lo que se han experimentado nuevos métodos por teledetección en el Ecuador con imágenes SPOT y luego en México con imágenes LANDSAT-TM.

A pesar de una concordancia global de las áreas y de la superficie con afloramiento continuo o discontinuo de formaciones endurecidas y estériles, casi una tercera parte de las áreas correspondientes no coinciden. Eso se debe a una discriminación insuficiente de otras formaciones, de roca desnuda o de pradera desecada, por ejemplo. Además, sin un estudio preliminar de campo, la teledetección no permite distinguir los diversos tipos de tepetate o de cangahua.

Para tal estudio preliminar se podrían utilizar nuevos métodos de investigación, como el GPR. Posteriormente, con un control de campo, la teledetección podrá servir para una cartografía rápida y extensa. La observación multi-temporal puede ser interesante para seguir el desarrollo de áreas erosionadas o, a la inversa, rehabilitadas (de uso agro-silvo-pastoral). Finalmente, se podrían reunir estas informaciones en un sistema de información geográfica (SIG).

Referencias bibliográficas

HEßMANN, R., 1992: Micromorphological Investigations on «Tepetates» Formation in the «Toba» Formation-Sediments of the State of Tlaxcala (México), en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 145-155.

MACLELLAN, A., 1995: *Characteristics of Volcanic Tuff Deposits from the Cangahua Formation, Northern Ecuador*, Tesis de bachillerato inédita, Universidad de Aberdeen, Escocia.

PEÑA, D.; ZEBROWSKI, C., 1992: *Estudio de los suelos volcánicos endurecidos (tepetates) de las cuencas de México y Tlaxcala (México). Informe del mapa morfopedológico de la vertiente occidental de la Sierra Nevada*, anexo al informe final, Contrato CCE-ORSTOM N° TS2-0212, 101 p.

QUANTIN, P., ARIAS H.M.; ETCHEVERS, J. D.; FERRERA-CERRATO, R.; OLESCHKO, K.; NAVARRO, H.; WERNER, G.; ZEBROWSKI, C., 1993: *Terra* Vol. 11 (número especial: Tepetates de México, caracterización y habilitación para la agricultura), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, 72 p.

ZEBROWSKI, C. 1992: Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 15-23.

El origen y la edad de la cangahua superior, valle de Tumbaco (Ecuador)

Minard L. HALL, Patricia A. MOTHES

Abstract

The Cangahua Formation, a thick mantle of fine grained ashy material that covers the northern Ecuadorian and southern Colombian Andes, has been attributed to both volcanic and glacial processes. However little is known about its origin, age, or its rate of formation. The purpose of this paper is to present new data and interpretations concerning this unit.

In agreement with a volcanic origin as indicated by its well-established volcanic mineralogy and abundant volcanic glass, a great number of volcanic sources exist in both the western and eastern cordilleras that were active during the Pleistocene and Holocene periods. The formation of the cangahua, which bears little organic material, seems to have been best developed during the colder, drier conditions of the Pleistocene, when glaciers existed in both cordilleras and the Interandean Valley supported extensive grasslands.

The cangahua *characteristically forms layers that mantle the pre-existing topography with a uniform thickness, which argues strongly that the fine grained material fell from the air. The evidence suggests, however, that little reworking of the ash occurred, either by wind or water. It is thought that the presence of an extensive grass cover would have homogenized the ashy material as it fell, as well as prevented its reworking by wind.*

The stratigraphy of the Upper Cangahua Fm. is well-developed near Tumbaco and Quito. Stratigraphic, petrographic, and chemical correlations of units within the cangahua *with volcanic events that occurred in the nearby Chacana Volcanic Complex show that the* cangahua *owes its origin mainly to volcanic ash derived from these eruptions, but also to rock powder (loess) produced by glacial erosion of older andesitic rocks of the Chacana Complex. These materials were carried by SE winds into the Interandean Valley.*

Based upon these correlations, it is concluded that the age of the Upper Cangahua Fm. is less than 0.83 Ma and more than 10,000 years old. To the stratigraphic middle of the Formation, we assign ages of 0.23 - 0.26 Ma for the Chalupas and Burrochupa pyroclastic flows. The Pifo pumice airfalls, an excellent regional marker unit in the upper part of the section, are approximately 0.165 Ma old. Based upon these ages tentative accumulation rates for the cangahua *are calculated. Rates of 8,200-9,200 years/meter are estimated for the upper cangahua in the Pifo section, where there is good control. Elsewhere rates of 2,400 to 7,500 yr/m are observed in the Western Cordillera and the Interandean Valley, especially in sections less than 35,000 yr old. For cangahuas up to 230,000 yr old the rates are much slower and vary between 9,000 and 15,000 yr/m.*

If other cangahuas *have a similar origin, we would expect to find greater thicknesses of* cangahua *adjacent to the more productive eruptive centers and more intensely glaciated zones of the* Cordillera Real.

Keywords: Cangahua - *Indurated Volcanic Soils - Dated Volcanism - Ecuador*

INTRODUCCIÓN

Los suelos volcánicos endurecidos, localmente llamados «cangahua», se formaron por el depósito, la removilización, la meteorización y el endurecimiento de materiales piroclásticos lanzados por erupciones a lo largo del arco volcánico (Vera y López, 1986; Clapperton, 1993). En América Latina, se estima que aproximadamente 1,4 x 10^6 km^2 están cubiertos por suelos volcánicos, lo que representa el 23 % del total de su superficie (Zebrowski, 1992). Además, este autor subraya que los suelos endurecidos cubren importantes superficies en algunos países; así, en el Ecuador, habla de 3.000 km^2 (o 20 %) del valle interandino cubiertos por dicho material.

Dado que cenizas y lapillí volcánicos y sus productos alterados comprenden la mayor parte de la Formación Cangahua (Clapperton y Vera, 1986; Winckell y Zebrowski, 1992), la fuente más probable de los materiales finos es el volcanismo del arco volcánico del Ecuador. de amplia extensión tanto en el tiempo como en el espacio.

La cangahua es principalmente material fino endurecido de color caqui-anaranjado, alterado por los procesos comunes de meteorización. Está compuesta principalmente de vidrio volcánico alterado, más minerales volcánicos tales como plagioclasa, hornblenda, clinopiroxeno, ortopiroxeno, magnetita, biotita, feldespato-K y cuarzo (Maldonado, 1973; Vera y López, 1986; Maclellan, 1995). El vidrio comprende la mayor parte del depósito, mientras que el contenido orgánico es pobre (≤ 1 %). El vidrio se altera con el paso del tiempo y la humedad para formar alófano y minerales arcillosos, especialmente haloisita y montmorillonita (Maldonado, 1973; G. Thompson, com. pers.).

El propósito de este artículo es precisar algunos factores que contribuyeron a la formación de la cangahua.

FUENTES VOLCÁNICAS

A lo largo del valle interandino existen cientos de centros volcánicos que datan desde el Plioceno hasta el presente (Hall y Beate, 1991), y cuyos productos eruptivos han jugado supuestamente un papel importante en la formación de la cangahua. Se sabe, a través de muchos estudios tefrocronológicos, que los volcanes más activos durante los últimos cientos de miles de años son El Soche, Chachimbiro, Cerro Negro, Imbabura, Mojanda, Ninahuilca, Pululagua, Chacana, Antisana, Cotopaxi, Tungurahua, Quilotoa, Guagua Pichincha, Sangay, Chimborazo, Cayambe y Chalupas, entre otros.

La cangahua representa la contribución de muchas fuentes de ceniza volcánica. Mediante el microscopio SEM, Maclellan (1995) observó que la cangahua lleva esquirlas vítreas y diferentes minerales derivados de distintos ambientes y fuentes tanto locales como regionales, que se mezclaron al depositarse. Además, la periodicidad eruptiva de un volcán tiene mucho que ver con su aporte de ceniza. Por ejemplo, el volcán Guagua Pichincha genera erupciones de magnitud mediana cada 500 años (Geotérmica Italiana, 1989), mientras que el Quilotoa solo produce una gran erupción cada 10 a 14 mil años (Hall y Mothes, 1994). Así, la contribución de cenizas del Pichincha ha sido probablemente algo más constante y frecuente que la del Quilotoa.

Adicionalmente, cabe destacar la generación de decenas de kilómetros cúbicos de ceniza fina, producto de grandes erupciones tipo ultra-pliniano como las que generaron los depósitos de las unidades Chalupas, Burrochupa y Pifo. Pese a que no sucedieron frecuentemente, su contribución de ceniza fina fue enorme. Sparks y Walker (1977) sostienen que cenizas co-ignimbríticas alcanzan frecuentemente volúmenes similares a los del flujo piroclástico aparentado.

Químicamente, muestras de cangahua recogidas desde Quito hasta Riobamba contienen de un 47 % a un 60 % de SiO_2, que es representativo del volcanismo andesítico a lo largo del valle interandino (Maclellan, 1995). Vera y López (1986) en cambio reportan que el contenido global de sílice es aproximadamente del 65 %, lo cual indicaría una composición dacítica-andesítica. Análisis de muestras de cangahua tomadas en el flanco occidental de la caldera riolítica de Chacana, presentan valores de SiO_2 cercanos al 62 % (Baer, 1991). Un estudio meticuloso de la cangahua debería mostrar sin duda más claramente contribuciones de los centros volcánicos ácidos en ambas cordilleras, pero cabe recalcar que un material meteorizado como la cangahua nunca va a presentar una composición idéntica al material original, pues la naturaleza de este último puede ser escondido rápidamente por los procesos de meteorización.

PAPEL DEL CLIMA PLEISTOCÉNICO

La formación de la cangahua está íntimamente vinculada a los períodos de glaciación en las cordilleras, cuando las condiciones climáticas en el callejón interandino experimentaron tanto temperaturas reducidas (hasta 7 °C, la menor) como vientos permanentes relacionados con los casquetes glaciares existentes a lo largo de la cresta de las cordilleras (Clapperton, 1993). Igualmente, temperaturas en 2 a 6 °C menores a las actuales y condiciones más secas se presentaron en la Amazonía (van der Hammen y Absy, 1994). Así, está claro que en el callejón reinaban condiciones climáticas secas de tipo *steppe* durante el Pleistoceno tardío. Grandes mamíferos vegetarianos habitaban los valles secos, lo que se evidencia tanto por los huesos hallados frecuentemente en la cangahua, como por las bolas de los escarabajos peleteros (*Coprinisphaera ecuadorenis*) que formaron los excrementos de estos herbívoros (Sauer, 1965). Supuestamente, no existía la humedad atmosférica ni la actividad biológica suficiente para generar andisoles, cuyo desarrollo se observa raramente en la Cangahua Superior.

Hasta ahora en el Ecuador solamente se ha identificado evidencia morrénica que corresponde al Pleistoceno tardío ($\leq$ 250.000 aAP), es decir a la penúltima glaciación que incluye las etapas isotópicas 6 a 3 (Clapperton, 1993). Lamentablemente, el control de edad de las antiguas glaciaciones es casi nulo. Sin embargo, se encuentran evidencias de esta extensa glaciación hasta los 2.750 m.s.n.m. en los flancos orientales de la cordillera Oriental (Clapperton, 1987).

La última glaciación (110.000 - 10.000 aAP) experimentó más de cuatro avances que están bien reconocidos en la cordillera Real del Ecuador, al Este de Quito (Clapperton, 1987; 1993). En síntesis, el período de formación de la cangahua coincide con las glaciaciones en las cordilleras y en condiciones de clima frío, seco y ventoso. Cambios bruscos de clima reconocidos en otras partes (Alley *et al.*, 1996), explicarían, quizás, la rápida transición entre capas de cangahua y paleosuelos negros orgánicos que se encuentran intercalados ocasionalmente en la cangahua en el valle interandino, especialmente al tope de la misma.

Dadas estas condiciones, se cree que el valle interandino presentaba un paisaje probablemente cubierto por pajonal. Esto hubiera tenido el efecto de imposibilitar el desarrollo de una buena estratificación típica de caídas de ceniza. Una vez que se depositaron los productos, sufrieron poca erosión o movimiento adicional, gracias al mismo pajonal. Localmente, en algunos sitios donde el agua se estancaba y permanecía durante períodos largos, algunos estratos de cangahua se alteraron para formar bentonitas.

Otra fuente muy lógica que debería haber proporcionado material fino constituyen los amplios sectores glaciados de la cordillera Real (Sauer, 1965). Dado que andesitas

forman gran parte de la cubierta de la cordillera Real, su erosión por la extensa glaciación que se produjo durante el Pleistoceno tardío y el transporte eólico del polvo glacial hacia el valle interandino explicarían el hecho de que la composición química de ciertas cangahuas cerca de Pifo es más andesítica, y no riolítica, como se esperaría si todo el material fino fue resultado de erupciones del Chacana. En realidad, la composición química de una capa de cangahua en el sector de Pifo sugiere una mezcla de material andesítico con la ceniza riolítica de la caída Pifo (Hall y Mothes, en preparación).

TRANSPORTE Y DEPÓSITO

Las capas individuales de cangahua muestran espesores uniformes sobre grandes extensiones y un depósito periclinal sobre la topografía preexistente. Solo un origen debido a la proyección aérea podría dar como resultado esta clase de rasgos. El depósito o la remodelación por agua no fue importante, pues existen pocas estructuras sedimentarias de tipo fluvial en la cangahua.

Se ha pensado que el viento fue el agente principal tanto para el transporte del material fino desde la fuente como para su depósito (Sauer, 1965; Clapperton y Vera, 1986). Por ello, el espesor del manto de la cangahua varía según la distancia desde la fuente, pero también según la disposición de material fácilmente erosionable en la fuente y la presencia de depresiones receptoras para recibir y preservar los materiales finos. Por ejemplo, la Formación Cangahua Superior es más potente cerca de Pifo y disminuye al Oeste y Sur, reflejando un importante aporte por parte del volcán Chacana y del área glaciada de la cordillera Real.

También existe evidencia clara de que los materiales finos han sido movilizados por el viento. Por ejemplo, en los alrededores del volcán Mojanda, se encuentran dunas de lapillí de pómez intercaladas en la cangahua, mostrando claramente la fuerza de los vientos locales para erosionar material suelto y transportarlo. Clapperton (1993) reporta que en el Chimborazo existen acumulaciones de cangahua de hasta 8 m de espesor en sectores protegidos del viento, mientras existe muy poca cangahua depositada cerca del volcán, pese a que en ambos casos se trató del mismo intervalo de tiempo. Además, Maclellan (1995) reporta que en varios casos la cangahua se acumuló detrás de obstáculos, dando pruebas de que no solamente se relaciona con procesos eólicos, sino que los vientos vinieron desde el Sur; hoy en día, los vientos dominantes vienen del Sudeste.

No obstante, los procesos eólicos no pueden explicar toda la evidencia y los rasgos comúnmente observados en la cangahua. Por ejemplo, si el viento era el proceso dominante, no se deben encontrar: 1) capas de espesor uniforme, pues el viento debe erosionar el material fino desde las cuchillas y depositarlo en la quebrada adyacente, aspecto raramente observado; 2) capas muy homogeneizadas, pues los procesos eólicos deben dejar sus rasgos sedimentarios característicos (dunas, estratificación cruzada, sorteo excelente, etc.) sobre grandes extensiones.

En realidad, el rol de los vientos fue más bien local o fuertemente impedido por la vegetación, pues los espesores uniformes y la naturaleza periclinal de la cangahua argumentan decisivamente en contra del movimiento lateral de la ceniza. Además, según el estudio microscópico SEM llevado a cabo por Maclellan (1995), existen pocos granos o cristales redondeados en la cangahua analizada, lo que sugiere que los procesos de remodelación por viento no eran importantes ni de larga duración.

En efecto, la mayoría de evidencias implica que los materiales finos cayeron tranquilamente desde el aire. La carencia de una micro-estratificación en la cangahua se

puede atribuir a una extensa cobertura vegetal o posiblemente a caídas rápidas y voluminosas de piroclastos. El depósito paulatino de ceniza sobre pajonal tendería a homogeneizar los materiales finos y a prevenir la formación de una micro-estratificación, procesos reportados en caídas de ceniza en Islandia (G.P. Walker, 1986, com. pers.). Además, dicha cubierta vegetal impediría la erosión subsecuente de la ceniza por los vientos. Por otro lado, hay casos que reflejan caídas de piroclastos rápidas y voluminosas. Por ejemplo, cerca de Pifo, existe una capa de cangahua de 1 m de espesor que es trazable lateralmente hasta que se transforma en un obvio flujo piroclástico, siendo así una ceniza co-ignimbrítica de depósito rápido.

Se considera que el papel del pajonal fue sumamente importante en la homogeneización de los materiales finos y en la obstaculización de los vientos, para que no se pudieran formar estructuras eólicas.

EDAD DE LA CANGAHUA

Desde mucho tiempo atrás, se ha reconocido la sección en la quebrada Chiche, entre Tumbaco y Pifo, como una de las mejores columnas estratigráficas para investigar la cangahua (Vera y López, 1986; Clapperton y Vera, 1986). Además, es la más representativa de todas las secciones de la Cangahua Superior en los valles de Tumbaco y Guayllabamba. La sección también proporciona una historia bastante completa sobre las últimas erupciones del Chacana, cuyos productos volcánicos se encuentran intercalados en la cangahua.

Estudios llevados a cabo en la cordillera Real, al Este de Píntag, Pifo y El Quinche durante los últimos 15 años, han elucidado la presencia del complejo volcánico Chacana (Hall y Beate, 1991), cuyas historia, petrografía, química y edad son cada vez más conocidas. Una serie de tesis de grado realizadas por egresados de la Escuela Politécnica Nacional (Pozo, 1982; Pérez, 1986; Carrasco, 1987; Changuón, 1986; Guerra, 1990; Acosta, 1985; López de Aldo, 1985), así como otros estudios realizados en el volcán Antisana (Hall y Beate, 1987; Hall y Mothes, 1994a, 1994b) han contribuido a un mejor conocimiento de este complejo. En la reconstrucción de su historia volcánica han sido claves las dataciones de ciertos eventos eruptivos publicadas por Barberi *et al.* (1988) y Bigazzi *et al.* (1992). La compilación de estos estudios independientes y aislados y la elaboración de una síntesis e interpretación global de los datos, permiten llegar a un buen enfoque de este edificio volcánico y su historia (Hall y Mothes, 1997).

Columna estratigráfica de la quebrada Chiche

En la figura 1 se presenta la columna estratigráfica de la Formación Cangahua Superior vista en la quebrada Chiche, cerca de Tumbaco y Pifo.

La Formación Cangahua Superior, tal como definida aquí, consiste en los 8-24 m de cangahua y tefras que sobreyacen a la Formación Chiche, un paquete de conglomerados, gravas y areniscas volcánicos de color negro a gris. En la Cangahua Superior, son los flujos piroclásticos Chalupas y Burrochupa, vistos en los valles de Latacunga, Los Chillos, y Tumbaco, los que sirven de capas gúia. Estos flujos no siempre están presentes, pero la caída de ceniza que los precedió también sirve como guía estratigráfica en muchas áreas. Aquí se ha confirmado que ciertas cangahuas no son más que la extensión lateral o distal (la ceniza co-ignimbrítica) de un flujo piroclástico, tales como el de Burrochupa o el del Grupo G (figura 1).

Existe una buena correlación estratigráfica, petrográfica y química entre los eventos volcánicos representados por capas primarias en la columna y los eventos

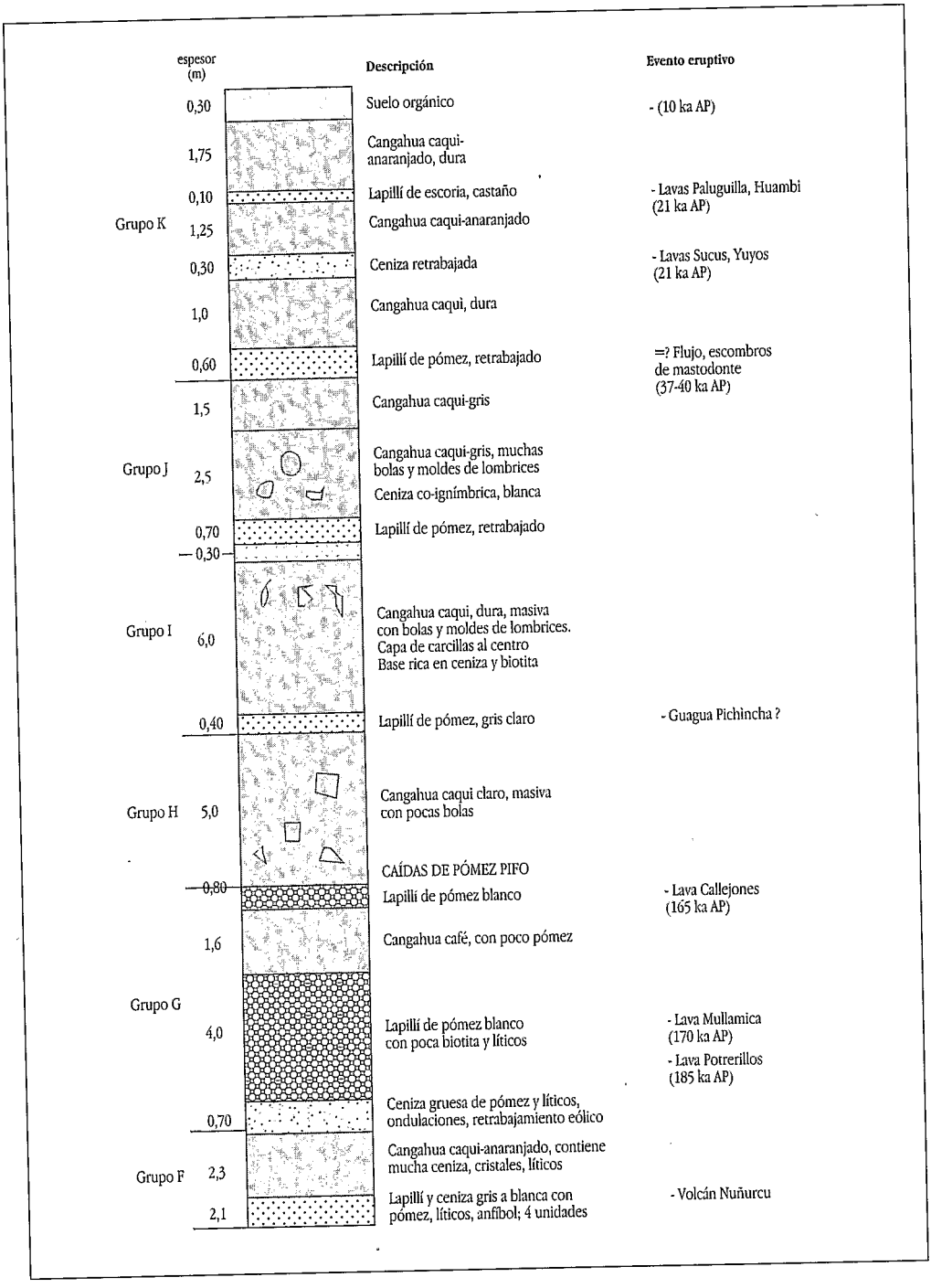


Figura 1 - Corte río Chiche (EMAAP-Q - UTM 925796)

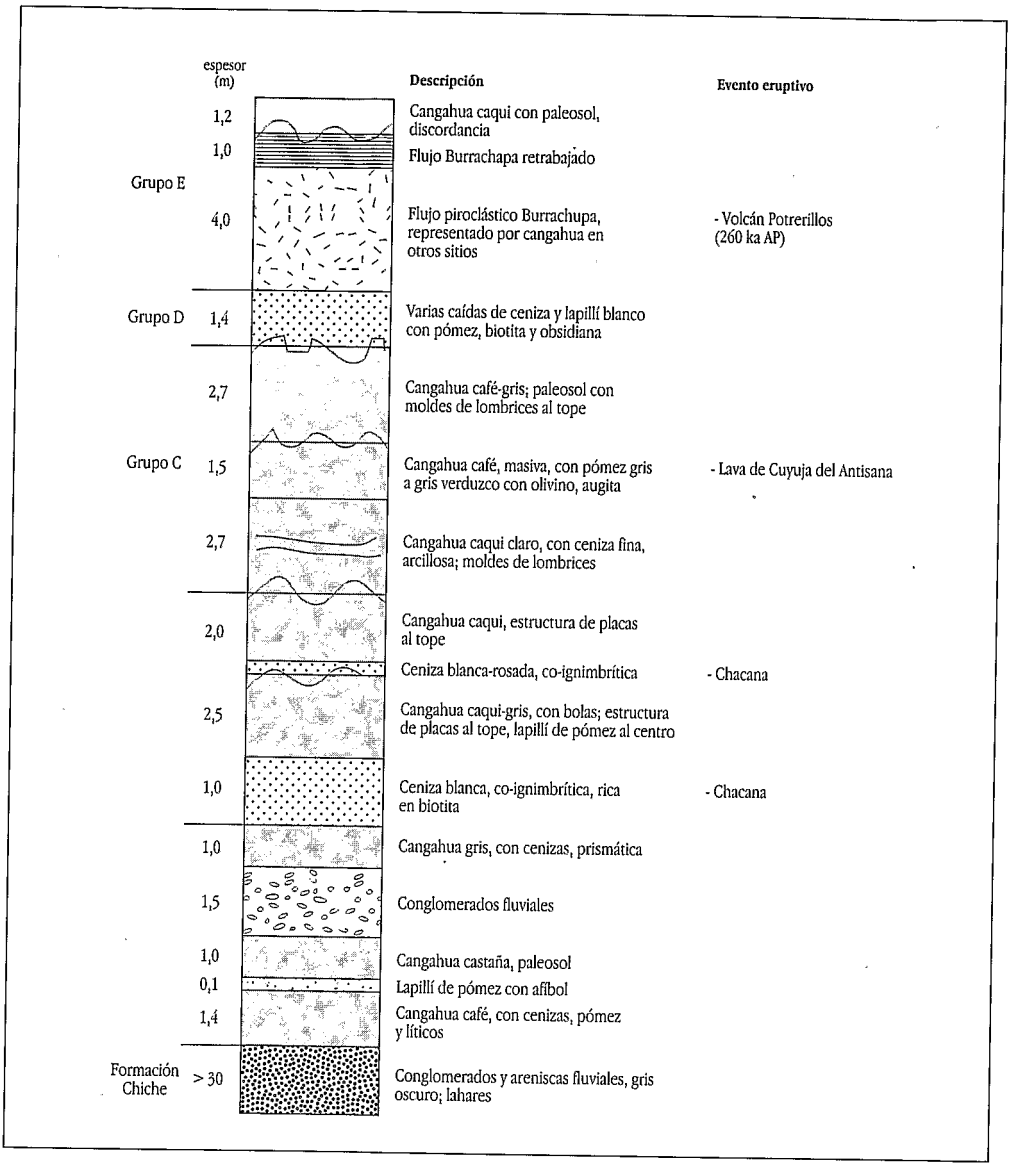


Figura 1 (continuación)

eruptivos reconocidos en la historia reciente del complejo Chacana. Así, la correlación sirve para comprobar que mucha de la cangahua de la zona debe su origen al volcanismo en dicho complejo cuyos eventos volcánicos principales han sido datados. A la vez esto nos permite estimar la edad y la tasa de formación de la cangahua.

Los detalles del estudio y la correlación aparecen en Hall y Mothes (en prep.); aquí se presentan solamente las conclusiones.

Edad y tasa de formación de la cangahua

En el complejo Chacana ocurrió una gran erupción cataclísmica que ha sido datada entre 0,81 y 0,98 Ma por el método K/Ar (Barberi *et al.*, 1988) y entre 0,75 y 0,85 Ma por el método de *fission track* (Bigazzi *et al.*, 1992). Sus voluminosos productos cubren los flancos del complejo y aparentemente subyacen tanto a la Formación Cangahua como a la Formación Chiche en la sección estratigráfica de Pifo. Por lo tanto, se concluye que la Formación Cangahua Superior es más joven que los 0,81 - 0,85 Ma, y probablemente menor que 0,5 Ma.

Dicha correlación ha permitido el desarrollo de una escala de tiempo para la Cangahua Superior en la zona de Quito. Cabe destacar que la secuencia de correlación estratigráfica y las dataciones son consistentes entre ellas, respaldando la interpretación aquí presentada. Se asignan edades de 0,23 - 0,26 Ma a las unidades Chalupas y Burrochupa respectivamente, y de 0,165 Ma al tope de las caídas de lapillí de pómez Pifo, así como otras edades dadas en la figura 1. Se observa claramente que la formación de la cangahua era un proceso continuo durante el Pleistoceno tardío, interrumpida breve y frecuentemente por caídas más potentes de lapillí y ceniza gruesa.

Basados en estas dataciones y los espesores de la cangahua, se estiman las tasas de formación de la cangahua para esta sección. No obstante, el lector prudente debe tomar estas tasas con cierta cautela, dado que llevan un cierto rango de error debido a que: a) El control cronológico es aún tentativo y deben realizarse nuevas dataciones para confirmar las aquí presentadas. 2) Una mayor acumulación de la cangahua era favorecida en valles o sitios de depósito eólico, en áreas cercanas al volcanismo activo o a zonas más afectadas por las glaciaciones (cordillera Real), lo que resultaría en tasas más rápidas. 3) Se espera que con una mayor antigüedad la cangahua sufriría mayor compactación, lo que resultaría en tasas de formación aparentemente más lentas. Sin embargo la presencia de bolas esféricas de cangahua en capas profundas, sin evidencia alguna de deformación, sugeriría que el factor de compactación no es muy importante. 4) Erupciones de gran magnitud, tales como las del complejo Chacana, podrían dejar, en poco tiempo, enormes volúmenes de tefra sobre la superficie, lo que incidiría en las tasas. 5) La presencia de discordancias erosionales indicaría una reducción en el espesor de las capas de cangahua, proporcionando tasas más lentas.

La tasa de formación más confiable para la cangahua es la dada por la secuencia entre las caídas de Pifo y el tope de la Formación Cangahua Superior como se ve en la sección del Chiche (figura 1), pues no está afectada por discordancias. Las tasas varían de 8.200 a 9.200 años/m. Por otro lado se calculan tasas equivalentes a 5.300 años/m cerca de Riobamba, 4.400 años/m cerca del Quilotoa, 2.400 a 3.400 años/m cerca de Lloa y 5.500 años/m cerca de Píntag (Hall y Mothes, en prep.). La variación de las tasas se atribuye en gran parte a la mayor intensidad de volcanismo en los centros volcánicos cercanos, siendo buenos ejemplos los volcanes Pichincha y Quilotoa. Donde existen discordancias reconocidas, se dan tasas falsas que son aún más lentas.

En promedio, la cangahua formada durante los últimos 35.000 años tiene una tasa de entre 4.500 y 6.000 años/m. La Cangahua Superior, hasta los 230 mil años de edad, tiene tasas de acumulación aparentes más lentas que varían entre 9.000 y 15.000 años/m, seguramente debido en gran medida a la discordancia bien reconocida al tope del flujo piroclástico Burrochupa.

En el valle de Tumbaco. la cangahua debe su origen tanto a cenizas caídas desde nubes eruptivas asociadas a erupciones en la región, como a polvo rocoso (*loess*) generado

por la erosión glacial en la cordillera Real y llevado al valle por los vientos. La dirección del viento en la región es hoy en día, y probablemente lo fue durante el Pleistoceno, del SE hacia el W o NW, lo que favorece el depósito de partículas en los valles de Tumbaco y Los Chillos desde una fuente en la zona del Chacana.

Por esto, es lógico pensar que a lo largo del callejón interandino, mucha de la cangahua, reciente o antigua, está relacionada con el volcanismo, tanto en los centros riolíticos tales como Chacana, Chalupas, Chalpatán, Soche y otros de la cordillera Real, como en los centros dacíticos de la cordillera Occidental. Además, se espera encontrar mayores espesores de cangahua cerca de aquellas zonas altas que sufrieron una mayor glaciación en el Pleistoceno tardío, tal como las de Chacana, de los Llanganates, del Altar, del Chimborazo, entre otras.

Referencias bibliográficas

ACOSTA, M., 1985: *Estudio geológico estructural para el proyecto geotérmico Valle de los Chillos, provincia de Pichincha*, Tesis de grado inédita, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 240 p.

ALLEY, R.; MAYEWSKI, P. *et al.*, 1996: Twin Ice Cores from Greenland Reveal History of Climate Change, in *EOS*, Vol. 77, N° 22, May 28.

BAER, E. M., 1991: *The Cataclysmic Pifo Eruptions in Northern Ecuador*, Tesis de bachillerato inédita, Carlton College, Minn., USA, 82 p.

BARBERI, F.; COTELLI, M. *et al.*, 1988: Plio-Quaternary Volcanism in Ecuador, in *Geology Magazine*, Vol. 125 (1), p. 1-14.

BIGAZZI, G.; COLTELLI, M. *et al.*, 1992: Obsidian-bearing Flows and pre-Colombian Artifacts from the Ecuadorian Andes: First New Multidisciplinary Data, in *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 6, N° 1/2, p. 21-32.

CARRASCO, A.E., 1987: *Estudio geológico del área Tolontag-Quiscatola: Píntag, provincia de Pichincha*, Tesis de grado inédita, Escuela Politécnica Nacional, Quito.

CHANGUÓN, L., 1986: *Estudio hidrológico-geoquímico de las aguas subterráneas aflorantes en el valle de Los Chillos y el Flanco W de la cordillera Real, provincia de Pichincha*, Tesis de grado inédita, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 168 p.

CLAPPERTON, C. M., 1987: Glacial Geomorphology, Quaternary Glacial Sequence and Palaeoclimatic Inferences in the Ecuadorian Andes, in *International Geomorphology 1986*, Part II, p. 843-870.

CLAPPERTON, C. M., 1993: *Quaternary Geology and Geomorphology of South America*, Elsevier, Amsterdam, 779 p.

CLAPPERTON, C. M.; VERA, R., 1986: The Quaternary Glacial Sequence in Ecuador: a Reinterpretation of the Work of Walter Sauer, in *Journal of Quaternary Science*, Vol. 1, (1) p. 45-56.

GEOTÉRMICA ITALIANA SRL., 1989: *Peligrosidad volcánica del Guagua Pichincha*, Informe final (inédito), Pisa y Quito, 101 p.

GUERRA, R. 1990: *Estudio geológico de la zona sur del proyecto geotérmico valle de Los Chillos*, Tesis de grado inédita, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 136 p.

HALL, M.; BEATE, B., 1987: *Evaluación de los peligros potenciales de erupciones futuras en la zona del volcán Antisana, Ecuador*, Informe final inédito, Proyecto Micacocha-EMAP-Q, Quito, 81 p.

HALL, M.L.; BEATE, B., 1991: El volcanismo plio-cuaternario en los Andes del Ecuador, en *Estudios de Geografía*, N° 4: «El paisaje volcánico de la Sierra ecuatoriana», Colegio de Geógrafos del Ecuador, Quito, p. 5 à 17.

HALL, M.; MOTHES, P., 1994a: Tefroestratigrafía holocénica de los volcanes principales del valle interandino, Ecuador, en *Estudios de Geografía*, Vol. 6: «El contexto geológico del espacio físico ecuatoriano», Quito, p. 47-67.

HALL, M.; MOTHES, P., 1994b: *Evaluación de los peligros volcánicos potenciales asociados con el proyecto Quijos*, Informe final inédito, Convenio EPN-Empresa Eléctrica Quito, Quito, 73 p.

HALL, M.; MOTHES, P., 1997: *El complejo volcánico Chacana*, IAVCEI, Mexico.

López de Alda, F., 1985: *Geología del Cuaternario entre el flanco este del volcán Ilaló y el sector del Tablón*, Tesis de grado inédita, Escuela Politécnica Nacional, Quito.

MacLellan, A., 1995: *Characteristics of Volcanic Tuff Deposits from the Cangahua Formation, Northern Ecuador*, Tesis de bachillerato inédita, Universidad de Aberdeen, Escocia.

Maldonado, F., 1973: *Estudio de una secuencia topo-climática en suelos volcánicos del Ecuador*, Tesis Ph.D, Universidad de Rijks, Ghent, Bélgica.

Pérez, V. H., 1986: *Estudio geológico-vulcanológico de la parte SSE del proyecto geotérmico Valle de Los Chillos*, Tesis de grado inédita, Escuela Politécnica Nacional, Quito.

Pozo, M.J., 1982: *Geología del valle Carihuaycu y alrededores, al Sureste de Pifo, provincia de Pichincha*, Tesis de grado inédita, Escuela Politécnica Nacional, Quito.

Sauer, W., 1965: *Geología del Ecuador*, Editorial Ministerio de Educación, Quito, 383 p.

Sparks, R.S.; Walker, G.P., 1977: The Significance of Vitric-Enriched Air-fall Ashes Associated with Crystal-Enriched Ignimbrites, in *J. Volcan. Geothermal. Res.*, Vol. 2, p. 329-341.

Van der Hammen, T.; Absy, M., 1994: Amazonía During the Last Glacial, in *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Vol. 109, p. 247-261.

Vera, R.; López, R., 1986: El origen de la cangahua, en *Paisajes geográficos*, N° 16, Quito, p. 21-28.

Winckell, A.; Zebrowski, C., 1992: La cangahua en Équateur : le contexte paléogéographique de sa formation, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 107-112.

Zebrowski, C. 1992: Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 15-23.

Caractérisation et formation de la *cangahua* en Équateur

Analyse préliminaire (chimie, minéralogie, pétrographie) de quelques types de *cangahua*

Paul QUANTIN, Claude ZEBROWSKI

Abstract

This study concerns the indurated horizons of some volcanic ash soils in the Interandine Valley of the Ecuador. These indurated horizons were cropped out by erosion on the piedmont of the sierras, under a subarid to subhumid climate, and then they have been called cangahua. *The soils whitin they are intercalated are composed of several various pyroclastic deposits. The soil profiles show one, two or several indurated horizons. The present observations concern a soil climo-toposequence near Bolívar, viz : downward a soil profile with 2* cangahua *horizons; at the midslope a profile with only one horizon of weathered tuff; a little above, another soil with a weakly weathered consolidated ash fall layer; and finally, at the summit on the* páramo, *an andosol profile with two horizons of weathered tuff; as well as three* cangahua *samples from other parts of Ecuador, but located downward of the piedmont. The aim of this study is to compare the properties of these various indurated soil materials. We will show hereafter the first data about some chemical, mineralogical and microscopic features of these soils and especially their indurated horizons.*

We determined the composition in major elements of the fine earth and of the less than 2 µm fraction, at first from a «triacid» extract which dissolved mainly the weathering products, and further on the residue of unweathered volcanic glasses and minerals. This later one can give us good information on the parent pyroclastic material, which is varying from an alkaline trachyte to a dacite and a rhyodacite within the same soil profile or from a site to another one. The chemical composition of the weathering product varies according to the rainfall regime and its progressive increase from down to upward (climotoposequence). The molar silica/alumina ratio of this product is decreasing from the values 5-4 downward, to 3 at mid-slope, and 2-1.5 upward. Indeed the silica content decreases according to the increase in rainfall intensity. This fact is also parallelly enligthened by the clay mineral composition, made downward of smectites and badly crystallized 2:1 clays, then at mid-slope of 1 nm halloysite, and upward only of allophane. Downward of the piedmont the outcropping cangahua is made of silica-rich 2:1 clay minerals; it doesn't contain any allophane but often a little of calcite and probably of opal. However, as well as upward as downward, all soils and indurated horizons keep a high amount of almost unweathered volcanic glasses and minerals.

The optical microscopy showed that the indurated horizons keep the original massive fabric of tuff or consolidated ash fall in their matrix. But this original shape is more or less brocken or cracked into polyhedral fragments, as well as it is modified by the

glass weathering into a clay plasma and some pedofeatures like biological cavities, clay coatings, ferruginous pseudonodules, calcite infillings, but no opal coatings were clearly observed. Downward the toposequence, the upper layer of cangahua *shows a strong evidence of pedofeatures like a high density of cracks and biofeatures as well as frequent calcite infilling and superficial laminar calcite crusts, but rather few clay coatings and ferruginous nodules. At the midslope in the weathered tuffs the clay coatings and ferruginous nodules are more abundant, but the cracking of the matrix is less developed. Upward near the top of the toposequence, the weathered tuff is none or little cracked, does not show clay coatings and only presents scarce ferruginous nodules.*

The ^{14}C dating of lime crust in the upper cangahua *layer is at least 14,000 BP; then the parent tuff was probably deposited between 15,000 and 20,000 years ago. This lime crust testify a more arid period about between 15,000 and 13,000 BP than during the former tuff weathering or the present soil formation.*

Keywords: Cangahua - *Ecuador - Chemistry - Mineralogy - Petrography - Genesis*

INTRODUCTION

Le mot quechua *cangahua* dans les pays andins d'Amérique du Sud signifie « terre dure et stérile » (Custode *et al.*, 1992). Il s'agit de couches dures qui apparaissent souvent à la surface des terres cultivées, après érosion du sol superficiel. Ce nom est largement utilisé depuis la Colombie jusqu'au Chili, et particulièrement en Équateur. Il désigne une large variété de matériaux fins, consolidés ou cimentés : sédiments, grès, tufs pyroclastiques, sols de cendres volcaniques indurés.

En Équateur, les affleurements de *cangahua* sont observés dans les formations volcaniques pyroclastiques du Quaternaire récent de la vallée interandine, entre les deux *Sierras* orientale et occidentale. Ils s'étendent depuis la Colombie au nord jusqu'à la région de Chunchi au sud (Zebrowski, 1996). La *cangahua* affleure surtout sur les piémonts des *Sierras* et des appareils volcaniques, entre 2 200 et 3 200 m d'altitude, en climat tempéré subaride et subhumide. Cette relation topo-climatique a amené certains pédologues à l'idée d'horizons indurés de sols volcaniques. Mais Vera et López (1992) ont reconnu et classé cinq types de formation de *cangahua*, à savoir : de retombée de cendre volcanique consolidée (tuf), de coulée boueuse (lahar), de coulée pyroclastique (tuf), « pédogénique » (sol induré de cendre volcanique), « mixte colluvial » (sédiment consolidé de cendres et sols).

En réalité sur le terrain il est souvent difficile de distinguer un tuf volcanique altéré (horizon C), à la base ou dans un profil de sol, d'un horizon de sol induré, du seul fait de la pédogenèse (horizon Bm ou Cm). Les formations volcaniques et volcano-sédimentaires sont complexes, étant constituées de dépôts (voire séries de dépôts) successifs sur lesquels alternativement s'est appliquée la pédogenèse. Il y a généralement au moins deux, sinon plusieurs, horizons indurés de matériau et d'âge différents. En outre les conditions de climat et de pédogenèse ont varié d'un dépôt à l'autre et d'un lieu à l'autre.

En Équateur tous les auteurs s'accordent sur la formation de la *cangahua* à partir d'un matériau volcanique pyroclastique fin (Vera et López, 1992; Hall et Beate; 1991; Custode *et al.*, 1992; Winckell et Zebrowski, 1992). Ils observent qu'il s'agit de dépôts

du Quaternaire récent. Cependant les *cangahuas* affleurantes ou sub-affleurantes ne se sont développées que sur des formations antérieures à l'Holocène : de 11 000 à plus de 49 000 BP (Vera et López, 1992; Winckell et Zebrowski; 1992). Elles sont recouvertes par les cendres récentes (holocènes) mais se sont déposées puis altérées en climat différent de l'actuel. C'est pourquoi certains auteurs pensent qu'une période antérieure plus aride aurait favorisé la cimentation des cendres altérées par de la silice et/ou du calcaire (Winckell et Zebrowski, 1992; Hall, 1995) ; mais cela n'a pas été démontré. En revanche, l'altération des cendres ou tufs volcaniques augmente suivant un gradient topo-climatique altitudinal vers l'amont des versants, tandis que l'induration s'accroît vers l'aval, où en bas des piémonts la *cangahua* est généralement recouverte d'une croûte calcaire, voire fortement imprégnée de calcite. S'agit-il d'un processus contemporain ou postérieur à la pédogenèse initiale ?

L'accumulation de silice dans la *cangahua*, souvent invoquée comme ciment, n'a pas encore été clairement démontrée. L'impact d'une accumulation d'argile n'a pas non plus été bien élucidé jusqu'à maintenant.

C'est pourquoi nous avons repris quelques observations de sols à *cangahua* d'une climo-toposéquence près de Bolívar (Carchi) au nord de l'Équateur, ainsi que quelques échantillons de *cangahua* d'autres régions. Le but de cette étude est de préciser leur caractérisation, espérant ainsi apporter une contribution nouvelle quant à leur formation. Nous ne présenterons que les premiers résultats d'analyse chimique élémentaire, de minéralogie et de pétrographie, d'autres observations et analyses étant en cours.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les échantillons de *cangahua* étudiés

Dans un premier temps nous avons observé une toposéquence de sols à *cangahua* dans la province de Carchi au nord de l'Équateur sur le versant de la *Sierra* occidentale suivant le transect Bolívar - El Ángel - Páramo de El Ángel entre 2 600 et 3 500 m d'altitude. Nous avons d'abord prélevé le profil QZI, en aval du piémont (altitude : 2 600 m), qui présente les horizons les plus caractéristiques de *cangahua*, puis un peu en amont (altitude : 2 820 m) seulement 3 échantillons du profil QZII, dont un de tuf altéré équivalent supposé de la première *cangahua* du profil aval, puis encore plus en amont (altitude : 3 150 m), un horizon de cinérite consolidée du profil QZIII, supposé équivalent de la première formation à *cangahua*, mais recouvert par un andosol.

Profil	Échantillon (figure 1)	Horizon
QZI		
QZII	1	2Btg columnaire
	2	3Ctg tacheté
	3	3Ctx tuf brun-*cangahua*, non calcaire, altéré
QZIII	1	2Cx cinérite brune consolidée et altérée

Nous avons en outre prélevé et étudié un profil d'andosol du *páramo* appelé PAR, comportant deux horizons de tuf peu altéré, dans la région nord, mais sur le versant de la *Sierra* orientale, à Pimampiro (Ibarra) vers 3 700 m d'altitude.

PAR	1	A	Andosol noir
	2	2 C/R	tuf gris altéré, tacheté
	3	3 C	tuf brun altéré, tacheté

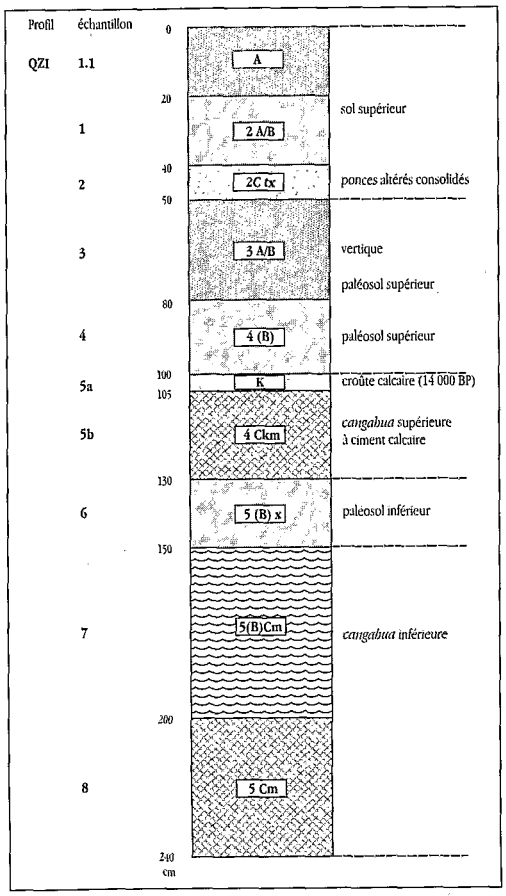


Figure 1
Profil schématique de sol à *cangahua* (QZ1) du bas piémont, Bolívar

Enfin, nous avons étudié trois échantillons de *cangahua*, d'autres régions, à savoir :

CAN : *cangahua* superficielle, revêtue de calcaire, près du village Cangahua sur le piémont du Cayambe (altitude : 2 800 m) horizon 2 C km ;

AMB : *cangahua*, non calcaire, près d'Ambatillo (Ambato), mi-versant (altitude : 3 300 m) du piémont du Chimborazo horizon 2 Cm ;

LIC : *cangahua* superficielle revêtue de calcaire, près du village de Licto (Riobamba), horizon 2 Ckm.

Nous avons également étudié un échantillon de boule de cinérite accrétionnée, appelé CIN, qui accompagne localement la formation de tuf du village de Cangahua. Cela peut être un indice de formation « phréatomagmatique » du tuf à l'origine de la *cangahua* (à ne pas confondre avec les nids fossiles de scarabée dans certains sols de cendre volcanique).

Les méthodes d'analyses appliquées

Composition chimique élémentaire (éléments majeurs), sur la fraction extraite par le réactif « triacide » qui correspond essentiellement aux produits d'altération, puis sur le résidu des minéraux inaltérés les plus stables

La composition du résidu de matériaux volcaniques peu altérés reflète assez bien celle du matériau originel et permet de déterminer le type de roche volcanique par un simple calcul (Rittmann, 1963).

Composition minéralogique, par diffraction de rayons X

L'analyse a été appliquée d'abord sur une poudre du matériau global pour déterminer l'ensemble des minéraux primaires et argileux. Puis, sur un extrait de la fraction argileuse, nous avons déterminé les minéraux secondaires, par comparaison de traitements : en poudre, orienté, chauffé à 100 °C, puis à 300 °C et 500 °C, ou glycérolé, suivant la composition des minéraux argileux.

Observation pétrographique en microscopie optique sur lame mince

Nous avons observé et déterminé la composition du squelette minéral, de la matrice, ainsi que l'organisation structurale, les traits pédologiques et biologiques.

Analyse sélective de minéraux non cristallins

Des extraits par l'oxalate d'ammonium (pH3 - obscurité) de Al, Fe et Si ont été faits pour déterminer l'allophane sur 3 échantillons de la séquence de Bolívar et 3 échantillons

du sol du *páramo*. Un extrait de Al, Fe et Si par le pyrophosphate de sodium a été fait sur l'andosol du *páramo*.

Les phases de silice et d'alumine rapidement solubles ont été également extraites par la soude 0,5 N à 20 et à 50° (méthodologie dans Hidalgo *et al.*, 1995)

Datation de la cangahua

Deux dosages de ^{14}C ont été faits (M. Fournier, ORSTOM) sur deux *cangahuas* encroûtées de calcaire, près de Bolívar.

RÉSULTATS

Composition chimique élémentaire

COMPOSITION CHIMIQUE ET TYPE DE MATÉRIAU VOLCANIQUE ORIGINEL (tableau 1)

Il s'agit de la composition du résidu de la dissolution sélective par le réactif « triacide », à savoir les silicates primaires inaltérés (phénocristaux, microlithes et verres). Cette composition peut être apparentée à un type de matériau volcanique ; elle permet de faire une hypothèse sur la nature du matériau originel et d'observer les variations de ce matériau dans un profil de sol volcanique complexe.

Echant. n°	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	MnO_2	P_2O_5	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Ki	R
QZI 1	67,82	16,71	1,85	0,20	0,05	0,02	5,47	1,46	1,23	5,23	6,90	D
QZI 2	68,82	16,28	1,74	0,16	0,04	0,02	4,80	1,53	1,60	5,01	7,19	D
QZI 3	63,88	18,05	1,33	0,12	0,04	0,03	4,88	1,18	2,22	8,28	6,02	T
QZI 4	70,00	15,56	1,48	0,13	0,05	0,03	4,44	1,48	1,94	4,35	7,65	RD
QZI 5b	74,19	14,62	1,72	0,13	0,05	0,04	4,30	1,50	1,29	2,37	8,23	RD
QZI 6	69,15	15,86	1,96	0,19	0,06	0,04	4,71	1,65	1,65	4,71	7,41	D
QZI 7	69,30	16,02	1,91	0,18	0,06	0,03	4,59	1,41	1,69	4,80	7,35	D
QZI 8	68,34	16,52	1,67	0,15	0,04	0,02	4,80	1,46	1,89	5,09	7,03	D
QZII 1	73,32	14,23	1,16	0,09	0,04	0,02	3,71	1,00	2,01	4,49	8,76	RD
QZII 2	67,51	17,00	1,60	0,13	0,04	0,03	5,39	1,43	1,52	5,30	6,75	D
QZII 3	67,81	16,75	1,54	0,19	0,04	0,01	4,24	1,39	2,56	5,49	6,88	D
QZIII 1	60,98	19,88	1,46	0,20	0,05	0,02	5,49	1,22	4,63	5,98	5,21	L
PAR 1	71,53	15,00	2,38	0,26	0,02	0,03	3,71	1,94	1,76	3,35	8,56	RD
PAR 2	73,54	15,12	1,72	0,22	0,02	0,01	3,18	0,93	2,45	2,78	8,27	RD
PAR 3	70,91	16,01	2,01	0,19	0,02	0,02	3,55	1,53	1,92	3,83	7,53	RD
CAN	63,87	18,33	2,62	0,28	0,06	-	7,00	1,92	1,67	4,25	5,92	D
CIN	66,56	18,05	2,46	0,22	0,03	0,05	5,34	1,78	1,44	4,07	6,27	D
AMB	64,96	17,31	3,57	0,41	0,09	-	6,39	1,70	1,76	3,80	6,38	D
LIC	67,02	16,90	2,78	0,28	0,03	0,10	5,47	2,12	1,63	3,67	6,74	D

R : Type de matériau ; D : Dacite ; T : Trachyte alcalin ; RD : Rhyodacite ;; L : Latite

Tableau 1 - Composition chimique élémentaire du « résidu-triacide », normalisée à 100 %, sur la fraction inférieure à 2 mm

Séquence de Bolívar

- **Profil QZI** : On distingue au moins quatre séries de matériaux qui correspondent probablement à quatre séries d'émissions pyroclastiques :

(1) horizons 1 et 2, dont la composition moyenne (68,3 % SiO_2 - 16,5 % Al_2O_3 - 1,8 % Fe_2O_3 - 5,1 % CaO - 1,5 % MgO - 1,4 % K_2O et 5,1 % Na_2O) est de type « dacite claire » ;
(2) horizon 3, dont la composition est de type « trachyte alcalin sodique » ;
(3) horizons 4 et 5, dont les compositions sont de type « rhyodacite » ;
(4) horizons 6, 7 et 8, dont les compositions sont à nouveau de type « dacite claire ».

Tous ces matériaux sont calco-alcalins et presque tous particulièrement riches en sodium. Les deux *cangahuas* proviennent de deux émissions pyroclastiques bien différentes ; la première et la plus récente (horizon 5b) de rhyodacite, la seconde (horizons 7 et 8) de dacite claire. La première est plus siliceuse (74,2 % SiO_2) et moins alcaline (1,3 % K_2O et 2,4 % Na_2O) ; la seconde est moins siliceuse (68,3 % SiO_2) et plus alcaline (1,9 % K_2O et 5,1 % Na_2O).

- **Profil QZII** : les trois horizons analysés du paléosol semblent provenir de deux matériaux pyroclastiques différents, successivement dans l'échantillon 1 de type « rhyodacite » (à 73 % SiO_2), dans les échantillons 2 et 3 de type « dacite claire » (à 68 % SiO_2). Le dernier est celui de tuf altéré. Sa composition l'apparente à la deuxième *cangahua* du profil QZI (horizon. 8) ; les deux pourraient provenir de la même émission pyroclastique.

- **Profil QZIII** : Le seul horizon analysé, d'un paléosol de cinérite consolidée, friable, a une composition particulière de « latite claire ». Celle-ci est proche de l'horizon 3 du profil QZI, donc bien différente de celle des horizons de *cangahua* ou de tuf des profils QZI et QZII.

Profil du páramo

Les trois horizons successifs de l'andosol et des deux tufs, pourtant bien différenciés par leur morphologie et leur degré d'altération, ont une composition très semblable de type rhyodacite. Dans ce cas les trois émissions pyroclastiques successives ne peuvent pas être distinguées par leur composition. Vu l'éloignement de Bolívar, un apparentement du matériau originel des deux tufs du *páramo* et de la première *cangahua* de Bolívar est peu probable.

Cangahuas *(CAN, AMB, LIC) et cinérite accrétionnée (CIN) du site Cangahua*

Bien que les *cangahuas* ne proviennent probablement pas de la même émission, leur composition est assez voisine et de type « dacite claire ».

Composition chimique du produit d'altération

Il s'agit de l'extrait triacide du sol global (< 2 mm) – tableau 2. Nous avons aussi fait des extraits sur la fraction argileuse (< 2 µm) – tableau 3 – qui a servi pour l'analyse minéralogique des argiles. En fait, dans nos échantillons la composition des extraits sur sol global et sur la fraction argileuse est semblable ou peu différente. On note que la fraction argileuse comporte aussi un résidu important (4 à 23 %) de minéraux primaires très siliceux (quartz, cristobalite et feldspaths).

Dans l'ensemble des sols à *cangahua*, horizons meubles et indurés, le fort résidu insoluble (34 à 75 %) de l'extraction triacide indique une altération partielle du matériau pyroclastique originel, quelle que soit la position altitudinale et le régime plus ou moins humide du climat actuel, ou la position stratigraphique et l'âge du matériau. C'est le rapport

SiO_2/Al_2O_3 mol. (Ki) qui est le plus significatif du type et du degré d'altération, car il varie suivant les conditions pédoclimatiques et la durée d'altération. Il diminue de bas en haut de séquence et est élevé dans les échantillons de *cangahua*.

Echantillon n°	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	MnO_2	P_2O_5	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Ki	Kr	Taux[1] résidu	Taux[2] extrait
QZI 1	54,79	22,19	13,87	1,73	0,23	0,21	2,67	2,29	0,97	1,04	4,18	2,98	64,95	28,84
QZI 2	54,84	21,86	13,34	1,67	0,57	0,21	2,63	2,37	1,11	1,41	4,25	3,05	68,80	26,99
QZI 3	56,00	28,44	10,33	0,82	0,12	0,08	1,44	1,52	0,77	0,47	3,34	2,70	33,80	57,14
QZI 4	57,26	23,65	11,20	1,24	0,24	0,14	2,41	2,04	0,82	1,00	4,10	3,14	54,00	40,17
QZI 5b	25,11	7,26	4,03	0,42	0,02	0,15	59,30*	2,82	0,40	0,50	5,86	4,32	23,25	49,59*
QZI 6	59,41	18,86	12,26	1,23	0,31	0,14	2,96	2,36	0,94	1,54	5,34	3,76	63,70	31,81
QZI 7	58,03	17,70	13,18	1,46	0,23	0,26	3,34	2,71	1,06	2,05	5,55	3,76	70,85	25,42
QZI 8	58,80	19,70	12,77	1,71	0,24	0,15	2,12	2,48	1,17	1,64	4,99	3,52	68,70	27,41
QZII 1	55,23	26,05	12,16	1,98	0,09	0,14	2,54	1,88	0,63	1,04	3,59	2,76	64,65	28,79
QZII 2	50,18	28,27	14,70	1,75	0,27	0,12	1,53	1,84	0,62	0,71	3,01	2,25	59,40	35,37
QZII 3	47,62	24,54	16,90	2,18	0,23	0,13	1,34	3,64	1,96	1,45	3,29	1,85	68,35	27,51
QZIII 1	43,11	39,48	11,31	1,58	0,14	0,51	1,24	1,47	0,51	0,64	1,85	1,56	41,00	46,86
PAR 1	36,18	38,43	16,85	2,34	0,08	0,76	0,99	2,11	0,49	1,75	1,59	1,24	56,55	22,25
PAR 2	39,35	30,18	15,68	2,48	0,12	0,69	0,71	3,79	2,01	4,97	2,21	1,66	75,40	16,90
PAR 3	48,72	33,45	11,32	1,87	0,08	0,45	0,95	2,05	0,29	0,82	2,47	2,03	52,15	37,97
CAN	49,29	18,29	16,86	1,77	0,30	0,51	5,71*	4,86	0,86	1,57	4,57	2,87	60,00	35,00*
CIN	50,77	20,67	17,44	1,97	0,30	0,32	4,72	1,94	0,56	1,29	4,16	2,70	59,00	35,55
AMB	43,35	16,26	11,65	1,25	0,19	0,19	16,26*	7,86	1,38	1,63	4,52	3,10	54,00	36,91*
LIC	54,80	18,07	12,65	1,66	0,20	0,28	5,00*	4,70	0,90	1,63	5,14	3,54	61,25	33,21*
QZ1 5b**	59,88	17,32	9,62	1,01	0,04	0,35	2,69	6,73	0,96	1,20	4,16			
AMB**	49,20	18,45	13,22	1,41	0,22	0,23	4,92	8,92	1,57	1,84	4,52			
CAN**	49,78	18,47	17,03	1,79	0,30	0,52	4,16	5,48	0,86	1,59	5,14			

1 : taux de résidu en % de sol sec à 105 °C
2 : taux de produit dissous en % de sol sec à 105 °C
Ki = SiO_2/Al_2O_3 mol ; Kr = $SiO_2/Al_2O_3 + Fe_2O_3$

* : présence de $CaCO_3$: QZI 5b = 51,5 % ; AMB = 7,9 % ; CAN = 1 % ; QZ7 et LIC < 1 %
** : après déduction du calcaire

Tableau 2 - Composition chimique élémentaire de l' « extrait-triacide », normalisée à 100 %

échantillon	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	MnO_2	P_2O_5	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Ki	Kr	Taux extrait*
QZI 1	59,78	22,83	12,23	1,22	0,05	0,09	1,22	1,43	0,83	0,33	4,44	3,30	73,60
QZI 3	56,22	28,49	10,60	1,09	0,03	0,03	0,95	1,66	0,68	0,24	3,34	2,70	78,26
QZI 4	61,92	21,57	10,27	1,09	0,06	0,13	1,57	2,31	0,63	0,45	4,86	3,72	73,48
QZI 6	59,80	18,72	11,20	1,00	0,07	0,03	1,11	2,31	0,71	0,51	5,42	3,91	71,86
QZI 8	64,45	19,28	10,52	1,16	0,07	0,03	1,08	2,24	0,69	0,50	5,66	4,19	74,17
QZII 1	55,44	26,85	11,76	1,67	0,04	0,13	1,72	1,59	0,41	0,40	3,50	2,73	62,95
QZII 2	56,87	30,42	10,72	1,41	0,06	0,11	0,83	1,62	0,50	0,47	3,00	2,45	74,62
QZII 3	51,30	29,27	11,98	1,18	0,12	0,14	1,49	2,83	1,29	0,39	2,97	2,35	75,15
QZIII 1	43,42	42,26	8,23	1,13	0,05	0,73	2,79	0,82	0,20	0,37	1,74	1,56	73,47

* : taux de produit dissous en % de sol sec à 105 °C (y compris H_2O^+)
Ki = SiO_2/Al_2O_3 mol ; Kr = $SiO_2/Al_2O_3 + Fe_2O_3$ mol

Tableau 3 - Composition chimique élémentaire de l' « extrait-triacide », normalisée à 100 %, sur la fraction inférieure à 2 µ

Séquence de Bolívar

Dans le profil QZI, le rapport Ki (SiO_2/Al_2O_3 mol) du produit extrait du matériau global et de la fraction argileuse est respectivement de 4,2 et 4,4 dans le sol actuel, 3,0 et 3,3 dans le premier paléosol, 4,0 et 4,9 dans le deuxième paléosol, 5,9 dans la première *cangahua* (qui bien qu'encroûtée de calcaire paraît un peu plus siliceuse que le sol sus-jacent), 5,3 et 5,4 dans le troisième paléosol, 5,5 à 5,0 et 5,7 dans la deuxième *cangahua*, qui ne semble pas significativement plus siliceuse que le sol sus-jacent. On remarque que l'extrait de la fraction argileuse est légèrement plus siliceux que celui de sol total, peut-être parce que l'argile contient un peu de silice non cristalline.

Dans le profil QZII, le taux de résidu inaltéré est un peu plus élevé dans le tuf (68,35) que dans le sol au-dessus (59,4)qui dérive probablement de la même émission pyroclastique. Le tuf est un peu moins altéré que le sol ; son degré d'altération est proche de la deuxième *cangahua* du profil QZI.

Cependant, les produits d'altération du profil QZII sont nettement plus désilicifiés que ceux du profil QZI : le rapport Ki de l'extrait du sol global et de la fraction argileuse est respectivement de 3,6 et 3,5 dans l'horizon 1, 3,0 et 3,0 dans l'horizon 2, 3,3 et 3,0 dans l'horizon de tuf. Le premier paléosol est un peu moins altéré et désilicifié que le second. Dans celui-ci il n'y a pas de différence dans l'argile d'altération du sol et du tuf altéré sous-jacent. Ce qui distingue donc les produits argileux d'altération des deux *cangahuas* du profil aval et du tuf dans le profil amont, c'est surtout la proportion de silice, plus élevée à l'aval, et inversement celle d'alumine, plus élevée à l'amont. En outre, il y a une certaine accumulation de calcaire à l'aval, tout particulièrement dans le deuxième paléosol et la première *cangahua*. On remarque que la composition de l'extrait argileux est très proche de l'extrait du sol global dans le profil QZII ; la présence de silice non cristalline y est moins probable que dans le profil QZI.

Dans le profil QZIII, proche du *páramo*, l'horizon de cinérite du paléosol n'est encore que partiellement altéré : son taux de résidu inaltéré est de 41 %, mais le rapport Ki dans l'extrait du sol global et dans la fraction argileuse est respectivement de 1,85 et 1,74. Le produit argileux d'altération est donc plus fortement désilicifié à la partie supérieure de la séquence en condition climatique très humide. C'est sans doute la cause de la friabilité de cette formation et de l'absence de formation indurée de type *cangahua* à l'amont de la séquence (Winckell *et al.*, 1993).

Profil du páramo *(PAR)*

Le taux de résidu inaltéré dans l'extrait de sol global est successivement dans l'andosol, le premier tuf et le deuxième : 57, 75 et 52 %. L'altération n'est donc encore que partielle. Le rapport Ki de l'extrait du produit d'altération va croissant du sol au deuxième tuf, de 1,6 à 2,2 et 2,5. La désilicification est plus marquée dans le matériau très poreux de l'andosol en surface que dans les tufs sous-jacents, qui ont conservé encore leur caractère consolidé et peu perméable.

Autres cangahuas

- Cangahua *CAN et cinérite accrétionnée CIN du site de Cangahua*
  Ces deux matériaux présentent un taux de résidu inaltéré respectif de 60 et 59 %, un rapport Ki de l'extrait de sol global de 4,6 et 4,2. Cette *cangahua* est aussi altérée, mais un peu plus désilicifiée et moins calcaire que la première *cangahua* du profil QZI de Bolívar.
- Cangahuas *AMB et LIC d'Ambatillo et de Licto*
  La *cangahua* d'Ambatillo est un peu calcaire. Son taux de résidu inaltéré est de 54 % et la valeur Ki de l'extrait de sol global est de 4,5. Sa composition est donc très proche de celle du site Cangahua. La *cangahua* de Licto a un taux de résidu inaltéré de 61 % et une valeur Ki de l'extrait du sol global de 5,14. Sa composition est peu différente de celle d'Ambatillo, mais plus proche de la deuxième *cangahua* du profil QZI de Bolívar.

Composition minéralogique

Les différents horizons de sol, *cangahua* et tuf altéré sont constitués de verres et minéraux volcaniques, ainsi que de leurs produits d'altération : argiles, oxyhydroxydes de fer et éventuellement calcite et opale.

Minéraux volcaniques primaires

La microscopie optique montre l'abondance de verres incolores (dacitiques et rhyolitiques) et de feldspaths ; il s'agit surtout de plagioclases de type *labrador* et andésine,

et éventuellement de feldspaths sodi-potassiques proches de l'anorthose et de la sanidine. Il y a aussi une quantité importante (10 à 20 %) de minéraux ferro-magnésiens, toujours un peu de magnétite et souvent du quartz, mais en traces ou en petite quantité. Parmi les ferro-magnésiens prédomine une amphibole sodique, la hornblende verte ; il y a fréquemment un peu ou très peu d'un pyroxène verdâtre et un peu sodique, de type augite-ægyrine, plus rarement de la biotite, très rarement de l'augite incolore (calcique) et de l'olivine, exceptionnellement de l'hypersthène ; ces trois derniers minéraux ne sont présents qu'en très faible quantité. Les minéraux volcaniques de haute température, feldspaths, pyroxènes et amphiboles, sont souvent craquelés, signe probable d'un refroidissement brusque lors d'une éruption « phréato-magmatique » . La présence (plutôt rare) de verres basaltiques altérés en palagonite de couleur orange limpide pourrait renforcer cette hypothèse.

On observe souvent un mélange de flux magmatiques, à savoir dans un ensemble à prédominance dacitique, la présence parfois de quelques « clastes » (fragments) de lave basaltique (à augite et olivine) ou andésitique, ou bien un mélange de clastes de laves dacitiques et de ponces rhyolitiques. La plupart des phénocristaux et clastes de laves sont intacts ou peu altérés, seules les particules de verre les plus fines étant transformées en argile.

La diffraction de rayons X sur poudre globale permet de détecter essentiellement les feldspaths, la hornblende, le quartz et la biotite, mais pas les pyroxènes, ni l'olivine, ni la magnétite, sans doute en quantité trop faible pour être différenciés nettement dans ce mélange. Parmi les feldspaths ne ressortent clairement que les raies de plagioclase de type *labrador*, probablement mêlé à l'andésine, mais pas ou peu les feldspaths sodi-potassiques (petite raie à 0,324 - 0,325 nm). La présence éventuelle de cristobalite n'a été différenciée des plagioclases (par un accroissement relatif de raie à 0,405 nm) que dans le résidu de dissolution acide de certaines fractions argileuses.

La comparaison des diffractogrammes de rayons X sur poudre globale permettent de caractériser différentes séries de matériaux originels dans un même profil, par exemple QZI de Bolívar, ainsi que différencier ou apparenter les divers types de *cangahua* étudiés.

- **Profil QZI** : Les minéraux essentiels sont les plagioclases et la hornblende. On note une variation de la hornblende : abondante dans le sol actuel (horizons 1 et 2) ; elle disparaît dans le premier paléosol (horizon 3), puis réapparaît mais faiblement dans le deuxième paléosol (horizons 4 et 5), notamment la *cangahua* supérieure encroûtée de calcite ; enfin elle augmente sensiblement dans le troisième paléosol (horizons 6, 7 et 8), notamment la *cangahua* inférieure (horizons 7 et 8). La quantité de quartz est très faible ; elle n'est appréciable que dans le sol actuel (horizons 1 et 2) et dans la deuxième *cangahua* (horizons 7 et 8) ; ailleurs, elle est nulle. La biotite apparaît seulement en traces dans le sol superficiel.
- **Profil QZII** : Les plagioclases demeurent les minéraux majeurs. Dans les trois horizons étudiés il y a peu de différence. Il y a une quantité notable de hornblende et de quartz. Cependant, ces deux minéraux augmentent sensiblement dans les horizons 2 et 3, surtout dans le tuf (horizon 3), en même temps qu'apparaissent des traces de biotite altérée (raie à 1 nm masquée par celle d'halloysite) ; ceci indique un gradient d'altération du tuf au sol au-dessus.
- **Profil QZIII** : Dans l'horizon de cinérite n'apparaissent quasiment que les plagioclases. Il n'y a que des traces de hornblende, de quartz et de biotite altérée.
- **Profil du *páramo*** : Dans les trois horizons (andosol /tuf gris / tuf brun), les feldspaths (surtout plagioclases et un peu de sodi-potassiques probable) prédominent encore, mais la hornblende est abondante, le quartz toujours présent augmente dans le tuf inférieur. La biotite altérée n'est détectée qu'en traces dans l'horizon 2.
- ***Cangahua* CAN et cinérite CIN du site de Cangahua** : Ces matériaux présentent essentiellement des plagioclases. Il y a un peu de hornblende dans le tuf, seulement des traces dans la cinérite accrétionnée. On ne détecte pas de quartz sinon des traces, ni de biotite.
- ***Cangahua* AMB de Ambatillo et LIC de Licto** : Ces matériaux ne présentent quasiment que des plagioclases, et seulement des traces de hornblende, mais pas de quartz ni de biotite, si ce n'est des traces dans la *cangahua* de Licto.

Minéraux secondaires d'altération

Les produits secondaires sont essentiellement des minéraux argileux (alumino-silicatés). Il s'y ajoute éventuellement de la calcite, ainsi que des oxyhydroxydes de fer et d'aluminium et des oxydes de silice, mais ces derniers sont mal cristallisés ou para-cristallins. La diffraction de rayons X sur poudre globale et sur la fraction argile (< 2 µm) n'a permis de déterminer que certaines argiles assez bien cristallisées et la calcite quand elle est suffisamment abondante (en petite quantité, la raie vers 0,303 nm est commune avec le *labrador*, toujours abondant). Toutefois, il n'a pas été possible ainsi de déterminer l'allophane, ni l'opale, ni les oxyhydroxydes de Fe et Al qui semblent toujours mal cristallisés. L'allophane a été déterminée par extraction à l'oxalate sur quelques échantillons du sol au-dessus de la *cangahua* en position aval, puis d'un andosol, d'une cinérite et de deux tufs altérés en position amont. L'opale n'a pas été observée en microscopie, elle a été analysée par extraction sélective. La calcite n'est abondante que dans le profil QZI de Bolívar dans la *cangahua* supérieure, qui est fortement encroûtée de calcaire en surface et dans la masse. Dans d'autres *cangahuas* (CAN, AMB, LIC) elle a été observée en microscopie et déterminée par dosage chimique.

Détermination des minéraux argileux

Dans les matériaux étudiés, les minéraux argileux sont le plus souvent désordonnés ou mal cristallisés et difficiles à déterminer. Dans les *cangahuas* des piémonts subarides (position aval), il semble que prédomine une argile 2:1 désordonnée à comportement de smectite (argile gonflante), voire parfois une argile mal cristallisée (« allophane-siliceuse et ferrifère », présentant une seule raie distincte vers 0,445 nm). Plus en amont se révèlent mieux des argiles 1:1 de type halloysite (à 0,7 et 1,0 nm), mêlées ou non d'argile 2:1. En amont, près du *páramo* et sur le *páramo*, prédomine l'allophane (alumineuse, Si/Al = 0,5), mais des argiles 1:1 (halloysite 1,0 nm) et 2:1 (smectite, illite, illite-vermiculite) peuvent apparaître en petite quantité dans des tufs altérés de formations pyroclastiques « anciennes », sous l'andosol. Ceci est visible dans la séquence de Bolívar et le sol du *páramo*.

Séquence de Bolívar

- *Profil QZI* : Dans le sol actuel (horizons 1 et 2), l'argile est surtout constituée d'une smectite désordonnée, d'un peu d'illite (biotite altérée) et d'halloysite à 0,7 nm. L'horizon 3 du premier paléosol contient au moins deux fois plus d'halloysite à 0,7 nm que de smectite, et seulement des traces infimes d'illite. Cet horizon étant plus altéré et désilicifié que le sol actuel, sa formation se serait faite en climat plus humide et peut être aussi pendant une durée plus longue.
  Dans les horizons 4 et 5 du deuxième paléosol, la smectite désordonnée prédomine ; il n'y a que des traces d'halloysite à 0,7 nm et pas d'illite ; la *cangahua* est riche en calcite. Ce sol se serait donc formé en climat subaride (peut être plus aride que l'actuel). Dans les horizons 6, 7 et 8 du troisième paléosol, se retrouve la même composition des argiles, mais sans la calcite, si ce n'est des traces ; ce sol se serait aussi formé en climat subaride, mais sans l'épisode terminal plus aride qui, dans la *cangahua* supérieure, a provoqué l'accumulation de calcite.
- *Profil QZII* : Dans les trois horizons prédomine l'halloysite à 0,7 nm. Cette formation correspond plus à un climat subhumide. Cependant, dans le premier horizon étudié (premier paléosol), il y a un peu de smectite mal cristallisée, mais il n'y en a pas (sinon des traces dans le deuxième horizon) dans le sol sous-jacent (deuxième paléosol) et notamment dans le tuf altéré, où l'on note aussi de l'illite (biotite altérée).
- *Profil QZIII* : L'horizon de cinérite altérée contient surtout de l'allophane et seulement des traces d'halloysite hydratée à 1 nm. Cette formation profonde s'est altérée en climat humide.

Profil du *páramo* de Pimampiro (PAR)

L'argile de l'andosol actuel (PAR.1) est constituée uniquement d'allophane. Dans le tuf gris (PAR 2) sous-jacent prédomine encore l'allophane, mais il contient une argile 2:1 à comportement

d'interstratifié illite-vermiculite (raie à 1,12 nm stable au glycol, qui passe à 1,01 nm après chauffage à 500 °C), qui serait une altération de la biotite. Dans le tuf brun (PAR 3) inférieur, outre l'allophane, apparaît une quantité importante de minéraux argileux à prédominance d'halloysite à 1,0 nm et seulement des traces d'une argile 2:1 désordonnée à 1,4 nm. Tous les horizons semblent présenter des traces de cristobalite.

Détermination de l'allophane (tableau 4)

Les produits non cristallins d'Al, Fe et Si ont été extraits par l'oxalate d'ammonium pour déterminer l'allophane (sur la base Si-ox). Dans le cas d'andosols, les mêmes éléments ont été extraits en outre par le pyrophosphate de sodium pour évaluer les formes complexées par des acides humiques, qui ne viennent pas de l'allophane.

	Pyrophosphate						Pyrophosphate			
Echantillon	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	Ki	Al + 1/2 Fe	Allophane	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	Alp/Alo
QZI 1	0,05	0,12	0,26	-	0,18	0,18	-			
QZII 1	0,04	0,11	0,22	-	0,16	0,16	-			
QZIII 1	5,61	0,68	9,25	1,03	5,14	19,35	0,09	0,06	0,44	0,05
PAR 1	3,27	1,85	7,70	0,72	4,73	11,28	0,09	0,73	1,48	0,19
PAR 2	2,65	0,42	4,30	1,05	2,42	9,14	-	0,03	0,30	0,07
PAR 3	0,69	1,11	1,53	0,77	1,16	2,38	0,08	0,23	0,42	0,27

Ki = SiO_2/Al_2O_3 mol. ; Allophane = taux calculé sur base Si-ox (SiO_2 x 3,45 pour allophane Al type imogolite ; Alp/Alo = Al pyrophosphate / Al oxalate

Tableau 4 - Extraits Oxalate et Pyrophosphate d'éléments Al, Fe, Si (en % sol sec à 105 °C)

Dans les sols à l'aval du piémont (horizons QZI 1 et QZII 1), il n'y a quasiment pas d'allophane et très peu d'oxydes non cristallins d'Al et de Fe.

Le sol amont (QZIII 1) et celui du *páramo* (PAR 1) contiennent 19 et 11 % d'allophane (alumineuse Ki = 1) et un peu d'oxyde de fer non cristallin. La fraction d'alumine complexée par l'humus est relativement faible (Alp/Alo < 0,2).

Le tuf gris du *páramo* (PAR 2) contient 9 % d'allophane, mais pas d'oxyde d'Al complexé. Le tuf brun (PAR 3) ne contient que 2,4 % d'allophane, car il contient des minéraux argileux, mais également peu d'oxyde d'Al complexé. Peut-être le deuxième tuf s'est altéré en climat moins humide, ou plus probablement la formation d'argile s'explique par un moindre drainage à la base du sol actuel (signes d'oxy-réductimorphie).

Formes de Si et Al extraites par la soude, NaOH 0,5 N, à 20 et 50 °C (tableau 5)

En plus des échantillons déjà mentionnés, nous avons également déterminé les formes de silice sur deux échantillons supplémentaires de *cangahua* (ZE-1 prélevé à Cangahua et ZE-3 prélevé à La Tola)

La soude à 20 °C permet de discriminer une phase a rapidement soluble à l'état de gel de silice, éventuellement mêlée à de l'allophane, d'une phase b lentement soluble et mieux cristallisée.

Echantillons de cangahua du piémont sub-aride (QZI-5, 6 et 8 + AMB + ZE-1 et 3)

La phase a ne contient pas ou seulement des traces d'Al, donc pas (ou des traces) d'allophane, ni d'alumine ; il s'agit surtout d'un gel de silice (légèrement alumineux), au taux de 0,1 à 0,3 % de SiO_2. Les

valeurs les plus élevées de 0,2 à 0,3 % sont observées dans la *cangahua* inférieure de Bolivar et les *cangahuas* de Cangahua et de La Tola.

La phase b contient un peu plus d'Al, mais surtout encore de la silice ; le rapport Silice/Alumine molaire (Ki) varie de 6 à 9 et il est bien supérieur à celui d'allophane et de minéraux argileux. Il ne s'agit pas de verres volcaniques dont la dissolution est très lente dans ces conditions, mais donc d'un mélange d'opale non cristalline (opale A de très petite taille) et de traces d'allophane. Ce produit ne représente que 0,3 à 0,7 % du sol.

Echantillon de tuf altéré à la base d'un sol à mi-pente, en climat sub-humide, QZII 3

La phase a est presque nulle ; il n'y a que des traces de gel de silice. La phase b ne représente que 0,35 % du sol ; donc elle n'est pas plus abondante que dans les *cangahuas* du piémont inférieur, mais elle est relativement un peu plus alumineuse (Ki de 3,3).

Echantillon de tuf altéré à la base d'un andosol du páramo, *en climat perhumide, PAR-3*

Les phases a et b sont abondantes (respectivement 1,64 à 1,31 % du sol). La phase a est très alumineuse ; le rapport Ki de 0,7 suggère un mélange d'un gel d'alumine et d'allophane. La phase b est plus siliceuse. Le rapport Ki de 1,7 suggère une prédominance d'allophane ou halloysite fine.

La soude à 50°C permet de mieux discriminer dans la phase a (rapidement soluble) les formes de gels et minéraux paracristallins tels que allophane et opale A fine, des formes mieux cristallisées et plus stables dans la phase b, telles que halloysite, opale biologique de grande taille (phytolithes).

Echantillons de cangahua *du piémont subaride (QZI-5, 6 et 8 ; AMB ; ZE-1 et 3)*

Dans la phase a se retrouve l'ensemble de l'extrait par la soude à 20°C. Le produit total représente 0,45 à 1,1 % du sol. Il est presque toujours très siliceux, le rapport Ki variant de 7 à 13 ; il contient donc surtout un gel de silice et de l'opale très fine, mais très peu d'allophane.

La phase b représente 1,6 à 3,6 % du sol ; elle est généralement très siliceuse, puisque le rapport Ki varie de 6 à 14, sauf dans l'échantillon AMB. Ces valeurs élevées de Ki suggèrent une abondance relative en opale, mêlée à un peu d'argiles (smectites mal cristallisées).

L'échantillon AMB contiendrait moins d'opale et plus d'argile ; il est situé en position relativement plus élevée et plus humide que les autres *cangahuas* du piémont. La *cangahua* inférieure de Bolívar (QZI-6 et 8) se distingue nettement de la *cangahua* supérieure (QZI-5), non par la valeur Ki, mais par une teneur double en silice extractible (3,7 % au lieu de 1,7 %). Elle est donc plus silicifiée, et en même temps non (ou très peu) calcaire. Ceci suggère (et confirme) une condition de formation plus humide pour la *cangahua* inférieure, que pour la *cangahua* supérieure.

Echantillon du tuf altéré à la base d'un sol à mi-pente (QZII-3) en climat subhumide

Le produit de la phase a est peu abondant (0,44 % du sol) et relativement plus siliceux (Ki de 7,6) qu'alumineux ; il contient donc un peu d'opale très fine et très peu d'allophane. La phase b est abondante (4,1 % du sol). Elle est relativement alumineuse et ne contient pas d'opale ni d'allophane, mais d'après la valeur Ki de 2,7 un mélange d'halloysite et de smectite à prédominance de la première (ce qui confirme la minéralogie).

Echantillon de tuf altéré à la base d'un andosol du páramo (PAR 3) en climat perhumide

L'extrait de la phase a est abondant (4,4 % du sol) ; la valeur Ki de 1,3 suggère une prédominance d'allophane alumineuse (8 % du sol). La phase b, plus stable, est relativement plus siliceuse ; le rapport Ki de 1,9 est proche de celui de l'halloysite, ce qui confirme encore l'analyse minéralogique (halloysite hydratée à 1 nm). (A noter que la quantité d'allophane extraite par la soude est beaucoup plus élevée (3 fois) que celle obtenue par l'oxalate d'ammonium, en une seule extraction.

Les *cangahuas* du piémont inférieur, en climat subaride, contiennent donc une faible quantité de silice non cristalline sous forme de gel, d'opale très fine et probablement d'opale biologique (plus stable) ; la phase argileuse plus stable est siliceuse (argiles 2:1 proches de smectites). La *cangahua* inférieure est plus silicifiée que la *cangahua* supérieure, plus encroûtée de calcaire, donc formée en climat plus aride. À mi-versant, le

tuf altéré ne contient pas de gel de silice et probablement une très faible quantité d'opale fine ; la phase argileuse plus stable est nettement plus alumineuse que dans la *cangahua* du piémont inférieur (mélange d'argiles 1:1 et 2:1 à prédominance d'halloysite). Au sommet sur le *páramo*, le tuf altéré est surtout constitué d'allophane alumineuse, sans évidence de silice non cristalline, mais plutôt de traces de gel d'alumine ; la composition de la phase argileuse plus stable est proche d'une argile 1:1 (halloysite).

Pétrographie

Nous avons observé en lame mince surtout des horizons indurés, objet de cette étude, et seulement en microscopie optique, à savoir :

- Séquence de Bolívar : Profil QZI - horizons 2 (Ctx), 5b (4 Ckm), 6 (5 Bx), 8 (5 Cm) et 5a (K) la croûte calcaire ; Profil QZII - horizon 3 (3Ctx) ;
- Profil du *páramo* : horizons 1 (A), 2 (2 Cx), 3 (3 Cx)
- *Cangahuas* diverses : CAN (2 Ckm) et cinérite (CIN) de Cangahua, AMB (2 Cm) d'Ambatillo et LIC (2 Ckm) de Licto.

Séquence de Bolívar

Profil QZI

D'une manière générale on observe l'abondance d'un squelette minéral grossier inaltéré ou faiblement altéré, à distribution « porphyrique » (aléatoire), ainsi qu'un plasma dense, microporeux et mixte, formé d'une pâte de verre très fin partiellement altéré en argile jaune clair, d'une argile brune plus ou moins imprégnée d'oxyde de fer, diffuse et peu abondante, et de microcristaux de feldspath. La couleur du plasma argileux varie de brun rougeâtre dans la *cangahua* supérieure (horizon 5b), à brun jaunâtre pâle dans la *cangahua* inférieure (horizons 6, 7 et 8).

Le squelette grossier est constitué surtout de feldspaths, de hornblende verte, de verre rhyodacitique et de petits grains de magnétite. Il comporte souvent quelques « clastes » (petit fragment anguleux) de lave (ponce rhyo-dacitique, lave dacitique ou andésitique), des éclats de quartz, parfois de la biotite altérée et des traces de pyroxène proche de l'augite ægyrine ou de l'hyperstène. La hornblende et les plagioclases sont plus abondants dans les dépôts dacitiques (horizons 2, 6, 7 et 8), tandis que les dépôts rhyo-dacitiques (horizon 5) contiennent plus de feldspaths apparemment sodi-potassiques et souvent craquelés, qui paraissent plutôt proches de l'anorthose et de la sanidine (à vérifier).

La matrice a généralement un aspect dense et continu, mais microporeux. Elle est toujours traversée de chenaux et cavités biologiques irrégulières. Elle peut être fissurée et révéler une structure pédologique (fragmentation ou pédoplasmation).

Dans l'horizon 2 (Ctx) de ponce altérée à la base du sol actuel, il y a très peu de fissures et d'agrégats pédologiques, mais seulement une redistribution localisée de particules dans quelques larges chenaux biologiques en forme de « doigt de gant », ainsi que de nombreuses petites cavités biologiques, isolées ou connectées. Dans l'horizon 5b (4 Ckm) de la première *cangahua* encroûtée de calcaire, la matrice est fragmentée par de nombreuses fissures courbes et irrégulières qui délimitent des agrégats en polyèdre ou en cube à angles arrondis, mais sans montrer un réarrangement plasmique strié typique d'un vertisol. En fait il s'agirait plus d'une fragmentation que d'une pédoplasmation ou une bioturbation, car l'arrangement du plasma et du squelette n'est pas modifié et le vide interagrégat demeure très mince. Cependant, de nombreux chenaux fins et cavités biologiques traversent la matrice. Dans l'horizon 6 (5 Bx) la structure de la matrice est semblable, fissurée en polyèdres subarrondis, mais la couleur est brun-jaune pâle au lieu de brun-rougeâtre. Dans l'horizon 8 (5 Cm), l'organisation de la matrice est massive, seulement coupée de quelques fissures planaires fines, surtout horizontales. L'assemblage du tuf originel est assez bien conservé ; la couleur de la matrice est brun pâle. Celle-ci est traversée de quelques chenaux et cavités espacés. Ainsi le passage de la structure massive du tuf (5 Bcm) à celle polyédrique du sol au-dessus (5 Bx) est plus due à la fragmentation qu'à une pédoplasmation ; en outre s'y accroît dans le sol la pénétration biologique.

Tous les horizons indurés présentent d'autres traits pédologiques : surtout d'illuviation d'argile et parfois de limon en remplissages ou revêtements microlaminés, et plus rarement de petits pseudo-nodules rouge sombre de diffusion et concentration d'oxyde de fer et d'humus près des vides. L'accumulation de calcite n'est très évidente que dans la croûte calcaire foliacée (couches alternées de sparite et de micrite), qui recouvre et pénètre le sommet et les larges fentes de l'horizon sus-jacent la première *cangahua* (horizon 4).

Dans la matrice brun rougeâtre sombre de cette *cangahua*, la calcite est présente, mais discrète, très fine et intimement mêlée au plasma d'argile et fines particules de verre ; elle est donc difficile à distinguer en microscopie optique et on l'observe peu dans les cavités et les fissures. Dans les autres horizons consolidés (2, 7 et 8), aucun remplissage de vide par de la calcite n'a été observé, bien que des traces de calcaire aient été détectées par analyse chimique. L'accumulation de silice sous forme d'opale, suspectée dans les horizons indurés, n'a pas été nettement identifiée au microscope. Cependant dans l'horizon 6 (5 Bx), on remarque quelques remplissages incolores et limpides dans quelques fissures ou des remplissages jaune pâle dans des cavités, peu biréfringents en lumière polarisante (et à extinction diffuse) qui pourraient être de l'opale non cristalline (à vérifier). La présence de phytolithes siliceux a été rarement observée dans quelques vides des horizons 6 et 8.

Les « argilanes » sont constitués d'une argile limpide, jaune à jaune pâle. Les dépôts sont microlaminés, mais le litage est peu apparent en l'absence d'oxydes de fer associés. L'argile, très biréfringente et colorée en lumière polarisée, est de type smectite ; les feuillets sont bien orientés (extinction régulière en LP).

Dans l'horizon 2 (Ctx) l'illuviation est nette, mais limitée à un film fin sur le bord des fissures et de quelques cavités biologiques ; elle semble aussi diffuser dans la matrice et autour des grains du squelette. Dans la *cangahua* supérieure (horizon 5), les revêtements argileux sont minces ; dans des remplissages plus épais ils paraissent associés à de fins cristaux de calcite (teintes irisées des lamines d'argile en LP). Dans l'horizon 6 (5 Bx), au sommet de la *cangahua* inférieure, les revêtements argileux sont très discrets : minces, de couleur très pâle, à orientation irrégulière ou microlaminée et extinction diffuse en LP ; ils pourraient être mêlés à de l'opale ; un mince dépôt rougeâtre (humo-ferrugineux) provenant du sol au-dessus, donc postérieur, apparaît rarement à leur surface. Dans l'horizon 8 (5 Cm), à la base de la *cangahua* inférieure, les revêtements microlaminés d'argile jaune autour de larges cavités biologiques sont plus typiques, mais peu nombreux ; certains sont mêlés d'un peu de limon.

Profil QZII - Horizon 3 (Ctx) de tuf brun

Cet horizon de tuf brun altéré à la base du paléosol semble l'équivalent de la *cangahua* inférieure du profil QZI (horizon 8). Comme celle-ci, il a conservé une structure massive, non fissurée, seulement traversée de cavités et quelques chenaux biologiques. Ici encore le squelette minéral grossier est peu altéré et abondant. Le plasma brun jaune pâle de la matrice est composé de fines particules de verres et minéraux, ennoyées par une argile d'altération jaune limpide diffuse et peu abondante. Cette argile, peu biréfringente et non orientée, est constituée surtout d'halloysite (à 1,0 nm). On observe une illuviation importante d'argile jaune ou jaune orangé limpide en de typiques remplissages ou revêtements microlaminés dans les cavités et chenaux biologiques. Cette argile est souvent accompagnée de limon, en mélange ou en dépôt alterné. La couleur jaune orangé indique un mélange important d'oxyde de fer lié à l'argile. Il y a une certaine diffusion d'oxyde de fer en pseudo-nodule ou plage rouge foncé près de certains vides. Au centre de l'une des cavités, on a observé une plage de remplissage argileux blanchi, mais sans altération de l'argile microlaminée ni une silicification apparente (orientation bien visible en LP). Il n'y a pas ou peu de phytolithes visibles, ni de dépôts de calcite.

La comparaison entre le tuf altéré du profil QZII et la *cangahua* inférieure du profil QZI fait ressortir quelques différences que l'on peut relier à la situation en climat plus humide du premier en position amont, ou plus aride du second en position aval. À

l'amont se manifeste une illuviation plus marquée d'argile, une couleur plus rouge des revêtements, une segrégation plus nette d'oxydes de fer et une argile moins biréfringente (de type halloysite). Mais il est étonnant que le degré d'altération des minéraux grossiers du squelette y reste quasi identique, c'est-à-dire faible. Une autre différence distingue le profil amont du profil aval : l'absence d'équivalent de la *cangahua* supérieure encroûtée de calcaire. Celle-ci en outre manifeste davantage de modifications structurales dues à la pédogenèse en climat plus aride, à savoir la fragmentation de la matrice en agrégats. L'aridité à l'aval se marque par la fragmentation liée au processus alterné de gonflement et retrait, et par l'accumulation de calcite, mais elle s'accompagne aussi d'un moindre degré d'illuviation argileuse et de segrégation d'oxyde de fer. La *cangahua* supérieure du profil aval se serait formée en condition plus aride que la *cangahua* inférieure et que le sol actuel.

ANDOSOL ET TUFS DU *PÁRAMO*

Les deux tufs du *páramo* ne peuvent probablement pas être apparentés aux deux *cangahuas* du profil aval (QZI) de Bolívar, mais il est intéressant tout d'abord de bien distinguer une structure d'andosol dérivé de cendres volcaniques récentes de celle de deux tufs altérés en-dessous. En outre, il est utile de comparer les deux tufs altérés en condition perhumide aux formations analogues de *cangahua* altérées en climat subhumide (tuf brun de QZII) ou subaride (2 *cangahuas* de QZI).

Dans les trois horizons de l'andosol et des deux tufs il y a abondance du squelette de minéraux et verres peu altérés. Le sol (PAR 1) se distingue par son plasma brun rougeâtre foncé, très humifère et abondant, structuré en micro-agrégats ovoïdes et en polyagrégats denses. La matrice est traversée par de nombreux chenaux et cavités biologiques connectées. Le squelette paraît dispersé dans le plasma. Au contraire, dans les tufs le plasma est de couleur brun pâle, très dense ; il n'y a pas de structure pédologique en agrégats. Le squelette est très abondant. Le plasma est constitué d'un mélange de fines particules de verre, de microcristaux et d'une argile jaune limpide diffuse, peu abondante. Dans le tuf supérieur (PAR 2), très peu altéré, il n'y a que quelques fissures planes, chenaux et cavités biologiques épars ; la matrice est surtout formée de fibres et plaquettes de verre peu altéré et peu d'argile. Le tuf inférieur (PAR 3) est plus altéré ; il y a quelques fissures et chenaux biologiques sub-horizontaux reliant de nombreuses cavités ; la porosité est plus développée ; la matrice est plus argileuse.

Dans le sol comme dans les tufs altérés il n'y a aucun revêtement argileux visible dans les cavités ou fissures ; donc pas d'illuviation d'argile ni d'oxyde de fer. Cependant; dans l'andosol on observe quelques fins revêtements noirs d'humus illuvié sur le bord de quelques vides. La ségrégation du fer n'est pas évidente dans l'andosol, mais quelques rares pseudo-nodules de couleur jaune-orange (argile + oxyde de fer), apparaissent dans le tuf supérieur, épars. Ils sont plus développés et plus ferrifères (orange et rouge foncé), mais encore dispersés, dans le tuf inférieur.

Le plasma argileux d'allophane et oxyde de fer non cristallin est isotrope et opaque en LP dans le sol et le tuf supérieur, tandis que dans le tuf inférieur le plasma est moins opaque en LP, gris, mais non biréfringent ; il contient un mélange d'allophane et d'halloysite. On note dans le tuf supérieur l'abondance de verre rhyolitique et la très faible formation d'argiles, qui montre l'âge récent de cette formation, probablement holocène, donc plus jeune que la *cangahua* supérieure de Bolívar.

Les tufs altérés du *páramo* se distinguent aussi de la *cangahua* de Bolívar par l'absence de traits d'illuviation d'argile. Malgré un climat très humide leur degré d'altération est encore très limité, notamment dans le tuf supérieur sous l'andosol.

AUTRES *CANGAHUAS*

Les trois *cangahuas* étudiées, éloignées de Bolívar mais en climat semblable, subaride, ont cependant des caractères voisins de celles du profil aval (QZI) de Bolívar, notamment la *cangahua* inférieure (horizon 8), à savoir : l'abondance du squelette de minéraux et verres peu altérés, la composition dacitique du matériau originel, une matrice

dense et microporeuse, une structure massive ou faiblement fragmentée par des fissures, mais sans marque de pédoplasmation, et traversée de chenaux et vides biologiques. Elles se distinguent des *cangahuas* de Bolívar par l'absence de traits d'illuviation argileuse et ferrugineuse. Elles ne présentent que des remplissages discrets de calcite dans quelques vides, mais pas d'évidence de silicification.

AMB, Ambatillo

La particularité du matériau originel pyroclastique est d'être un peu plus calcique que celui des *cangahuas* de Bolívar, car il contient outre les produits dacitiques et rhyolitiques un peu de clastes de lave basaltique à *labrador*, augite et olivine. La structure massive du tuf initial n'est que peu fragmentée par des vides planaires, sans agrégats pédologiques. La présence très discrète de nodules de cinérite accrétionnée, ainsi que l'altération rouge sombre des verres basaltiques (en palagonite ?) sans altération de l'olivine et l'aspect craquelé du *labrador* suggèrent une émission phréato-magmatique. Il n'y a aucun revêtement argileux, seulement de très rares nodules de diffusion fer-humus. Cependant on observe quelques revêtements et remplissages de calcite fine en aiguilles et en plaquettes dans des vides biologiques. On note un remplissage exceptionnel d'amas en rosette de fines aiguilles incolores en LN, brillantes en LP, qui pourraient être d'opale-cristobalite. Le plasma matriciel brun rougeâtre en LN et faiblement biréfringent en LP est constitué de fines particules de verre altéré et d'un mélange de smectite et d'oxyde de fer.

CAN et CIN de Cangahua

Le matériau originel pyroclastique ne contient que des traces de lave basaltique altérée en rouge sombre et de verre basaltique orangé altéré en palagonite. Cependant, la présence de larges boules de cinérite accrétionnée dans cette formation suggère une émission phréatomagmatique. Dans ce cas, la partie supérieure de la *cangahua* que nous avons observée (CAN) est encroûtée de calcaire en surface et dans les fentes larges, mais pas dans sa masse. Elle est nettement fragmentée par des fissures fines et irrégulières, en petits agrégats cubiques et polyédriques à angles arrondis, mais sans signe de pédoplasmation. Il y a abondance de chenaux et cavités biologiques. Il n'y a aucun revêtement argileux ou siliceux, ni nodule ferrugineux, tout au plus une faible diffusion ferrugineuse autour de minéraux et de fissures, mais on observe dans quelques cavités des revêtements et remplissages de calcite fine en aiguilles et plaquettes. Le plasma matriciel brun rougeâtre est semblable à celui de la *cangahua* d'Ambatillo.

La boule de cinérite accrétionnée (CIN) est altérée de la même manière que la *cangahua*, bien qu'elle ait gardé sa structure originelle et soit peu fissurée. Les phénocristaux du squelette grossier paraissent plus éclatés, corrodés et altérés, bien que globalement il n'y ait pas plus de produit d'altération. On observe de rares revêtements jaune limpide sur le bord de quelques fissures, une légère diffusion d'oxyde de fer rouge sombre autour de minéraux, mais pas de remplissage de calcite ni de silice. Le plasma matriciel brun rouge est semblable à celui de la *cangahua*.

LIC, Licto

Nous avons observé la partie supérieure de la *cangahua*, légèrement encroûtée de calcaire en surface. Elle est très semblable à celle du site de Cangahua (CAN), bien que très éloignée dans l'espace. Le matériau originel ne comporte que très peu de lave basaltique altérée en palagonite. La matrice massive n'est que peu fragmentée par des fissures fines en agrégats cubiques et polyédriques. Le plasma matriciel brun rouge a la même composition. Il n'y a pas de revêtements argileux ni de nodules ferrugineux, sinon une diffusion d'oxyde de fer autour de minéraux ferrugineux. Nous n'avons observé sur la lame mince qu'un seul remplissage de calcite dans un vide biologique ; l'encroûtement calcaire semble limité à la surface de la *cangahua*. Il n'y a pas de revêtement siliceux.

INTERPRÉTATION ET CONCLUSION

Origine et pédogenèse

L'étude des *cangahuas* de Bolívar, Cangahua, Ambato et Licto montre qu'elles proviennent très probablement de dépôts de cendre volcanique consolidée. Dans certaines (Ambato, Cangahua) l'hypothèse d'un flux pyroclastique d'éruption phréatomagmatique

est vraisemblable. Tous les échantillons conservent dans leur matrice la « texture » consolidée et massive d'un tuf pyroclastique ; l'altération est limitée à la phase vitreuse fine mais n'atteint pas ou peu les minéraux grossiers. Cependant, la marque de la pédogenèse y est très nette, comme effet de plusieurs processus, à savoir : altération de la matrice vitreuse fine en argile et oxyde de fer ; fragmentation éventuelle en agrégats par fissuration, surtout en climat subaride et près de la surface du tuf altéré, mais sans pédoplasmation évidente ; pénétration biologique en chenaux et cavités, surtout près de la surface ; illuviation éventuelle d'argile et d'oxyde de fer associé (couleur limpide) dans les cavités biologiques ; dépôt éventuel de calcite dans certains cavités, l'encroûtement calcaire s'il existe demeurant superficiel, ou bien exceptionnellement (*cangahua* supérieure de Bolívar) diffusion de calcite fine dans la matrice à la partie supérieure de la *cangahua* ; faible diffusion éventuelle d'oxyde de fer dans la matrice, en pseudo-nodules ou en plages étroites en bordures de minéraux ferrugineux ou de cavités.

Âge et composition

L'âge de ces matériaux consolidés est généralement antérieur à l'holocène. La datation par ^{14}C de deux encroûtements calcaires sur la *cangahua* supérieure près de Bolívar indique environ 13 500 et 14 500 années BP. Il est probable que le début de l'encroûtement calcaire et, *a fortiori* la formation de la *cangahua* elle-même, remonte à plus de 15 000 BP, c'est-à-dire entre 20 000 et 15 000 BP, compte tenu du temps nécessaire pour l'altération minérale en climat subaride. La *cangahua* inférieure est évidemment bien plus ancienne. Cependant, sur le *páramo*, la formation du tuf supérieur, encore très peu altéré, pourrait être plus récente, de l'Holocène.

La composition de matériaux pyroclastiques originels varie peu, allant d'une dacite claire à une rhyodacite. Cependant, on observe près de Bolívar une succession de dépôts de composition un peu différente : ainsi, la *cangahua* supérieure est rhyodacitique, la *cangahua* inférieure dacitique ; ailleurs, près d'Ambato et de Licto, il y a eu addition d'un peu de lave basaltique lors de l'éruption, ou bien sur le *páramo* les tufs sont rhyodacitiques. Donc il s'agit bien de différentes émissions pyroclastiques dont le foyer et l'âge diffèrent, aussi bien d'une strate à l'autre dans un même lieu que d'une région à l'autre. Mais il est peu probable que chaque *cangahua* ou tuf corresponde à un dépôt d'apport éolien généralisé remaniant les dépôts de cendres volcaniques sur l'ensemble d'une région ou de la vallée interandine. Les dépôts éoliens peuvent toutefois exister localement.

Les minéraux primaires essentiels sont des verres volcaniques dacitiques et rhyolitiques, alcalins et sodipotassiques, des plagioclases (*labrador* - andésine), de la hornblende verte et de la magnétite. La présence d'un feldspath sodi-potassique (anorthose-sanidine) est probable dans les matériaux rhyolitiques. Il peut y avoir des traces de biotite et de quartz dans les formations plus rhyolitiques, ou de pyroxène et d'olivine et verre basaltique dans les dacites plus calciques.

Ciment de la matrice

Le ciment de la matrice des *cangahuas* et tufs altérés semble être généralement le plasma argileux et un peu ferrifère. De la silice non cristalline en très faible quantité dans les revêtements et remplissages argileux n'est pas à exclure dans les *cangahuas* situées en piémont inférieur et climat subaride, mais sa présence n'a pas été nettement identifiée. La cimentation de la matrice par de la calcite fine n'est généralement pas évidente, sauf dans les encroûtements calcaires superficiels et dans la *cangahua* supérieure de Bolívar.

Séquence topoclimatique d'altération et composition du plasma matriciel

L'altération est toujours limitée à une partie de la matrice vitreuse fine et les phénocristaux ne sont pas ou peu altérés. Ceci indique une période de formation restreinte à quelques milliers d'années. La composition du plasma d'altération varie suivant les conditions topoclimatiques, mais étrangement pas la quantité globale de ce produit qui demeure aussi limitée en climat humide qu'en climat subaride.

Suivant la séquence topoclimatique de l'aval vers l'amont, du subaride au perhumide, on observe dans le plasma un gradient de perte de silice et de bases, suivant l'accroissement de la pluviosité et du drainage. Ceci se traduit par une évolution qualitative du plasma et de ses propriétés, à savoir : une argile à prédominance de smectite en aval, puis d'halloysite à mi-versant, enfin d'allophane à l'amont. En conséquence, à l'aval, le matériau est plus gonflant et plus fragmenté, mais aussi plus dur à l'état sec ; la *cangahua* supérieure y est souvent encroûtée de calcaire en surface ; l'illuviation d'argile y est faible ou nulle. À mi-versant, le matériau est plus friable, moins gonflant et moins fragmenté ; l'illuviation d'argile et d'oxyde de fer y est plus marquée, mais il n'y a pas d'encroûtement calcaire. À l'amont, sur le *páramo*, le tuf altéré est friable, non gonflant ni fragmenté et toujours humide ; il n'y a pas d'illuviation d'argile et peu de redistribution d'oxyde de fer.

Faible variation de la *cangahua* en piémont inférieur et climat subaride

En revanche, en même condition climatique, l'évolution spatiale des caractères de la *cangahua* est peu évidente. Ainsi, sur le piémont inférieur en climat subaride, la *cangahua* supérieure manifeste peu de variation dans ses propriétés, même s'il ne s'agit pas toujours de la même émission pyroclastique et s'il y a une certaine variation dans la composition du matériau originel. Ainsi, la composition de l'argile est à prédominance de smectite, l'encroûtement calcaire superficiel est très fréquent, la fragmentation est développée près de la surface mais sans évidence de pédoplasmation, la cohésion est toujours forte, mais l'illuviation d'argile peut être présente ou non. Cependant, sur une même station près de Bolívar, la *cangahua* inférieure diffère un peu, par l'absence d'encroûtement calcaire. Ceci suggère une évolution climatique au Pléistocène supérieur vers un climat plus aride vers 15 000 BP.

Conclusion

La *cangahua* dans les sols d'Équateur peut généralement être considérée comme l'altération d'un dépôt de cendre volcanique consolidée. Chaque *cangahua* correspond à une émission pyroclastique particulière et se situe à la base d'un paléosol (horizon C) dont la formation est antérieure à l'Holocène.

La composition du plasma d'altération argileux et ferrifère est dépendante du régime climatique et donc de sa position topoclimatique, à savoir : smectite à l'aval, halloysite à mi-versant, allophane à l'amont. De même est dépendante la redistribution et l'accumulation de certains éléments : notamment argile et calcaire en bas-versant ; seulement argile et fer à mi-versant ; pas d'argile à l'amont. Cependant, il est probable que l'encroûtement calcaire superficiel de la *cangahua* supérieure n'est pas dû à la pédogenèse actuelle. Près de Bolívar, le ^{14}C de la croûte est daté de 13 500 à 14 500 BP ; sa formation est donc bien antérieure à l'Holocène. Il n'y a d'encroûtement ni à la base du sol actuel ni dans la *cangahua* inférieure. Cette croûte calcaire aurait pu se former pendant une période climatique plus aride vers 15 000 BP. La croûte calcaire n'est pas toujours la cause de l'induration, puisqu'elle n'est pas toujours présente, ni ne diffuse généralement dans

la matrice. La silice non cristalline, si elle est probable en petits revêtements dans la *cangahua* en position aval, ne l'est sans doute plus en position de mi-versant ou à l'amont. Sa faible présence si elle existe, n'est pas la seule cause de l'induration.

En même situation topoclimatique, les caractères de la *cangahua* supérieure varient assez peu, indépendamment du foyer d'éruption et de la composition du matériau originel dont l'âge semble se situer pendant une période relativement limitée (15 000 à 20 000 BP ?). Seuls peuvent varier la fragmentation ou non en agrégats, la présence ou non d'illuviation argileuse, la diffusion ou non de calcite dans la matrice, le degré de cohésion et la dureté.

Références bibliographiques

CUSTODE, E.; DE NONI, G.; TRUJILLO, G.; VIENNOT, M., 1992: La cangahua en el Ecuador. Caracterización morfoedafológica y comportamiento frente a la erosión, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 332-346 .

HALL, M.L., 1995: Glaciares en Papallacta, efectos de la glaciación, «El Comercio», Quito, diciembre de 1995.

HALL, M.L.; BEATE, B., 1991: El volcanismo plio-cuaternario en los Andes del Ecuador, en *Estudios de Geografía*, N° 4: «El paisaje volcánico de la Sierra Ecuatoriana», Colegio de Geografos del Ecuador, Quito, 1991, p. 5-17.

MOTHES, P.; HALL, M.L., 1991: El paisaje interandino y su formación por eventos volcánicos de gran magnitud, en *Estudios de Geografía*, N° 4: «El paisaje volcánico de la Sierra ecuatoriana», Colegio de Geógrafos del Ecuador, Quito, p. 19-38.

RITTMANN, A., 1963: *Les volcans et leur activité*, Masson, Paris, 462 p.

VERA, R.; LÓPEZ, R., 1992: Tipología de la cangahua, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 113-119.

WINCKELL, A.; ZEBROWSKI, C., 1992: La *cangahua* en Équateur : le contexte paléogéographique de sa formation, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 107-112.

WINCKELL, A.; ZEBROWSKI, C.; DELAUNE, M., 1993: Évolution du modelé quaternaire et des formations superficielles dans les Andes de l'Équateur. 1ère partie : Le volcanisme pyroclastique récent ; 2e partie : Quelques aspects de l'histoire paléogéographique quaternaire, dans *Géodynamique*, Vol. VII, N° 2, ORSTOM, Paris.

ZEBROWSKI, C. 1997: Los suelos con cangahua en el Ecuador, en este volumen.

Pedogénesis de capas endurecidas de suelos volcánicos del altiplano de Nariño (Colombia)

Lucy N. MORA P., David FLORES R.

Abstract

This work was done in eroded acreas showing bare hardened layers exposed on the surface in a volcanic formation of the Colombian Andes known as the high plateau of Nariño. The objective was to establish hypothesis about the genesis of these layers and the related soils through the basis of the knowledge of their physical, chemical and mineralogical characteristics.

Keywords: *Colombia - Indurated Horizons - Duripan - Fragipan - Genesis - Classification*

INTRODUCCIÓN

En varios países de América Latina, donde los suelos tienen origen volcánico, afloran capas endurecidas que se han convertido en uno más de los factores que reducen la producción agropecuaria (Quantin *et al.*, 1993). En Colombia se reporta de un 3 a un 4 % de la zona andina con presencia de capas endurecidas, localizadas exclusivamente en las partes bajas de las vertientes, independientemente de la altura sobre el nivel del mar (Faivre y Gaviria, 1992). El origen y los procesos de formación de estas capas endurecidas no son muy claros debido a los diferentes tipos de endurecimientos y a la gran variedad de materiales de origen volcánico y sedimentario.

Los objetivos de este estudio fueron: 1) caracterizar y clasificar los suelos volcánicos con capas endurecidas; 2) generar hipótesis sobre la génesis de los suelos y las capas endurecidas en una área del altiplano de Nariño (Colombia). El presente trabajo constituye un primer avance de este estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio comprende la parte norte del altiplano de Nariño, localizada entre 1°26' y 1°40' de latitud norte y 77°16' y 77°30' de longitud oeste, en las inmediaciones de la población de Chachagüi, departamento de Nariño, Colombia (figura 1). La zona está ubicada a una altitud de aproximadamente 1.750 m.s.n.m., dentro del piso térmico cálido, con un clima semi-húmedo (ústico) caracterizado por una temperatura media anual de 19,3 °C (isotérmico), una precipitación total anual de 1.127 mm y una evaporación de 1.386 mm/año, con cinco meses de lluvia y siete de sequía. En el campo de la geología

se reportan formaciones a partir de diversos períodos del Plio-Cuaternario (Radelli, citado por Faivre y Gaviria, 1992), provenientes de numerosos focos volcánicos, con aportes de diversas rocas, lavas, flujos de lodo, piroclastos, depósitos glaciales, aluviales y coluviales. Los suelos son superficiales y están limitados por horizontes endurecidos, por lo que se clasifican como *Lithic Haplustalf* (IGAC, 1986). El uso del suelo está restringido a pastizales, terrenos agrícolas abandonados y áreas de recreación.

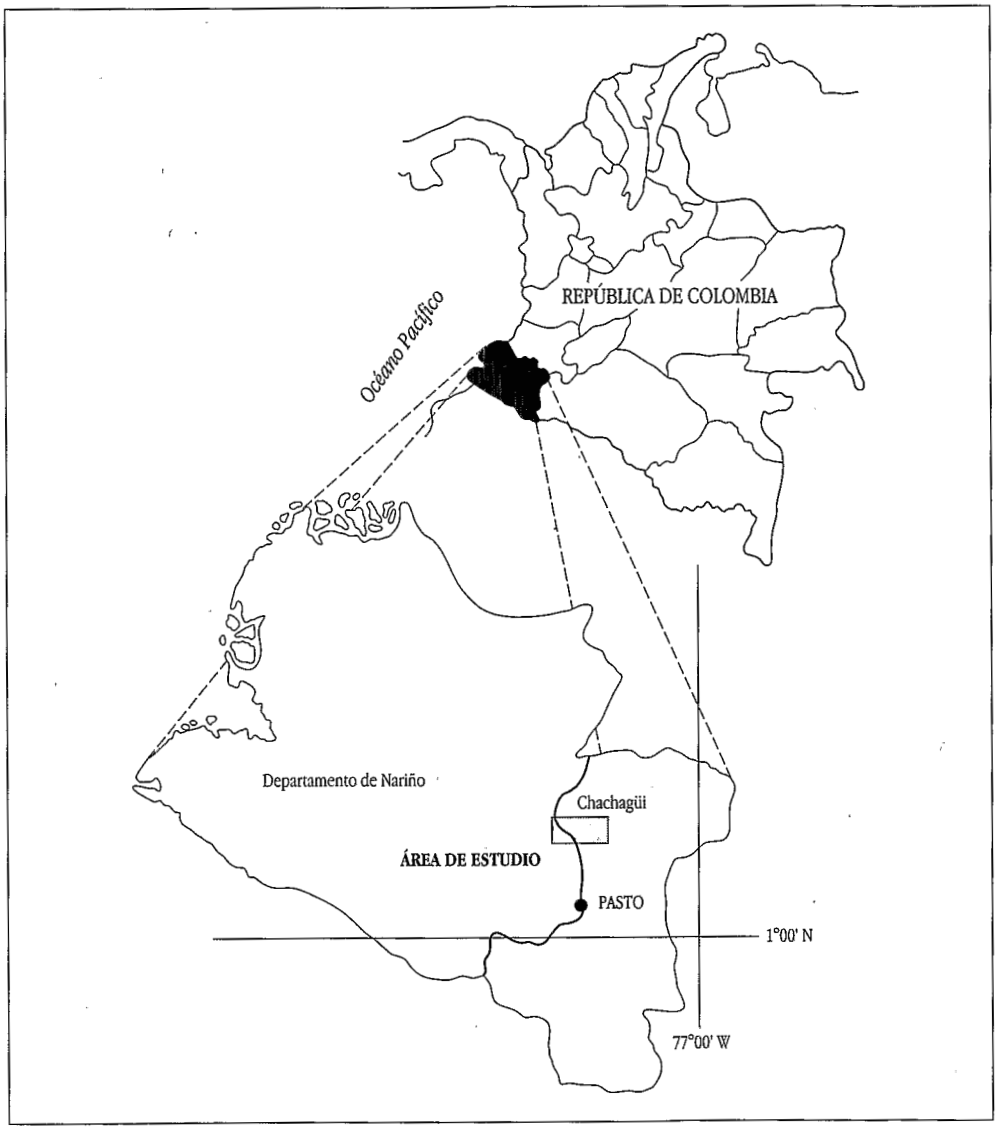


Figura 1 - Localización del área de estudio

La superficie aproximada del área de estudio es de 40 km^2, donde se describieron y muestrearon cuatro perfiles, seleccionados mediante fotografías aéreas a escala 1:17.000 (figura 2). La descripción morfológica de campo se llevó a cabo comparando seis parámetros: textura, consistencia en seco y húmedo, estructura, separación de horizontes y presencia de raíces. El muestreo de los perfiles y la metodología de los análisis físicos y químicos de laboratorio se hizo de acuerdo con el Soil Survey Staff (1984), la prueba de redondez y esfericidad de acuerdo con Powers (1953), la del espacio poroso con base en Johnson *et al.* (1960), la de los óxidos totales según Verbeek *et al.* (1982) y la de los óxidos libres de Fe, Al y Si según Mehra y Jackson (1960). Las muestras de capas endurecidas se sometieron a la prueba de estabilidad con tratamientos de agua, HCl 1N y KOH concentrado alternados (Nimlos, 1987) y la prueba de resistencia a compresión simple se realizó en núcleos labrados sujetos a un esfuerzo creciente en condiciones de carga.

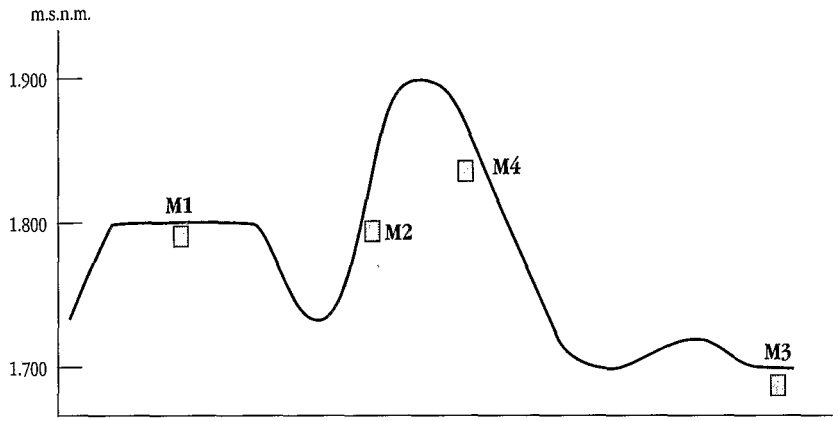


Figura 2 - Secuencia topográfica de los perfiles estudiados

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El cuadro 1 muestra los resultados de los análisis físicos y químicos. Los perfiles 1 y 3, que se localizan, el primero sobre una meseta a 1.800 m.s.n.m. y el segundo en la parte más baja y plana del área de estudio (figura 2) se caracterizan por tener morfológicamente dos horizontes bien diferenciados, con cambio entre horizontes claro y abrupto, un horizonte superficial poco profundo, no mayor a 20 cm y una capa endurecida de más de 2 m de profundidad. La diferencia entre estos dos horizontes se establece por una secuencia en el color, de pardo a amarillento; una estructura de bloques subangulares a masiva; una textura en campo de arcilla limosa a franco-arcillo-limosa. La consistencia varía un tanto en el perfil 3, siendo dura en seco y muy firme en húmedo, mientras en el perfil 1, es dura en seco y frágil en húmedo. El perfil 4 es un suelo con horizontes A, Bt y Cx con características morfológicas diferentes. Entre los dos primeros horizontes existe una diferenciación difusa, no hay variación en el color, ni en la estructura, ni en la textura franca y franco-arcillosa. Los siguientes horizontes presentan una diferenciación en todos los parámetros en la siguiente secuencia: estructura masiva-bloques subangulares; consistencia

Perfil	Horizonte	Profundidad (cm)	COLOR		TEXTURA	DENSIDAD (g/cm³)		pH	M. O	CICT	BASES INTERCAMBIABLES				Sat. Bases
			Seco	Húmedo		Aparente	Real	H_2O 1:2	%	cmol+Kg-	Na	cmol+ K	Kg+ Ca	Mg	%
M1	A	0-20	10YR 6/2	10YR 3/2	Cra	1,19	2,17	6,65	2,11	12,50	0,08	0,44	4,00	6,00	84,12
	Cqm		Gris pardo claro	Pardo grisáceo muy oscuro											
		20-150	5Y 8/2	2,5YR 5/4	Cra	1,39	2,39	7,35	0,00	23,00	0,20	0,33	5,00	6.00	50,13
			Blanco	Pardo rojizo											
M2	Cqm	0-50	2,5Y 7/4	2,5Y 4/4	C	1,24	2,44	7,9	0,55	15,00	0,51	1,90	10,00	1,00	89,35
			Amarillo pálido	Pardo olivo											
	A	50-100	2,5Y 6/4	10YR 4/4	Cra	1,66	2,33	7,2	0,75	17,30	0,16	0,87	6,00	13,00	100,00
			Amarillento claro	Pardo amarillento oscuro											
	AB	100-150	2,5Y 6/6	2,5Y 5/4	Crl	1,67	2,27	7,65	0,62	31,00	0,39	1,13	8,00	11,00	66,18
			Amarillo olivo	Pardo oliva claro											
M3	A	0-40	10YR 5/3	10YR 3/2	C	1,66	2,45	6,8	1,70	22,50	0,11	0,82	8,00	6,00	66,34
			Pardo	Pardo grisáceo muy oscuro											
	Cqm	40-150	5Y 7/3	5Y 6/4	C	1,44	2,09	7,5	0,27	20,00	0,20	0,44	7,00	5,00	63,19
			Amarillo pálido	Olivo pálido											
M4	A	0-20	10YR 5/2	10YR 3/2	Ca	0,94	2,15	7,15	4,49	29,00	0,09	1,20	12,00	10,00	80,31
			Pardo grisáceo	Pardo grisáceo muy oscuro											
	B	20-60	10YR 5/2	10YR 3/2	Cr	1,55	2,19	6,9	3,06	37,00	0,09	1,13	13,00	4,00	49,22
			Pardo grisáceo	Pardo grisáceo muy oscuro											
	Bt	60-90	10YR 5/2	10YR 4/2	Cra	1,43	2,22	7,15	1,56	23,00	0,14	1,54	15,00	9,00	100,00
			y 10YR 5/3	y 10YR 6/4											
			Pardo grisáceo y	Pardo grisáceo oscuro y					0,95						
			Pardo	Pardo amarillento											
	Cx	90-150	10YR 8/3	10YR 6/3	Ca	1,56	1,99	7,25	0,55	23,70	0,14	1,51	13,00	2,00	70,28
			Pardo muy pálido	Pardo pálido											

C: Franco, Ca: Franco arenoso, Cr: Franco arcilloso, Cra: Franco arcillo-arenoso, Crl: Franco arcillo-limoso

Cuadro 1 - Principales características físicas y químicas

en seco dura a muy dura; textura areno-arcillosa - arcillo-limosa. A lo largo de todo el perfil hay abundancia de cantos rodados, gravas y gravillas. En el perfil 2 se presume la existencia de un suelo enterrado, ya que por debajo de la capa endurecida expuesta se encuentran dos horizontes de diferenciación difusa, con estructura de bloques subangulares, mayor abundancia de poros, consistencia en seco blanda y en húmedo muy friable, textura franco-arenosa y limo-arcillosa respectivamente, mientras que la capa endurecida tiene una estructura masiva, consistencia en seco muy dura y friable en húmedo, y textura areno-limosa.

Del estudio morfológico de campo y de los resultados de laboratorio se desprende lo siguiente:

Morfología

Los suelos localizados en las áreas planas son muy semejantes, dada la incipiente evolución, limitada por la presencia de capas endurecidas, mientras que en los suelos de laderas se presenta mayor evolución y una notable presencia de arcilla en los diferentes horizontes.

Color

El color predominante en estos suelos es el pardo (10YR), con una importante variación en las capas endurecidas a colores blanco, pálido o más claro en seco.

Textura

Se obtuvieron texturas desde franco-arcillosas hasta franco-arenosas; la cantidad de arcilla no supera el 40 %, excepto en el perfil 4 que muestra una mayor evolución.

Densidad aparente

En los perfiles se reportan densidades aparentes entre 1,0 y 1,6, lo que significa que en las profundidades donde la densidad es superior a 1,3 g/cm^3 hay una estructura masiva. De acuerdo con dicha estructura, la macroporosidad disminuye a mayor profundidad (Peña y Zebrowski, 1992).

Redondez y esfericidad

En las partículas de arenas finas de los perfiles, hay un predominio de granos angulosos y subangulosos con alta esfericidad en los perfiles 1,2 y 3, mientras en el perfil 4 son angulosos de baja esfericidad. Para limos medios, existe una secuencia de granos subangulosos y subredondeados de alta esfericidad desde los horizontes superficiales. Esto indica la presencia de materiales poco evolucionados por depósito de cenizas recientes. Las arenas tienen poco traslado en la geoforma.

Resistencia a compresión simple

Los valores determinados son elevados, superiores a 15 kg/cm^2, en los perfiles con duripán, y bajos, 5 kg/cm^2, en el fragipán. En el duripán expuesto por la erosión del suelo son muy altos, 48 kg/cm^2. Todas estas determinaciones se efectuaron con contenidos de humedad de las muestras del 6 al 12 %.

Estabilidad de los horizontes endurecidos

En los perfiles estudiados, probablemente el cementante predominante es la sílice. Ante los tratamientos con agua, HCl 1N y KOH concentrado los perfiles 1, 2 y 3 no se colapsaron en las primeras horas, mientras que la capa endurecida del perfil 4 sí lo hizo a los 20 segundos en agua. Esto indica que los primeros son duripanes y el último es un fragipán.

pH

La concentración de iones hidrógeno tiene una tendencia de la neutralidad a la alcalinidad, disminuyendo un tanto en los horizontes con mayor presencia de materia orgánica.

C orgánico y materia orgánica

El carbono oscila entre 0,1 y 2,6 %, valores muy bajos. En el caso de suelos de origen volcánico, el contenido de materia orgánica parece bajo. En ningún perfil supera el 5 %. Las capas endurecidas se caracterizan por su extrema pobreza e incluso, en algunos casos, el contenido de M.O. es nulo.

CIC

En los perfiles 1, 2 y 3 el incremento de este parámetro entre horizontes se debe fundamentalmente al contenido de arcilla de los mismos, independientemente de la presencia de materia orgánica. En el caso del perfil 4, se presenta un aumento considerable en el horizonte B, pese al menor contenido de arcilla con relación al horizonte Bt, lo que puede explicarse por la formación de materiales alofánicos en el horizonte B. Estas características corresponden a un horizonte de alteración de vidrio volcánico.

Saturación de bases

En relación a las bases intercambiables, Ca, Mg, Na y K son los elementos predominantes como producto de la intemperización de los vidrios volcánicos y de los minerales primarios, tales como feldespatos y ferro-magnesianos, característicos de la composición de suelos derivados de materiales volcánicos. La tasa de saturación de CIC siempre es elevada.

Óxidos libres

Los valores resultantes son bajos, lo cual significa que hay poco sílice y aluminio libres y/o alófano y prácticamente nada de óxido de hierro. El orden de predominio de óxidos libres obtenidos fue $SiO_2 > Al_2O_3 > Fe_2O_3$, salvo en el horizonte superficial del perfil 3, en el que $Al_2O_3 > SiO_2$.

	PERFIL 1 Horizontes		PERFIL 4 Horizontes				PERFIL 3 Horizontes		PERFIL 2 Horizontes		
	A	Cqm	A	B	Bt	Cx	A	Cqm	Cqm	A	AB
Óxidos libres											
SiO_2	0,24	0,24	0,27	0,26	0,31	0,24	0,25	0,26	0,31	0,26	0,43
FeO_3	0,03	0,04	0,02	0,05	0,06	0,03	0,06	0,04	0,04	0,03	0,06
Al_2O_3	0,11	0,21	0,17	0,18	0,11	0,08	0,39	0,20	0,50	0,17	0,29
Relaciones molares											
SiO_2/Al_2O_3	3,70	1,93	2,69	2,40	4,78	5,09	1,09	2,21	1,05	2,6	2,52

Cuadro 2 - Óxidos libres y relaciones molares

Clasificación de suelos

Aunque no se tienen todas las determinaciones de laboratorio suficientes para hacer una correcta clasificación, con la información obtenida hasta ahora se podría

proponer la siguiente aproximación: los perfiles 1 y 3 se clasificaron como *Entic Durustolls* (Soil Survey Staff, 1994) y *Feozem* Háplico Dúrico (FAO-UNESCO, 1990) y el perfil 4 como *Fragic Typic Argialboll* (Soil Survey Staff, 1994) y Luvisol Háplico Frágico (FAO-UNESCO, 1990). En el perfil 2 aparece un suelo enterrado, clasificado como *Shallow Durustalf* (Soil Survey Staff, 1994) y Leptosol Éutrico Dúrico (FAO-UNESCO, 1990).

Génesis de las capas endurecidas

Este estudio apuntó a establecer hipótesis sobre el origen de las capas endurecidas y el tipo de cementante. Sin embargo, como en la clasificación de los suelos, por el grado de avance de la investigación, no se dispone aún de la información suficiente que apoye una sólida discusión sobre la génesis. El origen de las capas endurecidas puede estar asociado a dos procesos: uno geológico debido al depósito de materiales piroclásticos y el otro edafológico (Quantin *et al.*, 1993). En el segundo se presenta en cadena la siguiente secuencia: depósito de sílice por precipitación lateral desde las laderas hacia las áreas planas y recristalización de la sílice hacia formas opalinas dada la alternancia de períodos húmedos y secos. De acuerdo a los resultados de la prueba de estabilidad, el tipo de cementante podría ser la sílice.

CONCLUSIONES

- Los suelos estudiados sobre la capa endurecida son poco desarrollados, con horizontes de reducido espesor y material piroclástico muy joven, recientemente depositado; sin embargo, las condiciones del clima propician una mayor meteorización, lo que quiere decir que dichas capas limitan el desarrollo del suelo.
- Las relaciones molares de SiO_2/Al_2O_3 en los óxidos libres manifiestan condiciones de meteorización moderadas, en las que ya se inicia la cristalización de la sílice. Dada la juventud de los suelos, hay una importante formación de sílice.
- De los perfiles estudiados se puede decir que existen dos tipos de endurecimientos asociados a la posición en la geoforma. Los duripanes se localizan en áreas planas mientras que los fragipanes están en las laderas.
- La génesis de las capas endurecidas puede estar asociada a procesos geológicos y secundariamente pedogenéticos.

Referencias bibliográficas

FAIVRE, P.; GAVIRIA, S., 1992: Suelos y formaciones piroclásticas endurecidas en los Andes de Colombia, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM/Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 89-99.

FAO-UNESCO, 1990: *Soil map of the world, revised legend: Roma*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, International Soil Reference and Information Centre, World Soil Resources, Report 60, mapa a escala 1:5'000.000, texto de 119 p.

JOHNSON, W.M.; MCCLELLAND, J.E.; MCCALEB, S.B.; ULRICH, R.; HARPER, W.G.; HUTCHINGS, T.B., 1960: Classification and description of soil pores, in *Soil Science*, Vol. 89, p. 319-321.

MEHRA, O.P.; JACKSON, M.L., 1960: Iron Oxide Removal from Soil and Clays by a Dithionite-citrate System Buffered with Sodium Bicarbonate, in *Clays and Clay Minerals*, Monograph 5, Earth Science Series, p. 317-327.

NIMLOS, T.J., 1987: La nomenclatura de horizontes endurecidos en suelos derivados de cenizas volcánicas, en *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*, J.F. Ruiz F. (editor), UACH, Chapingo, México, p. 10-18.

PEÑA, D.; ZEBROWSKI, C., 1992: Caracterización física y minerológica de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), orstom-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 156-164.

QUANTIN, P., ARIAS H. M.; ETCHEVERS B., J. D.; FERRERA-CERRATO, R.; OLESCHKO, K.; NAVARRO, H.; WERNER, G.; ZEBROWSKI, C., 1993: *Terra*, Vol. 11 (número especial: Tepetates de México, caracterización y habilitación para la agricultura), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, 72 p.

SOIL SURVEY STAFF, 1984: *Procedures for Collecting Soil Samples and Methods of Analysis for Soil Survey*, Report Number 1, Soil Survey Investigations, Washington, D.C..

SOIL SURVEY STAFF, 1994: *Claves para la taxonomía de suelos*, Servicio de Conservación de Suelos, Departamento de Agricultura de los E.U.A. (traducción de: ORTIZ SOLORIO, C.A., GUTIÉRREZ CASTORENA, M. del C. y GARCÍA RODRÍGUEZ, J.L.), Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Publicación Especial, 3, 305 p.

VERBEEK, A. A.; MITCHELL, M. C.; URE, A. M., 1982: The Analysis of Small Sample of Rock and Soil by Atomic Absortion and Emission Spectrometry after a Lithium Metaborate Fusion/Nitric Acid Dissolution Procedure, in *Analytica Chimica Acta*, 135, p. 215-228.

The Micromorphological Appearance of Free Silica in some Soils of Volcanic Origin in Central Mexico

Thomas Poetsch, Kyriakos Arikas

Abstract

Some microscopic characteristics of soils with tepetates in the basins of Mexico and Tlaxcala in the central uplands of Mexico are described in detail and interpreted. At the centre of the examination lie various forms of opal found in the area, four different types being distinguished: compact opaline coatings with rhythmically fine layering, porous opals, compacted opals and phytoliths. Porous, as well as compacted opals, also form deposits within the clay coatings. Indications are given to the importance of the changes in wet and dry conditions within the soil. The opals are not only newly formed within the soils, but also partly dissolved. Most of the various forms of opal can best be seen by using phase contrast microscopy.

Keywords: Tepetate - *Mexico - Micromorphology - Tephra - Silica*

INTRODUCTION

Pyroclastics frequently contain a high percentage of volcanic glass (Schmincke, 1988). Because such glasses are very prone to weathering, the pyroclastics themselves are also prone to intensive alteration. In the process of weathering characteristic neoformations, such as clay minerals and secondary oxides, are formed. This is also the case for Quaternary pyroclastics in the central uplands of Mexico. The hardened volcanic soils (*tepetates*), especially in the basins of Mexico and Tlaxcala (Werner *et al.*, 1978) arouse special scientific interest. The questions for the genesis of the hardening and the mineralogical composition of these horizons are of principal interest in this connection. Miehlich (1984, p. 319) found in the hardened soils of older volcanic ashes under climatic conditions A, ustic/isomesic, a morphologically inseparable mixture of silica gel and halloysite. On the other hand, Heßmann (1992) was able to show through phase contrast microscopy of thin sections (Altemüller, 1964), that the silica gel in the *tepetates* formed morphologically distinguishable micro-lamellae and micro-crusts (see also Poetsch, 1979). Later, Oleschko *et al.* (1994) concluded on the basis of the molar ratio of SiO_2/Al_2O_3 in the *tepetate* with halloysitic clay, that silica gel is also responsible for the hardening of soils in these horizons (see also Miehlich, 1978). Recently, Hidalgo (1995) has also examined in detail *tepetates* in the San Miguel Tlaixpan-Texcoco region (Federal State of Mexico) east of Mexico City. During these

investigations, various physical, chemical and mineralogical methods were successfully combined. According to Hidalgo, these *tepetates* are not soil horizons hardened through pedogenesis, but inherited their most important properties from certain compacted rhyolitic tuffs. The compaction occurred directly after the deposition of these tuffs. This information is only a basis —further references can be found in the literature cited.

Although the present work tends very much to continue the work of Heßmann, even if the genesis of the *tepetates* is not discussed here in its total complexity, it deals very much more with the multiplicity of the micro-opals in their various forms and the microscopic aspects of the silica gel dynamics. Several light microscopical examination techniques are combined, the results being supplemented and confirmed through EDXRA.

THE OPALS OF THE RESEARCH AREA

During the examination of about 180 thin sections, it became obvious that silica gel occurs in different forms. For the representation of these different forms of silica gel, samples of macroscopic visible whitish-grey coatings and impregnations were taken, which were free or almost free of carbonate. The samples came from Canoa (San Aparicio), about 8 km (5 miles) NNE of the town of Puebla in the federal state of the same name and from Matlalohcan, about 5 km (3 miles) north of Apizaco in the state of Tlaxcala. Further samples from Tlalpan and Hueyotlipan, also in the state of Tlaxcala, about 22 km (14 miles) WNW of Apizaco, were used to characterise the abundant opal bioliths. Segregations of the opals in deposits alternating with clays are represented from a profile located in the eastern part of Texmelucán in the state of Puebla and the western border of Tlaxcala. Stratigraphically the material from Canoa and Tlalpan may be equated with the Toba-2 layers, and that from Matlalohcan with Toba-4 or possibly Toba-5. The material from Hueyotlipan is also equated with Toba-5. The profile at Texmelucan remains problematical with regard to that it cannot be equated with anywhere else. Possibly they are aeolic deposits of Upper Quarternary age from basins at Puebla-Tlaxcala to the south.

Microscopically the opals may be divided into 4 types:

a) The compacted deposits of opal with fine rhythmical layering

This type of deposit is found in the exposure at Matlalohcan (in tepetate T-4 or T-5) and is shown in Figs. 1 and 2. The layers are 30-100 mm thick, their fine rhythmical

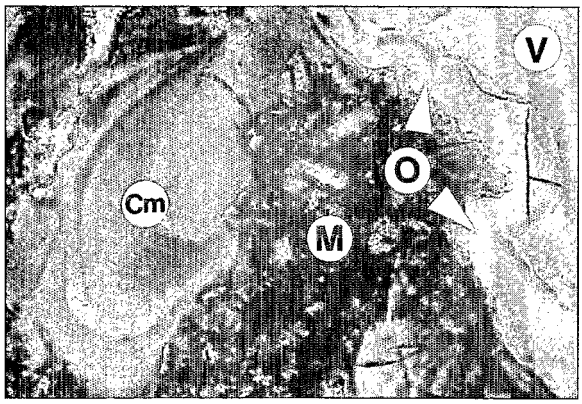


Figure 1
Cm: cutan (mixture clay minerals and opal)
M: matrix
O: opal
V: void
natural size: 196 x 280 µm
plane polarized light (PPL)

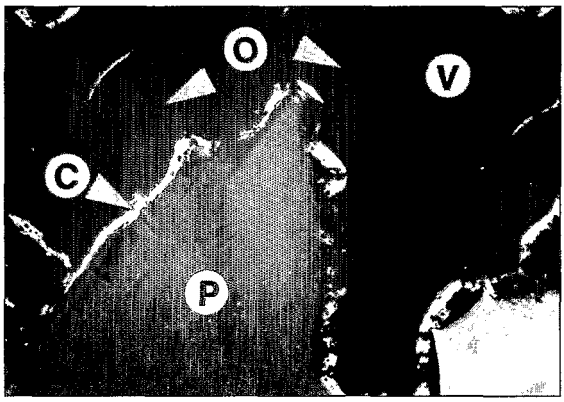


Figure 21
P: plagioclase
C: clay cutan
O: opal
V: void
natural size: 196 x 280 µm
half-crossed polarized light (HXPL)

layering however being only clearly visible in phase contrast. The results of microscopic examination were confirmed through micro-analysis using a micro-probe where several spots on a thin section were directly analysed. The results of such analysis are given here:

Na_2O	0.01	% (g/100g)
MgO	0.00	
Al_2O_3	0.02	
SiO_2	94.69	
K_2O	0.00	
CaO	0.02	
TiO_2	0.00	
MnO	0.00	
FeO	0.01	
Total	**94.75**	

On the basis of the above results, the examined deposits consist mainly of SiO_2, the difference between 94.75 and 100 % being mainly due to the presence of H_2O in the silica gel. A part of the samples was also subjected to x-ray diffraction analysis. A 4.05 Angström peak probably indicates the presence of cristobalite. This is however considered as uncertain, as it may be due to «contamination» of the sample with plagioclase, which show a similar peak.

Concerning the timely sequence of the deposition of the individual secondary deposits as based on the material from Matlalohcan, Fig. 2 shows that the deposition of silica gel occured after that of the clays.

b) Porous opals

Porous opals are especially found as larger masses, mainly as coatings or deposits in coarse pores. The example given here comes from the profile at Canoa (San Aparicio). The porous opals occur in combination with others of varying degree of compaction (Fig. 3, 4 & 5). Thus Fig. 5 shows grains of compact opals and opal lamellae which are separating from porous masses of opal. In addition to analysis with the micro-probe, a sample of pure diatomite, i.e. pure opal, and the separated opal coatings from Canoa were

examined with infra-red-spectroscopy. Both samples produced the same results, thus confirming the microscopic examination.

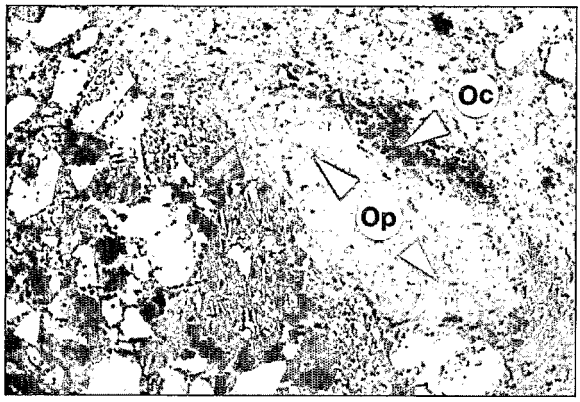


Figure 3
Op: porous opal
Oc: compacted opal
natural size: 196 x 280 µm
hal-crossed polarized light (HXPL)

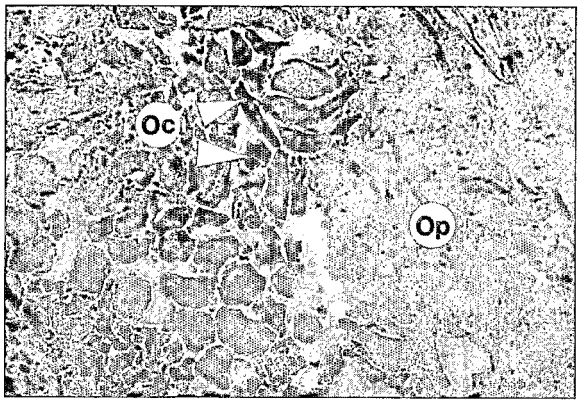


Figure 4
Op: porous opal
Oc: compacted opal
natural size: 196 x 280 µm
plane polarized light (PPL)

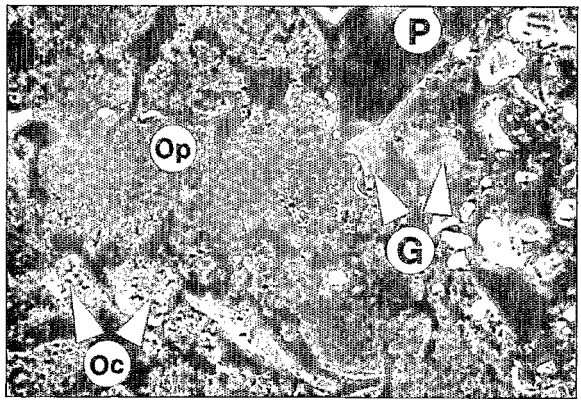


Figure 5
Op: porous opal
Oc: compacted opal
G: glass
P: plagioclase
natural size: 98 x 140 µm
phase-contrast

c) Compacted, non-biogenic opals

In spots with obvious separation from the porous opaline masses (see above), they can be defined with certainty as compacted non-biogenic opals. They are visible as irregularly formed silt-sized grains and lamellae, frequently with a slight convex/concave shape (Fig. 4). However, when they are distributed throughout the ground mass, it is difficult to distinguish them from fragments of biogenic opal. The selected examples belong to the stratigraphic unit T-2 in the profiles at Canoa (San Aparicio) and Tlalpan.

Both types, i.e. the porous and compacted non-biogenic opals, frequently occur as micro-lamellae alternating irregularly with clay cutans (Fig. 6 and 7, profile at Texmelucán, stratigraphically indeterminable). Furthermore both silica gel and clay minerals may also occur as optically undifferentiable mixtures (Fig. 8 and 9; spacial and stratigraphic association as for Fig. 1 and 2). This result becomes obvious only after examination with a micro-probe, e.g.:

Na_2O	0.10	% (g/100g)
MgO	0.77	
Al_2O_3	11.28	
SiO_2	72.17	
K_2O	0.39	
CaO	1.04	
TiO_2	0.36	
MnO	0.04	
FeO	3.05	
Total	**89.20**	

Very noticable is the high Si/Al ratio. The molecular SiO_2/Al_2O_3 quotient here is 10.9 and indicates the presence of free silica gel as a colloid distributed throughout the mass of the clays.

d) Phytoliths

Phytoliths occur as silt-sized, variously shaped particles made up of opal. Fig. 10 (profile at Hueotlypan, tepetate T-5 or T-6) shows rectangular and circular sections of

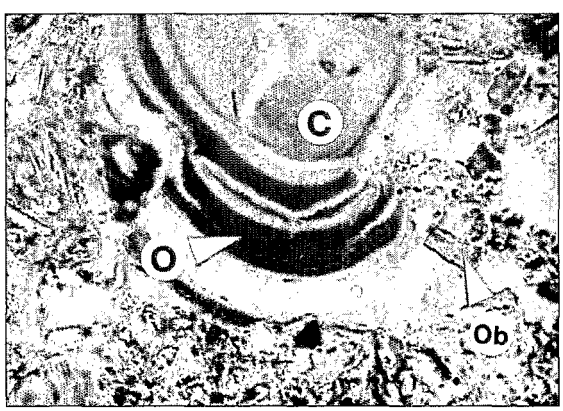


Figure 6
C: clay cutan
O: opal
Ob: phytolith (opal biogenic)
natural size: 196 x 280 µm
plane polarized light (PPL)

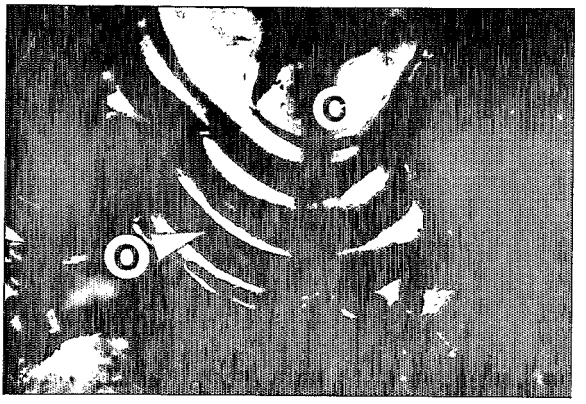


Figure 7
C: clay cutan
O: Opal
natural size: 196 x 280 µm
crossed polarized light (XPL)

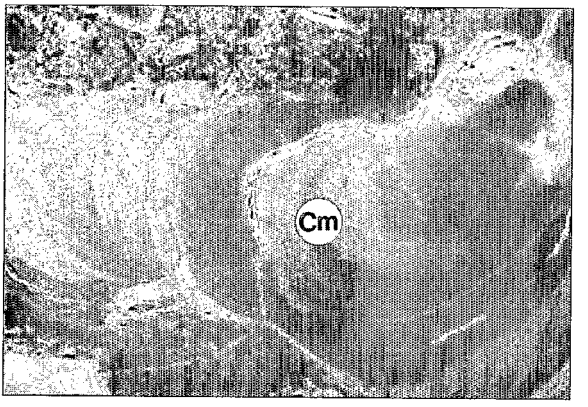


Figure 8
Cm: cutan (mixture: clays minerals and opal)
natural size: 196 x 280 µm
plane plarized light (PPL)

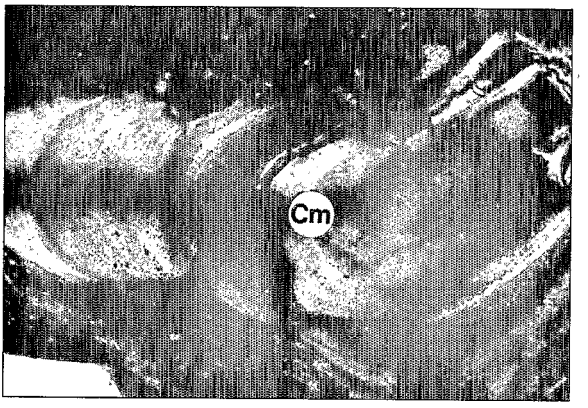


Figure 9
Cm: cutan (mixture: clays minerals and opal)
natural size: 196 x 280 µm
crossed polarized light (XPL)

such opals. They represent mostly "skeletal" fragments of plants. Fragments of diatoms are an indication of a wet or humid environment at least. One of such fragments, seen in the lower half of the photo, has fine transverse ridges which are less than 0,5 mm thick. Part of the irregular opal fragments are probably parts of former opaline microcrusts, which

for example, were worked into the ground mass of the soil through the swelling and shrinking of the clays. Fig. 11 also shows, apart from opals, many glass fragments. These components can be differentiated especially well on the basis of their different refractive indices. When seen in actual colour, the difference in optical colouring in phase-contrast is also of help in distinguishing glass and opal.

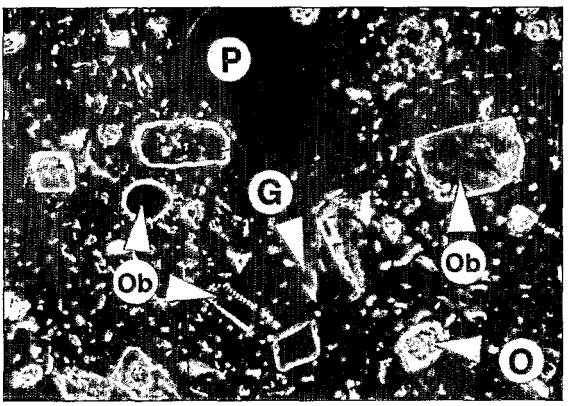


Figure 10
G: glass
O: opal
Ob: phytolith (opal biogenic)
P: plagioclase
natural size: 98 x 140 µm
phase-contrast

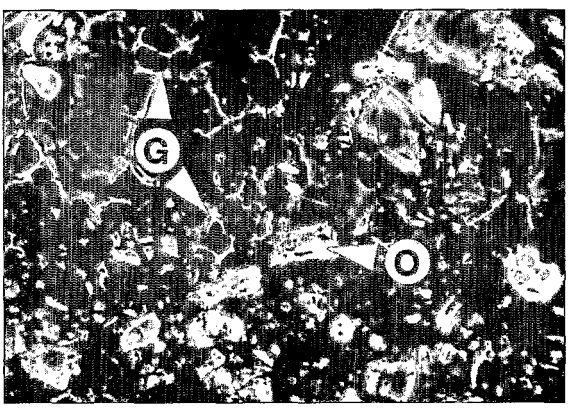


Figure 11
G: glass
O: opal
natural size: 98 x 140 µm
phase-contrast

DISCUSSION

The results of the microscopic examinations show that free silica gel is present in relatively large amounts and in different forms in most of the examined profiles. Compact deposits with rhythmic micro-layering occur in the T-4 or T-5 layers of the profile at Matlalohcan. Part of the opal mass has obviously been changed into an anisotropic mineral which may be chalcedony. This alteration is probably responsible for the great hardness of these tepetates. According to Werner (1994), they are the hardest of the ones examined in the area.

On the walls of larger voids, as for example tubes and cracks, loose masses of opal were deposited. The freshly deposited opals are first very porous and compact later to

denser grains. Such a sequence can be seen in the profile at Canoa. This compactation of the microscopic opals from a porous to a dense state is probably not only due to the loss of water, but is also connected with change in their structure. It is very noticeable that micro-encrustations of opals are frequently also broken up and that they have been worked into the soil matrix. This takes place especially due to shear and sliding movements within the soil caused by swelling and shrinking. Apart from the opaline micro-encrustations, there are probably also deposits of silica gel within the clay complexes. Such silica causes a considerable reduction in the refractive index of the clays (Altemüller, 1974). Clays with low refracting indices can easily be distinguished from the ones with higher indexes with the use of phase contrast microscopy.

In the profiles at Tlalpan (layer T-2) it was possible to take orientated samples from sections with a whitish-grey coating. These were found to be microscopically extremely complex, being characterised by alternate layers of isotropic and anisotropic material, i.e. microscopic layers of opal and deposits of clay minerals. Frequently such layering is terminated by a covering of opal. Such layering reflects most likely the humidity of the soil: When moisture is present, clays (with submicroscopically embedded silica gel) are transported and deposited, while during dry phases diffusion and separation of the gel itself occurs.

The phytoliths represent a special group. A very high enrichment of these was found not only in the sections already mentioned, but in nearly all others examined, especially in the grey toba sediments. Such formation are not only found in the soil profiles, including their immediate subsoils, but also in general in all toba sediments.

There are two possible explanations for this phenomenon:

a) The volcanic ash was deposited so slowly, that any vegetation could always grow out of it when it was covered by more, before it was again covered and died.

b) The toba sediments are, even when they form thick layers, the results of a redeposition of volcanic ash.

The second explanation is, because of the high fraction of opal-phytoliths in nearly all the toba sediments, the more likely, since the pyroclastic which are obviously *in situ* just as the «white sands» of the Sierra Nevada deposits, do not contain any such opal-phytoliths.

The grey toba sediments contain more opal-phytoliths than the brown ones. In the latter the opal-phytoliths frequently show distinct signs of dissolution, resulting in characteristically corroded forms. Such dissolution increases with a higher concentration of iron and is therefore most prevalent in the vicinity of iron stains.

References

ALTEMÜLLER, H.-J., 1964: Die Anwendung des Phasenkontrastverfahrens bei der Untersuchung von Bodendünnschliffen, in *Soil Micromorphology*, A. Jongerius (Editor), Elsevier, Amsterdam, p. 371-390.

ALTEMÜLLER, H.-J., 1974: Mikroskopie der Böden mit Hilfe von Dünnschliffen, in *Handbuch der Mikroskopie in der Technik*, H. Freund (Editor), p. 309-367.

HEßMANN, R., 1992: *Untersuchungen verhärteter Vulkanascheböden (Tepetate) in den Becken von Mexico und Tlaxcala (Mexico)*, Bericht für die Kommission der Europäischen Gemeinschaft, Paris, Gießen, 47 p.

HIDALGO, C., 1995: *Étude d'horizons indurés à comportement de fragipan, appelés «tepetates», dans les sols volcaniques de la vallée de Mexico*, Thèse de Doctorat en Pédologie, Université Henri Poincaré, U.F.R. Sciences & Techniques de la Matière et des Procédés, Nancy, France, 215 p.

MIEHLICH, G., 1978: Eigenschaften und Genese von Verhärtungslagen in Zentralmexiko («Tepetate»), in *Münster. Forsch. Geol. Paläontol.*, 44/45, p. 27-41.

MIEHLICH, G., 1984: *Chronosequenzen und anthropogene Veränderungen andesitischer Vulkanascheböden in drei Klimastufen eines randtropischen Gebirges (Sierra Nevada de Mexico)*, Habilitationsschrift, Universität Hamburg, Hamburg, 417 p.

OLESCHKO, K.; ZEBROWSKI; C., QUANTIN, P.; FEDOROFF, N.; OSORES, E., 1994: Hardened Volcanic Soils (*Tepetate*) in Mexico: Their Geological, Pedological or Anthropological Origin, in *Transactions of the 15th World Congress of Soil Science*, Vol. 6a, Acapulco, Mexico, p. 229-249.

PICHLER, H.; SCHMITT-RIEGRAF, C., 1993: *Gesteinsbildende Minerale im Dünnschliff*, Enke, Stuttgart, 233 p.

POETSCH, T., 1979: Mikromorphologische Untersuchungen zur Genese der Barroböden im zentralen Hochland von Mexiko, in *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.*, 29, p. 747-750.

SCHMINCKE, H.-U., 1988: Pyroklastische Gesteine, in *Sedimente und Sedimentgesteine*, Füchtbauer A. (Editor), Schweizerbart, Stuttgart, p. 731-778.

WERNER, G., 1994: Interview.

WERNER, G.; MIEHLICH, G.; AEPPLI, H.; SCHÖNHALS E., 1978: *Bodenkarte des Hochbeckens von Puebla-Tlaxcala und seiner Randgebiete*, M 1:100.000, Gießen.

Caracterización mineralógica de los tepetates tipo fragipán del valle de México

Claudia Hidalgo, Paul Quantin, Françoise Elsass

Abstract

The tepetates *of Mexico Highlands are indurated horizons with fragipan properties.* Tepetates *appear among pyroclastic deposits on the western slopes of Sierra Nevada. These materials are derived from three recent and successive pyroclastic deposits (T1, T2, T3). A soil profile located near Texcoco, Mexico, including tepetate layers was studied. Mineralogical and microscopical features of this profile were studied using a series of methods. This report the main results of the study. Tepetates were characterized by several features: first, the nature of their parent material; second, a close matrix microstructure and third, their colloidal fraction. The latter is conformed mainly by laminated 1:1 to 2:1 mixed layer minerals made of flaky layers. These features can explain the fragipan properties of tepetates and most of their mechanical behaviour.*

Keywords: Tepetate - *Mexico - Mineralogy*

INTRODUCCIÓN

Los «tepetates tipo fragipán» son horizontes duros de origen volcánico que reciben esta denominación por presentar características similares a las de los fragipanes: son duros cuando están secos pero friables y/o plásticos después de humedecerlos (Peña y Zebrowski, 1992). Estos tepetates cubren una parte considerable del piedemonte de la Sierra Nevada en el altiplano central mexicano, lo que ha provocado graves problemas de manejo agrícola y la esterilidad de estas áreas. La recuperación de las zonas con tepetates (entre otros los de tipo fragipán) en México condujo al desarrollo de un programa de cooperación (CEE/ORSTOM N° TS2-212-C) denominado «Estudio de los suelos volcánicos endurecidos (tepetates) de los valles de México y Tlaxcala (México)», orientado, por un lado, hacia el conocimiento de la naturaleza, del origen y de la formación de los tepetates, y por otro, a su rehabilitación agrícola y su conservación. El presente trabajo se inscribe en el marco general de ese programa y pretende aportar elementos que contribuyan al estudio de estos horizontes duros.

La caracterización mineralógica de los tepetates tipo fragipán se inició hace algunos años con los trabajos realizados por Hidalgo (1991) y Quantin *et al.* (1992), investigaciones dirigidas principalmente al conocimiento de la naturaleza del material de origen. Posteriormente, se estudiaron en detalle los minerales primarios y las arcillas (Hidalgo *et al.*, 1992, 1993, 1994, 1995). Dados los numerosos resultados obtenidos de esos

trabajos y el carácter de este III Simposio Internacional sobre suelos endurecidos y estériles, se consideró que lo más conveniente sería presentar un resumen de los aspectos más relevantes, discutirlos y mostrar su contribución al conocimiento de los tepetates tipo fragipán del valle de México. Se presentarán también algunos de los resultados correspondientes al estudio microestructural que complementó este trabajo mineralógico.

PRESENTACIÓN DEL MATERIAL DE ESTUDIO

La presencia de los tepetates fragipán está limitada por factores topográficos y climáticos. Aparecen solamente en el piedemonte a altitudes comprendidas entre 2.400 y 2.800 m.s.n.m., en clima subhúmedo y en un régimen ústico-isomésico que se caracteriza por una estación seca que dura de 5 a 6 meses (Dubrœucq *et al.*, 1991). Para el estudio, se seleccionó un perfil de referencia (figura 1) ubicado en el piedemonte de la Sierra Nevada, cerca del poblado de San Miguel Tlaixpan. En el perfil se localizaron tres niveles de tepetates (t2a, t2b y t3), que se encuentran intercalados entre otros horizontes de suelo, constituyendo, en conjunto, cuatro series de depósitos piroclásticos denominados T1, T2, T3 y T4 (Hidalgo, 1995).

Las series de material piroclástico presentan diferentes características. La serie T4 tiene un espesor variable, corresponde a emisiones volcánicas de más de 21.000 años (Miehlich, 1991) y se identifica en el terreno por su color pardo ligeramente rojizo. Las siguientes dos series, también de espesor variable, son mas recientes: T3 de 21.000 a 12.600 años B.P. y T2 de 12.600 a 8,500 años B.P. Esta última se identifica fácilmente en el terreno por su color claro (casi blanco o gris claro). La serie T1 corresponde a materiales volcánicos acarreados por el viento y su edad está comprendida entre 8.500 y 3.000 años B.P. Está recubierta por depósitos areno-limosos de tipo eólico-coluvial que forman el suelo actual, en el que se encuentran frecuentemente fragmentos de cerámica, obsidiana y cenizas volcánicas recientes.

Se considera que los tres niveles de tepetate estudiados (t2a, t2b y t3) son tobas de material piroclástico con un nivel de alteración intermedio (Bertaux y Quantin, 1994). Los tepetates t2a y t2b son horizontes duros, de color claro casi blanco (t2a) o grisáceo (t2b) que siguen la pendiente natural del terreno aflorando frecuentemente a la superficie como resultado de la erosión. Estos dos tepetates tienen una estructura prismática bien desarrollada en su base y bastante fragmentada hacia la parte superior en donde se torna poliédrica. El tercer nivel de tepetate (t3) se caracteriza en el terreno por su color pardo-rojizo; su textura es limo-arcillosa, presenta una estructura prismática bien desarrollada y en las caras de los prismas se observan manchas oscuras de color pardo o negro que corresponden a revestimientos o nódulos de óxido de hierro y/o manganeso.

TÉCNICAS Y MÉTODOS DE ANÁLISIS

Con el objeto de determinar algunas características de tipo mineralógico y microestructural que nos permitieran caracterizar mejor a los tepetates fragipán, se utilizaron los siguientes métodos y técnicas:

- observaciones y estudios en microscopio a diferentes niveles: microscopio óptico (MO), electrónico de barrido (MEB), electrónico de transmisión (MET), microanálisis por espectrómetro de selección de energía (EDS) y microdifracción electrónica;
- técnicas analíticas: análisis químico total por el método «triácido» (Betremieux, 1948);
- técnicas mineralógicas: análisis por difracción de rayos X, análisis térmico diferencial (ATD) y gravimétrico (ATG), espectroscopía infrarroja (IR).

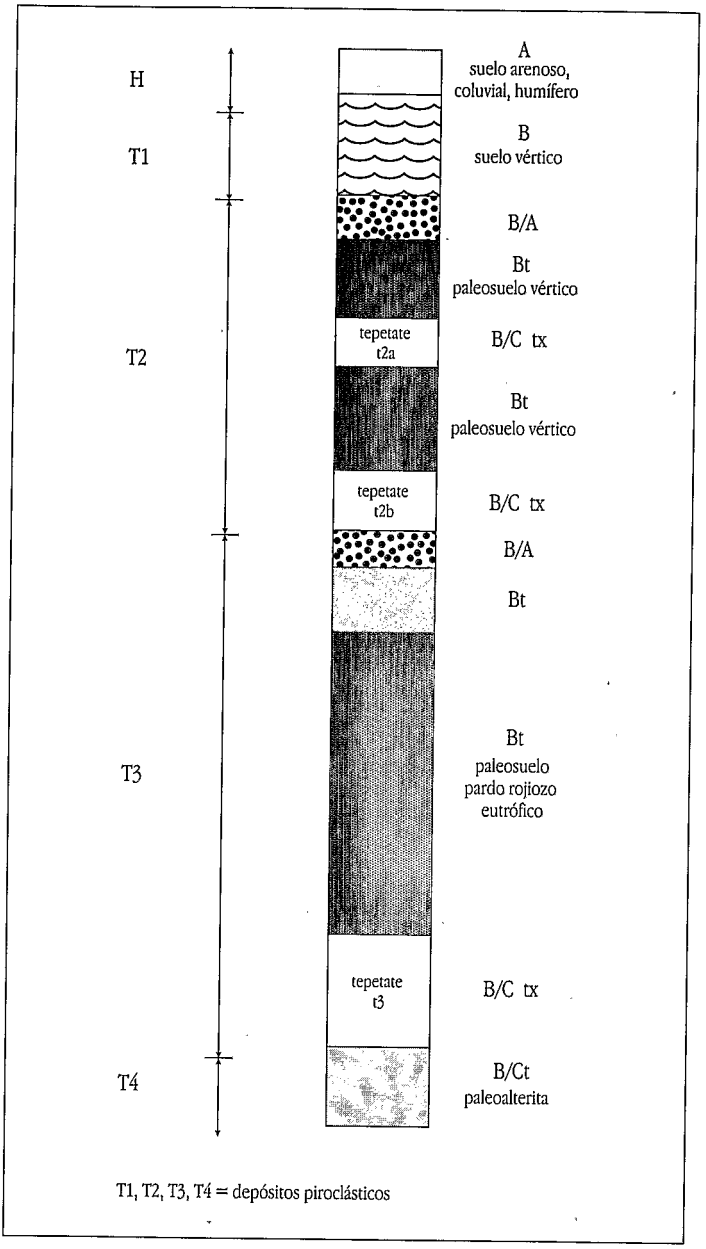


Figura 1 - Perfil de estudio

Se realizó también una estimación semi-cuantitativa de los minerales primarios presentes en la fracción gruesa (50 - 500 µm) por medio de técnicas petrográficas.

RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE ORIGEN

Las observaciones en microscopio óptico y electrónico de *frottis* y de láminas delgadas mostraron que el material original de los tepetates está constituido principalmente de fenocristales de cuarzo, plagioclasas, feldespatos potásicos, anfíboles y piroxenos; de fragmentos de vidrio volcánico; de cristobalita, de fitolitos y solamente en los horizontes de la serie T2b, de diatomeas. Los anteriores componentes minerales se presentaron con diferentes grados de alteración y algunos casi inalterados.

La determinación de los minerales primarios que componen la fracción gruesa del suelo (50 - 500 µm) se realizó mediante técnicas petrográficas (Hidalgo, 1995) y observaciones en microscopio óptico y electrónico de barrido en *frottis* y en láminas delgadas, complementándose con el análisis por difracción de rayos X. Por otro lado, la naturaleza del material de origen se determinó mediante análisis químico, empleando para ello la técnica del «triácido». Las observaciones y estudios en microscopía óptica y electrónica de los minerales primarios, así como los resultados del análisis químico «triácido», corroboran la naturaleza de las cuatro series de material piroclástico (T1, T2, T3 y T4) que originan los tepetates fragipán. La serie T4, cerca de la base del perfil, es la más antigua (21.000 a 35.000 años B.P.) y comprende los horizontes h-9 a h-11. La serie T3, de menos de 21.000 años B.P., comprende los horizontes h-6 a h-8. Ambas presentan porcentajes importantes de hornblenda (90 %) y poca hiperstena (< 10 %). Su composición es semejante a la de las riolitas alcalinas. Las otras dos series, cerca de la superficie —serie T2 que comprende los horizontes h-5 a h-4, y serie T1 los horizontes h-3 a h-2— son las más recientes, presentan una composición mineralógica con porcentajes importantes de hornblenda (50 - 60 %) e hiperstena (30 - 40 %) muy similar a la de las riodacitas. De estas dos series, la T2 es la más básica y se caracteriza también por presentar porcentajes de augita entre 10 y 12. Una excepción en estas series constituye el horizonte h-3 cuya composición mineralógica es semejante a la de las series ricas en hornblenda (79 %) aunque tiene un porcentaje de hiperstena relativamente considerable (17 %). Los porcentajes de residuo obtenidos después de la disolución de los minerales secundarios mediante el reactivo «triácido» caracterizan el grado de alteración del material de origen. El horizonte h-1, con una tasa de residuo del 74 %, corresponde a los depósitos más recientes, en tanto que los horizontes de tepetate h-5, h-7 y h-11 presentan tasas de residuo (53 %, 44 % y 52 % respectivamente) mayores a las de los horizontes de suelo (h-4, 44 %; h-6, 30 %; h-10, 45 %) sobreyacentes a la misma serie, que presentan el menor grado de alteración.

RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS MINERALES SECUNDARIOS

Los difractogramas de rayos X de las preparaciones orientadas de la fracción arcilla fina (< 0,5 µm) de los horizontes de suelo presentan un pico a 4,45 Å de mayor tamaño que los que aparecen a 7,56 Å y 3,56 Å, lo que revela que las arcillas de los horizontes de suelo presentan problemas para su orientación. Después de la saturación con etilén glicol (EG), se observa el aspecto «irracional» de las reflexiones principal (7,56 Å) y secundaria (3,56 Å), el mismo que se manifiesta por el desplazamiento de estas reflexiones, la primera de 7,56 Å → 7,49 Å y la segunda de 3,56 Å → 3,62 Å. Este comportamiento y la aparición de una pequeña curva cerca de 10 Å indican la presencia de minerales arcillosos interestratificados de tipo 1:1/2:1 en los horizontes de suelo. Por el contrario, los difractogramas de las preparaciones orientadas de la fracción arcilla fina (< 0,5 µm) de los tepetates muestran la atenuación bastante importante del pico a 4,45 Å respecto al de 7,56 Å y 3,56 Å, lo que indica que en el caso de los tepetates las arcillas se orientan bien.

La saturación con etilén glicol (EG) muestra que las reflexiones principal (7,56 Å) y secundaria (3,56 Å) presentan también un aspecto «irracional», así como una ligera curva cerca de 10 Å, confirmando con ello la presencia de interestratificados de tipo 1:1/2:1, como en el caso de los horizontes de suelo. Un caso especial corresponde al tepetate t2b, en el que la preparación orientada (fracción < 0,5 µm) presenta una banda importante entre 19 Å y 14 Å, la misma que se desplaza cerca de 20 Å como resultado de la saturación con el EG pero queda bien desarrollada entre 13 Å y 10 Å después de la calcinación a 500 °C. Este comportamiento revela que en este tepetate predomina una arcilla de tipo 2:1.

Las observaciones en microscopio electrónico de transmisión (MET) muestran que tanto en los horizontes de suelo como en los de tepetate, las arcillas son de diferentes formas: plaquetas (hojuelas o láminas) subangulosas y/o ovoides, en ocasiones con bordes parcialmente plegados. También hay arcillas enrolladas, de forma esférica, en ocasiones tubulares, o bien de formas irregulares a veces parecidas a madejas de hilo y a espigas de maíz.

A fin de completar la caracterización de las arcillas identificadas, se procedió a determinar su composición química por microanálisis (EDS). Las formas enrolladas son menos aluminosas, ligeramente más ricas en sílice, magnesio y potasio que las arcillas en forma de plaquetas (ovoides, subangulosas), lo que indica que las primeras presentan un componente 2:1 que, de acuerdo a los considerables porcentajes de magnesio y aluminio, podría ser de tipo beidellita. Por el contrario, las formas de plaquetas presentan una composición química que se asemeja a los minerales arcillosos de tipo 1:1. Por último, los análisis térmico diferencial (ATD) y gravimétrico (ATG) confirman la presencia de arcillas 2:1 en los horizontes de suelo y de tepetate. Sin embargo el componente 2:1 es más importante en los horizontes de tepetate que en los horizontes de suelo de la misma serie, lo que podría considerarse como una característica distintiva de los tepetates fragipán.

RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LAS FORMAS Y LOCALIZACIÓN DE LA SÍLICE PRESENTE

Se identificaron dos tipos de formas de sílice: cristalinas y no cristalinas. Las primeras fueron el cuarzo y la cristobalita y las segundas los fitolitos, los vidrios volcánicos, el ópalo-A y los geles de sílice. La cristobalita se identificó claramente en la fracción fina (< 0,5 µm), una vez obtenido el difractograma de rayos X del residuo resultante del ataque ácido («triácido») de esta fracción. Se presenta un pico bien desarrollado a 4,07 Å, característico de este mineral. La presencia de fitolitos y de vidrios volcánicos se manifestó claramente a partir de las observaciones de *frottis* de la tierra fina (500 - 50 µm). Ambos presentan diferentes tamaños. En el caso de los fitolitos, pueden llegar a medir hasta 200 µm y en el de los vidrios volcánicos hasta 400 µm; los dos están igualmente presentes tanto en los horizontes de suelo como en los de tepetate. El microanálisis EDS permitió obtener su composición química: los fitolitos presentan contenidos de ≈ 93 % de SiO_2 y los vidrios volcánicos una naturaleza alcalino-sódica.

En las formas de sílice no cristalinas, se identificó la presencia de ópalo-A, que aparece frecuentemente formando microzonas de algunos micrometros cuadrados de superficie, ricas en sílice y que se distribuyen al azar por toda la microestructura (matriz y rasgos pedológicos). Las observaciones en detalle de las microzonas muestran que están constituidas por un conjunto de laminillas más pequeñas que forman estructuras que denominamos «nido de abeja». La naturaleza del diagrama de microdifracción de un conjunto de estas laminillas, semejante al de un producto no cristalino, y su composición química (98 % SiO_2 y trazas de aluminio) confirman la presencia de ópalo-A. La última forma

de sílice identificada fueron los geles que aparecieron claramente después de observar en MET algunos cortes ultra-delgados de un relleno de naturaleza aparentemente arcillosa en el tepetate t3. Su composición química, obtenida por microanálisis EDX, muestra su naturaleza silícica y alcalino-sódica (76 - 63 % SiO_2, 13 - 4 % K_2O, ≈ 3 % Na_2O).

RESULTADOS DEL ESTUDIO MICROESTRUCTURAL

Los resultados de las observaciones en microscopio óptico (MO) y electrónico de barrido (MEB) de secciones delgadas de diversos horizontes de suelos y de tepetates muestran rasgos pedológicos que permiten diferenciar los horizontes de suelo de los de tepetate. La característica distintiva de los tepetates es su matriz compacta heredada de la toba, el material de origen, un esqueleto conformado por fenocristales, microlitos y trozos de vidrios volcánicos inalterados y angulosos que presentan una distribución porfírica. Los tepetates t2a, t2b y t3 pueden, a su vez, diferenciarse entre sí por el grado de evolución de su microestructura: t3 > t2a > t2b. Las observaciones en microscopio óptico muestran una incipiente actividad biológica, en especial del tepetate t2b, lo que confirma que se trata de un horizonte de alteración mineral (horizonte «C»). El tepetate t3 presenta frecuentemente en su matriz revestimientos y rellenos de color amarillo claro que, de acuerdo a sus características podrían ser de material arcilloso. El microanálisis (EDS) confirmó que, efectivamente, una parte importante de estos rasgos edafológicos se compone de arcillas que se caracterizan por tener bajos porcentajes de hierro, y relaciones moleculares que varían de 4 a 5 para «ki» y de 3 a 4 para «kr». En t3, ciertas zonas de la masa basal y algunos revestimientos alrededor de los poros y canales presentan porcentajes elevados de SiO_2, que en ocasiones pueden alcanzar hasta 78 % SiO_2 y que, evidentemente, no pueden corresponder a filosilicatos.

DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permitieron, por una parte, plantear una serie de características mineralógicas y microestructurales distintivas de los tepetates tipo fragipán, y por otra, avanzar en el conocimiento del comportamiento de estos horizontes duros.

Características principales de los tepetates tipo fragipán

La naturaleza del material de origen

Los tepetates tipo fragipán están constituidos por material piroclástico de composición similar a la de las riolitas alcalinas y sódicas. Son series que tienen más de 12.000 años de edad. Este material está poco alterado por lo que presenta cantidades considerables de minerales primarios residuales. Los más abundantes son la hornblenda y la hiperstena; la proporción de ambos, la presencia de augita en ciertos horizontes y la edad de las series piroclásticas definieron bien las cuatro series de material piroclástico identificadas en el terreno (T1, T2, T3 y T4) que presentan un carácter más básico cuanto más recientes son.

El carácter compacto de la matriz

Los tepetates tipo fragipán se caracterizan por una matriz consolidada lo que confirma que este horizonte duro corresponde en realidad a un estado intermedio en la alteración de una toba (Bertaux y Quantin, 1994). Otras características de la matriz heredadas de la toba confirman su origen: un esqueleto compuesto de fenocristales, de microlitos y pedazos de vidrio inalterados y angulosos y la distribución «porfírica» en el seno de la matriz de los mismos; la

distribución del tamaño de las partículas en donde predominan los limos finos y la arcilla, lo cual es característico del producto de la alteración de cenizas volcánicas (Quantin *et al.*, 1992). La única incógnita que subsiste a este respecto se refiere al origen de la toba y del tepetate: ¿provienen los dos de un material homogéneo o de dos depósitos sucesivos del mismo episodio eruptivo? Esto podría constituir un tema de futuros estudios.

La presencia de minerales arcillosos interestratificados de tipo 1:1/2:1 con predominio del componente 2:1 y estructurados en «plaquetas orientadas»

Este es un criterio discriminante respecto a los horizontes de suelo de la misma serie de depósitos piroclásticos. Implica un arreglo de las partículas de arcilla «cara a cara» y por lo tanto una fuerte cohesión de la matriz. Este ordenamiento de las arcillas podría haber sido inducido por la textura microlaminar de la matriz de la toba de la que provienen ya que el plasma arcilloso se originó en la alteración de los vidrios volcánicos y de los minerales primarios más pequeños y fácilmente alterables.

Contribución al estudio del comportamiento del tepetate tipo fragipán

La estructura compacta de la matriz del tepetate fragipán ha sido modificada por una serie de procesos, lo cual explica en gran medida algunas de sus propiedades y parte de su comportamiento.

La alteración de los vidrios y minerales finos produjo dos efectos opuestos: por una parte, disminuyó la masa basal y desarrolló una microporosidad inframicroscópica (< 1 µm); por otra, reforzó la cohesión de la matriz por la formación de un plasma (parte fina de la matriz) constituido de minerales arcillosos interestratificados 1:1/2:1 con predominio de arcillas 2:1, óxidos e hidróxidos de Fe y Mn y geles de sílice y microzonas de ópalo-A. La naturaleza (composición química y mineralógica) de la parte fina de la matriz explica la capacidad importante que presenta el tepetate fragipán de aumentar y reducir su volumen (hincharse y contraerse) —del 5 al 15 %— y el carácter reversible de su comportamiento, duro en estado seco y frágil en húmedo, pudiéndose también desagregar en agua. Esto muestra claramente que en el caso de los tepetates fragipán no existe un cementante estable como en los duripanes y los horizontes petrocálcicos. Por lo tanto, la redistribución y acumulación de los productos de alteración (minerales arcillosos, óxidos e hidróxidos de Fe y Mn, geles de sílice) en la matriz del tepetate así como en los poros, fisuras y canales, ha contribuido ciertamente a la consolidación del tepetate fragipán. Sin embargo, no se trata de una cementación ni de un factor que determine su carácter compacto.

El bajo grado de alteración del material de origen, una estructura continua y compacta de la matriz (porosidad total < 40 %), un reducido volumen de macroporos (< 40 %), y la oclusión de canales, fisuras y poros por productos de iluviación, explican que la densidad aparente del tepetate fragipán sea ligeramente superior a la del horizonte de suelo sobreyacente, así como la conductividad hidráulica lenta (0,3 a 0,5 mm/h) y los valores reducidos (< 9 %) de la macroporosidad (poros > 10 µm) la cual puede ser en ocasiones casi nula.

Los tepetates tipo fragipán se caracterizan por una estructura prismática y/o poliédrica, resultante de los procesos de compresión y expansión provocados por la alternancia de las estaciones seca y húmeda.

Referencias bibliográficas

BERTAUX, J.; QUANTIN, P., 1994: Relation géométrique et variations minéralogiques des différents termes d'une séquence d'altération de tufs pyroclastiques de la région de Texcoco (Mexique), dans *Transactions of the 15th International Congres of Soil Science*, Vol. 5, Acapulco, México, p. 232-233.

BETREMIEUX, R., 1948: Méthodes aux réactifs triacides, dans *Traité pratique de chimie végétale*, Tome II, Éditions Brumel, p. 87-102.

DUBRŒUCQ, D.; QUANTIN, P.; ZEBROWSKI, C., 1989: Los tepetates de origen volcánico en México. Esquema preliminar de clasificación, en *Terra*, Vol. 7, 1, p. 3-12.

HIDALGO, C., 1991: *Contribution à l'étude des sols volcaniques indurés* (tepetates) *de la région de México (cimentation, induration)*, D.E.A. de Pédologie, Université de Nancy I-ORSTOM, France, 57 p.

HIDALGO, C., 1995: *Étude d'horizons indurés à comportement de fragipan, appelés « tepetates », dans les sols volcaniques de la vallée de Mexico*, Thèse de Doctorat en Pédologie, Université Henri Poincaré, U.F.R. Sciences & Techniques de la Matière et des Procédés, Nancy, France, 215 p.

HIDALGO, C., ELSASS F., QUANTIN, P., 1994: *Étude de la microstructure d'un horizon volcanique induré* (tepetate) *de la vallée de Mexico par microscopie électronique à transmission*, Journées de Pédologie, ORSTOM Bondy, France.

HIDALGO, C., QUANTIN, P., ZEBROWSKI, C., 1992: La cementación de los tepetates: estudio de la silicificación, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM/Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 192-201.

HIDALGO, C.; BERTAUX, J.; QUANTIN, P., 1993: Form of Silica in Indurated Volcanic Soils of the Mexico Valley, in *Proceedings of the 10th International Clay Conference*, Adelaide, p. 487-493.

MIEHLICH, G., 1991: *Chronosequences of Volcanic Ash Soils*, Hamburger Bodenkundl. Arbeiten, 15, 207 p.

PEÑA, D.; ZEBROWSKI, C., 1992: *Estudio de los suelos volcánicos endurecidos* (tepetates) *de las cuencas de México y Tlaxcala (México). Informe del mapa morfopedológico de la vertiente occidental de la Sierra Nevada*, anexo al informe final, Contrato CCE-ORSTOM N° TS2-0212, 101 p.

QUANTIN, P.; ZEBROWSKI, P.; DELAUNE, M.; HIDALGO, C., 1992: El material original de los tepetates t2 y t3 de la región de Texcoco (México): *¿loess* o tepetate?, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 178-182.

Secuencia de transformación de un suelo ferralítico en tepetate silicificado en la región de Xalapa (Veracruz, México)

Jean-Pierre ROSSIGNOL, Paul QUANTIN

Abstract

Indurated soils, called tepetates *by the farmers, can be seen in the region of Xalapa, Veracruz, Mexico. They are located in the lower part of a topoclimatic sequence of soils developed on volcanic materials. This sequence, located on the slope of the «Cofre de Perote» volcano toward the Gulf of Mexico, starts at an altitude of 3,500 m. with the successive appearance of andosols and, lower down ferralitic soils and, at an altitude of 1,200 m.,* tepetate *soils. The representative soils were studied within the framework of the morphopedological map of the region. The ferralitic soils are observed in the altitudinal band between 1,200 and 1,500 m. where there is a subtropical climate with only a short dry season. The* tepetate *soils appear in the zone where the dry season is 5 to 6 months long. This work presents the changes from ferralitic soils to* tepetate *soils. This change is progressively developed under two conditions of soils, acidity and alternative redoximorphy according to a climatic transition from an udic to an ustic moisture regime. The silicification of* tepetate *soils is a result of these environmental conditions, with alternative wet and dry seasons.*

Keywords: *Duripan - Silicated* Tepetate - *Degraded Ferralitic Soil - Xalapa - Veracruz - Mexico*

INTRODUCCIÓN

En la región de Xalapa, Veracruz, se observan suelos endurecidos llamados «tepetates» por los agricultores. Están ubicados en la parte baja de una secuencia topo-climática de suelos desarrollados sobre materiales volcánicos. Esta secuencia, localizada en la vertiente del golfo de México, empieza a 3.500 m.s.n.m. con la aparición de Andosoles, seguidos más abajo por suelos ferralíticos, y finalmente, a partir de los 1.200 m.s.n.m. de tepetates (Rossignol *et al.*, 1988). Los solums representativos fueron estudiados en el marco de la elaboración de un mapa morfoedafológico de la región (Rossignol *et al.*, 1987; Geissert *et al.*, 1987) .

Los suelos ferralíticos se encuentran en la franja altitudinal comprendida entre 1.500 y 1.200 m.s.n.m., de clima subtropical con una corta estación seca. Los tepetates aparecen en la zona donde las estaciones secas duran de 5 a 6 meses. En este trabajo se presenta la transición de los suelos ferralíticos a los tepetates.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se elaboró una cartografía morfoedafológica de la región cafetalera a una escala de 1:75.000, cubriendo 1.000 km^2; se describieron y analizaron perfiles representativos y se efectuaron análisis de rutina, de rayos X y totales.

MEDIO AMBIENTE

Fisiografía

La región está dominada por el volcán Cofre de Perote de 4.200 m de altura. Entre los 4.000 y los 1.600 m.s.n.m. se extiende una zona de montaña. La disección del paisaje es marcada. Al pie, entre 1.600 y 600 m.s..n.m., se extiende una zona de *planèzes* (mesetas volcánicas inclinadas y profundamente disecadas) en la que se encuentran los suelos estudiados.

Geología

Predominan los materiales volcánicos que se depositaron durante el Cuaternario. Se trata de coladas basálticas y andesíticas, y de flujos piroclásticos. Los materiales más recientes son cineritas y flujos piroclásticos de la familia de las riodacitas. Capas delgadas (de algunos metros a algunos centímetros de espesor) de cenizas volcánicas se depositaron regularmente en la ultima época del Cuaternario cubriendo gran parte de la región. Los suelos estudiados se desarrollan a partir de las cineritas y de los flujos piroclásticos.

Vegetación y cultivos

En la parte superior, la vegetación natural está constituida por una selva caducifolia y los cultivos son de café y maíz. En la parte inferior se encuentran selva tropical baja, praderas y cultivos de caña de azúcar, frutas tropicales y maíz.

RESULTADOS

La cartografía morfoedafológica puso en evidencia el paso progresivo de suelos ferralíticos a tepetates. Tres tipos de suelos permiten representar los principales estados de transformación del suelo ferralítico en suelo con tepetate silicificado (figura 1):

El primer estado a considerarse es un suelo ferralítico, arcilloso, haloisítico, desaturado, con horizontes redóxicos en profundidad y plintita. Presenta además numerosas caras relucientes sobre los agregados y una reducida porosidad.

El segundo estado es un suelo ferralítico con horizontes redóxicos superficiales y fragipán en profundidad, arcilloso, haloisítico, desaturado, de estructura poliédrica, muy poco poroso; el horizonte redóxico contiene nódulos ferromangánicos; el fragipán presenta una red de vetas grises que dibujan prismas de 20 cm de ancho.

El tercer estado es el suelo con tepetate, suelo ferralítico «degradado», con horizontes redóxicos, nódulos ferromangánicos y duripán (tepetate) subyacente, duro, cementado por sílice y de estructura polígona o prismática (prismas de 20 cm de ancho).

Características de los suelos

Primer estado: Los suelos ferralíticos con horizontes redóxicos en profundidad y plintita

Se encuentran entre los 1.400 y los 1.300 m.s.n.m., comúnmente en las cumbres de las colinas o en las pequeñas mesetas al igual que en las partes altas de las laderas de las colinas.

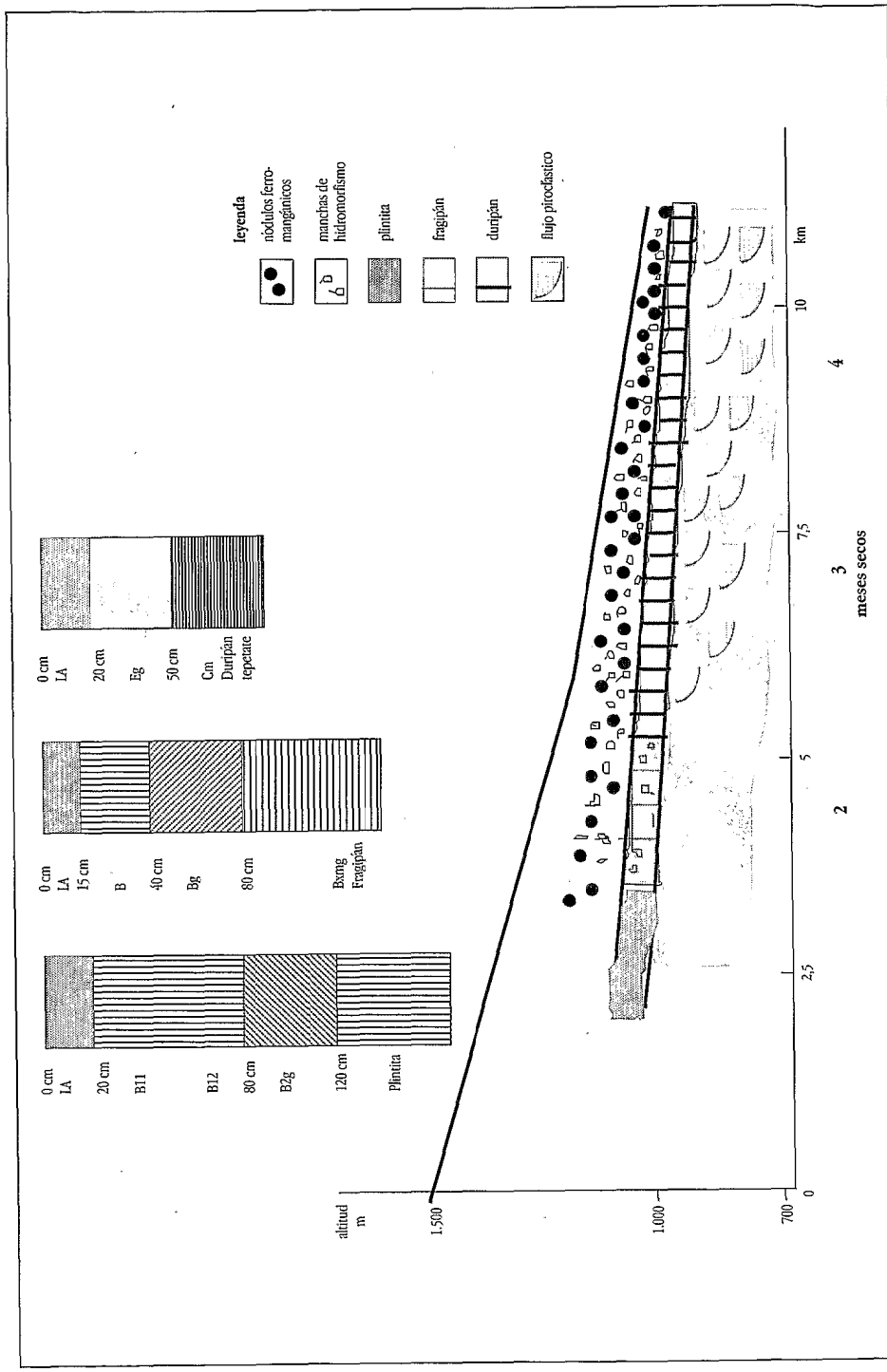


Figura 1 - Secuencia suelos ferralíticos redóxicos - suelos ferralíticos degradados silicificados

Descripción

- Horizontes de superficie LA, generalmente cultivados, de 20 cm de espesor, pardo-oscuros, limo-arcillosos a arcillo-limosos al tacto, de estructura poliédrica o grumosa, porosos;
- horizontes intermedios B1 y B2, de espesor comprendido entre 20 y 80 cm, arcillo-limosos a arcillosos al tacto, de estructura poliédrica, poco a muy poco porosos. En ellos pueden aparecer algunos nódulos ferro-manganésicos y algunas manchas ocres y grises de óxido-reducción;
- por debajo puede aparecer un horizonte de plintita sumamente compacto, con vetas grises y de estructura prismática —prismas de 20 cm de ancho (figura 2).

Características analíticas

Los horizontes superficiales e intermedios tienen una tasa del 50 al 70 % de arcilla, del 15 al 10 % de limo y del 6 al 10 % de arena; la de materia orgánica es del 4 al 5 % en superficie e inferior al 1 % en profundidad, y el valor del C/N de 10 a 11. La CIC presenta un valor de 23 me/100g en superficie y de 15 a 20 me/100g en profundidad. La saturación es inferior al 50 %, entre 30 y 45. El pH (agua) es ácido, de 4,9 en superficie a 6 en profundidad.

Mineralogía

La haloisita es la arcilla predominante: 7 Å en superficie y 10 Å en profundidad. La goethita es abundante en los horizontes redóxicos. Entre los minerales primarios o tal vez secundarios, la cristobalita es abundante.

Horizonte	Haloisita 10 y 7 Å	Arcilla mal cristalizada	Goetita	Cuarzo	Cristobalita	Feldespatos
A 1	++ (7 Å)	tr	+	+	++	ε
B 21	++ (10-7 Å)	tr	+	+	++	tr
B 23g	++ (10-7 Å)	tr	+++	++	+++	tr

ε: trazas ínfimas, tr: trazas, +: poco, ++: mediano, +++: abundante

Geoquímica

El análisis total de la tierra fina (< 2 mm) muestra que las capas superficiales presentan una fracción soluble al triácido que aumenta con la profundidad, una fracción residual que disminuye y una riqueza mayor en minerales primarios alterables en superficie. Esto muestra el depósito en superficie de capas de cenizas riodacíticas que rejuvenecen el suelo (ver cuadro en la siguiente página).

Conclusiones

Los suelos del primer estado son suelos hidromórficos en profundidad con existencia de la plintita que presenta una estructura prismática; la circulación del agua es reducida en profundidad. La relación SiO_2/Al_2O_3 mol. de 2,1 corresponde a la haloisita.

Horizonte	Pérdida al fuego %	soluble triácido %	SiO_2/Al_2O_3 mol.	Fe_2O_3 %	
A1	13,8	75,7	1,95	14,8	
B 23g	10,6	82,7	2,1	24,2	
		composición del residuo			
Horizonte	Residuo %	SiO_2/Al_2O_3 mol.	Fe_2O_3 %	minerales %	
				Cr + Q	F + Fm
A3	20,6	16,9	1,45	71	29
B 23g	16,8	109,5	1,8	95	5

Cr : cristobalita, Q : cuarzo, F : feldespatos, Fm : ferro-magnesiano

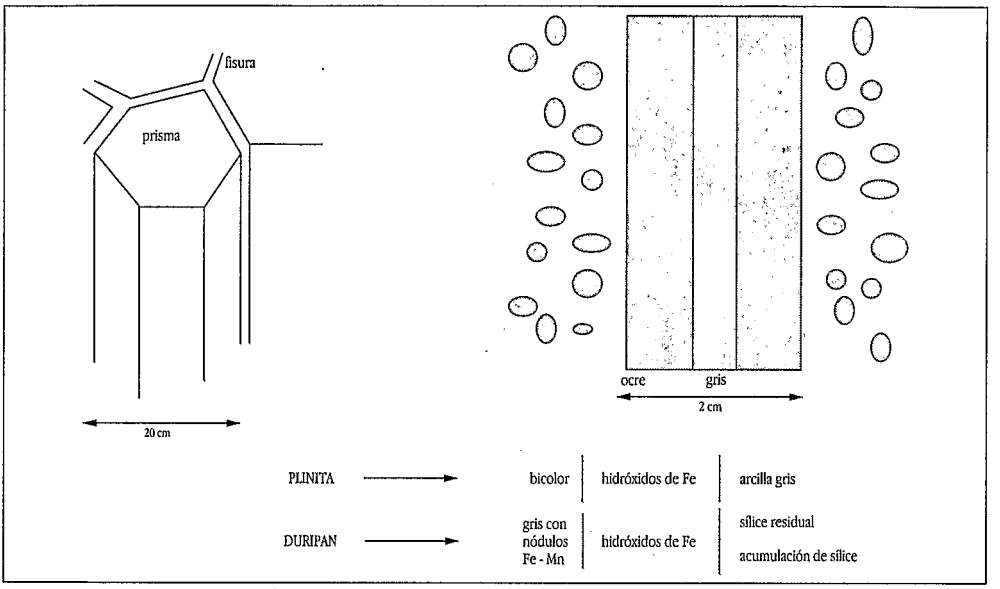


Figura 2 - Evolución de la plintita hacia el duripán

SEGUNDO ESTADO:
LOS SUELOS FERRALÍTICOS CON HORIZONTES REDÓXICOS SUPERFICIALES Y CON FRAGIPÁN EN PROFUNDIDAD

Estos suelos ferralíticos, redóxicos con fragipán, se encuentran entre los 1.300 y los 1.200 m.s.n.m. en posiciones topográficas muy similares a las anteriores.

Descripción

- Los horizontes A, de 15 cm de espesor, son de textura arcillo-limosa, con estructura granular fina y neta, porosos.

- Los horizontes B, ubicados hasta 40 cm de profundidad son arcillosos, con esructura poliédrica subangular fina y neta, pardos, poco porosos.
- Los horizontes Btg, localizados hasta 80 cm de profundidad, son arcillosos, con estructura poliédrica fina y neta con manchas grises y pardo-rojizas y nódulos ferro-manganésicos que aumentan con la profundidad, con caras relucientes y revestimientos arcillosos pardos, muy poco porosos.
- Los horizontes Btxg, de fragipán, arcillosos, presentan una estructura en bloques angulares, una supraestructura en prismas de 20 cm de ancho, muy compactos, con vetas grises a lo largo de las fisuras, revestimientos de sílice en las paredes de los vacíos, nódulos y películas ferro-manganésicos, muy poco porosos.

Características analíticas

La tasa de arcilla es elevada, del 30 al 36 % en superficie, del 40 al 45 % en profundidad; el IDT (índice de Diferenciación Textural, relación entre las tasas de arcilla en los horizontes B y A) varía de 1,3 a 1,5; existe un 30 a 40 % de limo y un 15 a 25 % de arena. El porcentaje de materia orgánica es del 5,4 en el horizonte de cultivo, disminuyendo rápidamente en profundidad (< 1 %); el C/N es de 8,7. El pH (H_2O) es ácido: 4,7 en superficie y 5,0 en profundidad. La CIC varía de 10 a 25 me/100g, y su saturación es variable, dependiendo de las prácticas agrícolas. La arcilla tiene una capacidad de intercambio de 50 a 55 me/100g.

Mineralogía

La haloisita es la arcilla predominante, pero la de 7 Å está presente en todos los horizontes en cantidades superiores o iguales a la de 10 Å. La hematita aparece en profundidad. Los minerales primarios, cuarzo y cristobalita son abundantes.

Horizonte	Haloisita		Arcilla mal cristalizada	Ilita	Hematita	Cuarzo	Cristobalita
	10 Å	7 Å					
A3	++	++	++	tr		++	+
Bx	+	+	+	+	+	+++	++
BTgx	+	++		tr	+	++	++

ε: trazas ínfimas, tr: trazas, +: poco, ++: mediano, +++: abundante

Geoquímica

El análisis total de la tierra fina muestra resultados similares a los del suelo anterior con recubrimientos sucesivos de cenizas volcánicas. La relación SiO2/Al2O3 de 2,1 corresponde a la haloisita (ver cuadro en la siguiente página).

Conclusiones

Estos suelos presentan un hidromorfismo superficial ligado a la lixiviación de arcilla que disminuye la permeabilidad de los horizontes Bt; la circulación del agua es hipodérmica. Los horizontes superficiales contienen minerales primarios ricos en sílice (vidrios riolíticos) liberada por alteración de los mismos. En el horizonte de fragipán se observaron revestimientos enriquecidos con sílice (Campos, 1994).

		composición del soluble		
Horizonte	Pérdida al fuego %	soluble triácido %	SiO_2/Al_2O_3 mol.	Fe_2O_3 %
A3	8,5	60	1,95	12,1
Bx	8	67,4	2,1	22,2

		composición del residuo			
Horizonte	Residuo %	SiO_2/Al_2O_3 mol.	Fe_2O_3 %	minerales %	
				Cr + Q	F + Fm
A3	39,3	7,3	0,63	45	56
Bx	32,2	64,6	0,64	90	10

Cr: cristobalita, Q: cuarzo, F: feldespatos, Fm: ferro-magnesiano

TERCER ESTADO: LOS TEPETATES, SUELOS FERRALÍTICOS DEGRADADOS Y SILICIFICADOS

Condiciones ambientales

El paisaje de la zona tepetatosa está compuesto de mesetas planas o ligeramente onduladas (*planèzes*), sumamente disecadas por profundas hendiduras. Los suelos con tepetates están localizados en las pendientes suaves de las colinas y las partes planas de las mesetas. Se encuentran también en laderas empinadas de las colinas.

Los tepetates se desarrollan en la zona de clima tropical cálido con larga estación seca de 5 ó 6 meses. La temperatura media anual es superior a 23 °C, las precipitaciones varían entre 1.000 y 1.400 mm. En la estación climática de Bella Esperanza, las lluvias medias anuales son de 1.379 mm, la evapotranspiración calculada según el método de Thornthwaite de 1.572 mm; el déficit hídrico anual, teniendo en cuenta una reserva de agua de 100 mm, es de 533 mm y el excedente de 311 mm.

Descripción

El suelo más representativo de la zona tepetatosa presenta dos variantes debido al distinto espesor del suelo ubicado sobre el tepetate:

- en la primera, el suelo superficial tiene un espesor inferior a 40 cm, el segundo horizonte es a menudo discontinuo y el primero puede yacer directamente sobre el tepetate;
- en la segunda, el suelo es de profundidad mediana, entre 40 y 60 cm, el segundo horizonte tiene un espesor de 20 a 40 cm.

El horizonte A, de 0 a 20 cm, es de color gris obscuro a pardo oscuro, de textura limosa al tacto, estructura poliédrica poco neta, medianamente poroso; la parte inferior puede contener algunas manchas grises y ocres de óxido-reducción y nódulos ferromangánicos.

El horizonte Eg o Sg, de 20 a 50 cm de espesor, es de textura limo-arcillosa al tacto, de color pardo grisáceo, estructura poliédrica fina, medianamente poroso, con numerosas manchas grises y ocres de óxido-reducción y nódulos ferromangánicos.

El horizonte superior de tepetate (Btm), de 20 a 50 cm de espesor y más, es de color gris claro a pardo claro, generalmente duro salvo en algunos casos, de estructura columnaria de 20 cm de largo y 50 cm de ancho, porosidad poco importante en forma de cavidades, vacuolas, vesículas y poros. Las paredes de los vacíos están recubiertas de delgadas capas de sílice, a veces coloreadas por el hierro: se trata de un horizonte de duripán.

Por debajo, se alternan capas de tepetate en bloques con estructura prismática y capas laminares de algunos centímetros de espesor.

Las variaciones conciernen el espesor del segundo horizonte que a veces no existe (dos variantes). El hidromorfismo temporal en el horizonte Eg del suelo puede ser muy marcado en el caso de una profundidad reducida o de la presencia de un tepetate muy duro y muy poco poroso. Un horizonte sumamente fino, de algunos milímetros, emblanquecido, puede aparecer entre los horizontes dos y tres, entre el horizonte A y el tepetate.

Características analíticas

El suelo superficial contiene entre un 20 y un 30 % de arcilla, un 40 a un 55 % de limo y un 15 a un 30 % de arena. El segundo horizonte puede contener hasta un 40 % de arcilla. En la superficie, la tasa de materia orgánica varía del 2 al 3 % e incluso hasta el 6 %; en el segundo horizonte pasa al 1 %. El pH (H_2O) es ácido en superficie (4,4) y moderadamente ácido en profundidad (5,7). La capacidad de intercambio catiónico es de 15 a 20 me/100 g de suelo; la saturación en cationes alcalinos y alcalino-térreos es baja, entre el 15 y el 30 %.

Características mineralógicas

La arcilla mineralógica presente es la haloisita de 7 Å. De los otros minerales, el más abundante es la cristobalita, seguida del cuarzo.

Horizontes	Haloisita (7 Å)	Hematita	Cristobalita	Cuarzo
A: 5-20 cm	++	+	++++	++
Eg: 20-50 cm	++	tr	++++	++
Cm: 50 cm y +	++	+	+++	+

tr : trazas, + : un poco, ++: mediano, +++ : abundante

Geoquímica

El análisis triácido de la «tierra fina» (fracción inferior a 2 mm) permite precisar la composición mineralógica (ver cuadro en la siguiente página).

La proporción de residuo indica que el suelo contiene cerca del 30 % de minerales insolubles. Con la profundidad, ese valor disminuye de 29,5 a 25,3. Además, con la composición química del residuo se determinaron los tipos de minerales y sus proporciones: 69 % de minerales silíceos (cristobalita y cuarzo) y 31 % de feldespatos y de ferromagnesianos. Con la profundidad, este último valor disminuye a 21, mientras que el porcentaje de minerales silíceos aumenta a 89. Esto demuestra la existencia de mayor cantidad de minerales alterables en la superficie del suelo, el mismo que ha sido rejuvenecido gracias a un aporte de cenizas riodacíticas.

La composición química del producto de alteración (soluble en triácido) muestra una elevada proporción de óxidos de hierro (15 a 17 % de la fracción soluble) y de óxidos de titanio (7,5 %). El valor SiO_2/Al_2O_3 molar es elevado (2,5 - 2,9) y no corresponde a la composición de una haloisita (valor del orden de 2). Existe entonces una parte de «sílice soluble» que no entra en la composición del mineral de haloisita. Así, se puede afirmar que parte de la «sílice soluble» está presente bajo la forma de sílice libre mal cristalizada (ópalo).

Horizontes	residuo %	composición del residuo			
		SiO_2/Al_2O_3 mol.	Fe_2O_3 %	Q + Cr %	F + Fm %
A	29,5	16,7	1,2	69	31
Eg	22,0	24,4	0,9	88	22
Cm.	25,3	30,5	0,7	89	21

Horizontes	soluble %	composición del soluble	
		SiO_2/Al_2O_3	Fe_2O_3
A	68,4	2,54	17,2
Eg	77,2	2,90	15,5
Cm.	74,4	2,63	15,1

Q: cuarzo, Cr: cristobalita, F: feldespatos, Fm: ferro-magnesiano

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La transición del suelo ferralítico al tepetate se produce bajo dos condiciones de suelos (acidez e hidromorfismo temporal) y bajo condiciones de clima contrastado y cálido. Los suelos ferralíticos presentan un exceso temporal de agua en los horizontes profundos con presencia de manchas de óxido-reducción. Se produce una segregación del hierro, una parte soluble es eliminada por el agua de drenaje a través de las fisuras verticales y otra parte se concentra en los nódulos y en los revestimientos rojizos en la superficie de las arcillas. El exceso de agua origina una desestabilización de las arcillas: primeramente se observan una migración de las arcillas; el IDT aumenta en los suelos ferralíticos del estado 1 al estado 2 (1,3 a 1,5); la porosidad del suelo disminuye, la circulación del agua se torna más lenta, la óxido-reducción se desarrolla. La ferrólisis es incipiente en los suelos ferralíticos en los horizontes profundos (Campos, 1994); por alteración redoximórfica y eluviación de aluminio, los revestimientos arcillosos se cargan de sílice. Sin embargo, las determinaciones mineralógicas y los análisis químicos del suelo global no lo mostraron en los suelos sin tepetates, en la parte alta de la secuencia. Solamente la haloisita pasó de 10 a 7 Å. En la parte inferior de la secuencia en cambio, cuando la redoximorfia aumenta en intensidad, se blanquean los horizontes superficiales y se desarrollan los nódulos de hierro y manganeso. La acidez del suelo es elevada, el pH es inferior a 5 en superficie y aparece el aluminio intercambiable. La sílice «libre» es más abundante en los horizontes del suelo con tepetate presentando un máximo en el horizonte Eg. La circulación lateral del agua puede originar las silicificaciones que se observan en el tepetate, como consecuencia de un proceso alternativo de redoximorfia y alteración de las arcillas en medio ácido.

Referencias bibliográficas

CAMPOS, A., 1994: *El moteado en un suelo bajo clima tropical y formado de materiales volcánicos: un estudio micromorfológico y mineralógico*, Tesis de maestría en ciencias, Colegio de Postgraduados, México, 170 p.

GEISSERT, D.; ROSSIGNOL, J.-P. (coordinador); CAMPOS, A., GUTIÉRREZ, R.; BARRERA, N., 1987: *La morfoedafología en la ordenación de los paisajes rurales, conceptos y primeras aplicaciones en México*, INIREB/ ORSTOM, Xalapa, México, 83 p.

ROSSIGNOL, J.-P.; CAMPOS, A.; GEISSERT, D.; QUANTIN, P., 1988: *Morfoedafología del área Xalapa-Coatepec, Veracruz (México) y sus aplicaciones a los usos agrícola, pecuario y forestal; informe explicativo preliminar de los mapas morfoedafológico, de recursos en tierra y de capacidades de uso, a escala 1:75.000*, INIREB/ORSTOM/ENITHP, 130 p.

ROSSIGNOL, J.-P.; GEISSERT, D.; CAMPOS, A.; KILIAN, J., 1987: *Mapa morfoedafologico a escala 1:75.000 del área Xalapa-Coatepec*, INIREB/ORSTOM/CIRAD, Xalapa, Veracruz, México.

Calibración de los métodos no destructivos en los tepetates del estado de México

Klaudia OLESCHKO, María Eugenia MIRANDA

Abstract

*The new non-destructive techniques, such as TDR and GPR, seem to be based on the universal calibration curve and can be used in most mineral soils for low-cost mapping of soil moisture. The aim of the present work was to test the possibilities and the accuracy of some non-destructive techniques applied to particular soils, called «*tepetates*», which are cemented and indurated. A comparison was done between these methods and traditional techniques.*

Keywords : Tepetate - *Calibration - TDR - GPR*

INTRODUCCIÓN

En los últimos 30 años se han desarrollado numerosos métodos no destructivos con el propósito de realizar estudios aplicados de física de suelos sin alterar la estructura de los medios naturales (Sposito y Reginato, 1992). Estos métodos parecen ser especialmente útiles para el análisis de las capas cementadas tales como los tepetates. Se sabe que las propiedades físicas de estos últimos, evaluadas en muestras alteradas, reflejan de un modo poco exacto su estado estructural real. El contenido de humedad volumétrica, la densidad aparente y la permeabilidad son las propiedades más afectadas por la alteración durante el muestreo. Estas mismas propiedades son las más estudiadas desde el punto de vista de la aplicabilidad de las técnicas no destructivas de análisis. Estas últimas se dividen en directas e indirectas, y se utilizan tanto en campo como en laboratorio.

Mientras las técnicas tradicionales no destructivas e indirectas se basan en las mediciones de la velocidad de los elementos radioactivos o de la intensidad de las emisiones en medios diferentes —métodos de radio-isótopos (Vadiunina y Korchagina, 1986)—, los métodos modernos estiman los tiempos de paso de las ondas electromagnéticas por guías o transectos de longitud conocida —reflectometría del dominio de tiempo (TDR), Jury *et al.*, 1991; radar de penetración terrestre (GPR), Sposito y Reginato, 1992—. Por otra parte, si los métodos tradicionales requieren la obtención de la curva de calibración por cada sitio estudiado (Vadiunina y Korchagina, 1986), las nuevas técnicas tales como el TDR y el GPR, por el contrario, se basan en la curva de calibración universal, que es similar para la mayor parte de los suelos minerales (Sposito y Reginato, 1992). Cuando estos últimos son no salinos, se manejan en la literatura científica con los nombres de suelos «regulares», «típicos» (Dirksen y Dasberg, 1993) o «ideales» (Hook y Livingston, 1995). Sin embargo,

numerosos investigadores han documentado las discrepancias significativas entre los tiempos de paso de las ondas calculados con base en la curva de calibración universal y los tiempos reales en los materiales ricos en vermiculitas, así como en suelos de textura fina y en suelos orgánicos (Topp, 1980; Smith y Tice, 1988; Herkelrath *et al.*, 1991; Dasberg y Hopmans, 1992; Dirksen y Dasberg, 1993).

En México predominan los suelos «atípicos» o «irregulares», correspondiendo una parte importante de ellos a los tepetates, materiales endurecidos por diversos procesos, tanto geológicos como edáficos. El objetivo principal del presente trabajo fue evaluar la aplicabilidad y la precisión de las técnicas no destructivas modernas del análisis físico (TDR y GPR) en el caso de la exploración de las capas cementadas (tepetates). Los datos obtenidos se comparan con los resultados de los análisis tradicionales.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se ubica en la ladera oeste de la sierra de Río Frío y corresponde a terrenos ejidales de San Miguel Tlaixpan, estado de México. Es una zona erosionada con fuertes pendientes y numerosas barrancas, donde las capas endurecidas afloran a la superficie, han sido incorporadas a la agricultura (recuperadas), bajo una cubierta forestal (natural o producto de las prácticas de recuperación), o se encuentran a profundidades diferentes dentro del perfil del suelo. El nombre vernáculo de estas capas, que en su mayoría son materiales volcánicos endurecidos, es «tepetate» (Zebrowski, 1992). Según este autor, las áreas con tepetates cubren alrededor de 30.700 km^2, lo que representa el 27 % de la región neovolcánica de México (Zebrowski *et al.*, 1991), y tienen un alto potencial erosivo. En general, los tepetates son formaciones naturales masivas, cementadas por la arcilla o por diferentes agentes químicos, incluyendo el sílice (Hidalgo, 1991; Hidalgo *et al.*, 1992; Oleschko *et al.*, 1994).

Un estudio detallado de los tepetates del área de interés se realizó en el marco del proyecto internacional «*Study of Tepetates, Indurated Volcanic Soils of the Mexico and Tlaxcala Basins, in View of their Agricultural Rehabilitation*», Acuerdo C.P. ORSTOM, contrato TS2 * 0212 - C (EDB), ORSTOM-Commisión de la Comunidad Europea, cuyos resultados ya fueron publicados (Quantin *et al.*, 1993).

Técnicas no destructivas utilizadas

Micromorfometría

Una primera y aproximada estimación de algunas propiedades físicas de los tepetates se realizó en láminas delgadas de ese material preparadas para el estudio micromorfológico, aplicando los métodos micromorfométricos tradicionales (Oleschko *et al.*, 1994). Las muestras inalteradas del suelo se obtuvieron directamente en el campo, sin necesidad de una impregnación previa. En el laboratorio se utilizó el procedimiento tradicional de Brewer (1964) para impregnar las muestras con resina epoxy HU-543 en condiciones de vacío y para preparar las secciones delgadas de tamaño 2 por 4 cm y grosor de 30 mm. Las láminas delgadas se analizaron en microscopio óptico (OLYMPUS-BH-2).

Para los análisis micromorfométricos se utilizó el analizador automático de imágenes (ZIDAS, Carl Zeiss).

Se cuantificaron los siguientes parámetros físicos: la porosidad total y efectiva (sin considerar el área ocupada por los rasgos pedológicos); el área media del poro; el diámetro máximo (Dmáx.) y mínimo (Dmín.) de los poros; y la distribución de los poros por

tamaño. Se utilizó el modelo morfométrico de Bouma (Burke *et al.*, 1986) para estimar la conductividad hidráulica (K) de los tepetates, según la ecuación:

$$K = \rho g d3_n l/12\upsilon A \quad (1)$$

donde:
ρ es la densidad del agua (kg/m^{-3})
$\mathbf{d_n}$ el ancho del espacio efectivo de la grieta (m)
g la aceleración de la gravedad ($m \cdot s^2$)
υ la viscosidad del agua ($kg \cdot S\text{-}1 \cdot m^{-1}$)
A la superficie considerada en el análisis (m^2)
l la longitud de las grietas en la sección delgada (m).

Con base en la porosidad efectiva (P_{ef}) medida, se estimó la densidad aparente (Dap), aplicando la ecuación:

$$P_{ef} = (1 - Dap/Dr)$$

Utilizando los datos de la porosidad calculada sin tomar en cuenta los rasgos pedológicos, se estimó la densidad aparente de los materiales antes de la cementación.

REFLECTOMETRÍA DEL DOMINIO DEL TIEMPO (TDR)

En el presente trabajo se utilizaron dos equipos de TDR: el equipo manual (TEKTRONIX) y el computarizado (TRASE). Los principios de funcionamiento del TDR son similares a los del radar, por lo que, frecuentemente, el TDR es llamado «pequeño radar». La medición con TDR se basa en el cálculo del tiempo de transmisión de las ondas por el medio y corresponde a la evaluación del intervalo de tiempo que ocurre entre el inicio de la emisión de las ondas electromagnéticas y la recepción de la señal de su reflejo. Este tiempo es proporcional a la velocidad de propagación de la señal. La velocidad de avance de las ondas, cuya propagación por el medio se realiza por un línea de transmisión de longitud conocida, depende de la constante dieléctrica (K) del mismo. A mayor valor de la constante dieléctrica, menor es la velocidad.

El contenido de agua en el espacio poroso del medio define el valor de su constante dieléctrica. La frecuencia de las pulsaciones, el carácter de la línea de transmisión, el tamaño, la geometría y la posición respectiva de las guías transmisoras, son los parámetros decisivos de la calidad de la medición realizada.

Si se utilizan las pulsaciones de frecuencias bajas, el tipo de suelo tiene un efecto pronunciado en las mediciones. Sin embargo, utilizando las frecuencias superiores a 50 MHz se evita esa incidencia (Zegelin *et al.*, 1992).

La constante dieléctrica del suelo como un sistema, medida con TDR, recibe el nombre de constante dieléctrica aparente (Ka) y se calcula mediante la fórmula:

$$Ka = [(tc)/L]^2 \quad (2)$$

donde:
L es la longitud de la línea de transmisión (o la longitud de las guías metálicas, en cm)
t el tiempo de paso de las ondas (ns)
C la velocidad de la luz (igual a $3 \cdot 10^{-10}$ ms^{-1}).

Se ha establecido la relación entre los valores de Ka y el porcentaje de humedad volumétrica y se la utiliza en la curva universal de calibración.

El procesador del TDR incorpora un sistema cronométrico sumamente preciso capaz de medir el tiempo de transmisión en picosegundos (trillonésima parte de un segundo). Cada medición es un promedio de los valores, obtenidos durante una larga serie de ciclos de transmisión de las ondas.

TEKTRONIX

En el presente trabajo se utilizó el Tektronix 1502, uno de los equipos portátiles más tradicionales, conocido como «medidor de la calidad de cables» (*cable tester*), dotado de dos guías metálicas de 52,5 cm de longitud y 0,8 cm de diámetro. El aparato produce un pulso de voltaje y analiza más de 250 puntos de la onda reflejada. La velocidad de propagación de la señal (V_p) depende del material del cable coaxial y en el presente caso fue de 0,67 $m \cdot s^{-1}$. El cable coaxial utilizado tuvo una longitud de 47,7 cm. Previo a las mediciones de campo, el aparato fue calibrado en aire y en agua.

TRASE

Se utilizó el equipo de modelo 6050X1, cuyo diseño se basó en los avances tecnológicos del TEKTRONIX.

RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE (GPR)

Los principios de funcionamiento del GPR son similares a los del TDR. El equipo que se utilizó en el presente trabajo fue el Pulse Ekko 1000, conectado a antenas de 225 y 450 Mhz. Los datos fueron procesados utilizando el programa Seismic Unix, que ha sido eficiente en la distinción entre el ruido y la señal (Grandjean, 1996). Todos los cálculos de las profundidades de los reflectores se realizaron con base en la velocidad de referencia de 0,08 m/ns.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Micromorfometría

Las capas cementadas del perfil de referencia (30) del área estudiada, a pesar de representar diferentes tipos de tepetates (t2: t2a y t2b; t3), se caracterizaron por una porosidad efectiva similar (9-16 %), semejante morfología (fisuras, cavidades y cámaras) y tamaños máximos (0,41 mm) y mínimos (0,13 mm) de poros, una baja conductividad hidráulica modelada (3,34 cm/hr) y una alta densidad aparente (2,12 Mg m^{-3}) estimada. Las principales características físicas de los tepetates, evaluadas mediante las técnicas tradicionales, se presentan en el cuadro 1 (Peña y Zebrowski, 1992).

Comparando los resultados micromorfométricos con los del análisis tradicional, se destacaron las siguientes diferencias significativas:

- la porosidad total de las capas tepetatosas, estimada a partir del análisis de los terrones, es del 51,0 % para las capas t2a y t2b (similar a una capa arable en condiciones físicas óptimas) y del 34,0 % para t3 (capa compactada). Ambos valores son significativamente diferentes a los determinados en las muestras inalteradas y muy superiores a los esperadas para los horizontes cementados;
- la densidad aparente es igual a 1,25 y 1,68 Mg m^{-3} para las capas t2a y t2b, respectivamente, y a 1,66 Mg m^{-3} para t3 (Peña y Zebrowski, 1992). Todos los valores mencionados son menores a 2,12-2,26 Mg m^{-3}, estimado durante el análisis micromorfométrico;

Parámetro	t2a[1](A)	t2b[2](A)	t3[3](A)	t2a(B)[9]	t2b(B)	t3(B)
Db[4] ($Mg \cdot m^{-3}$)	1,25	1,68	1,66	2,26	2,12	2,2
Ptot[5] (%)	50,2	32,5	33,1	13,2/26	16,2	15,3/43
Ks[6] ($cm \cdot hr^{-1}$)	-	-	-	2,7/3,8	3,3	4,6/17
$D_{máx}$[7] (mm)	-	-	-	0,4/0,6	0,48	0,4/0,6
D_{min}[8] (mm)	-	-	-	0,1/0,2	0,13	0,1/0,2

1: tepetate t2a, 124-150 cm, pardo, arcilloso, duro
2: tepetate t2b, 200-220 cm, gris claro, franco-arcillosos, duro
3: tepetate t3, 420-460 cm, pardo amarillento, arcilloso, duro
4: densidad aparente
5: porosidad total
6: conductividad hidráulica a saturación
7: diámetro máximo del poro
8: diámetro mínimo del poro
9: denominador en esta y las siguientes columnas se refiere al mismo parámetro físico, pero sin considerar el área ocupada por el rasgo pedológico

Cuadro 1 - Características físicas de las capas de tepetates del perfil de referencia (30), según Peña y Zebrowski (1992) (A) y según el análisis micromorfométrico (B)

- la conductividad hidráulica no se estimó mediante los métodos tradicionales. Sin embargo, llaman la atención los valores sobrestimados de la retención de humedad reportados por Peña y Zebrowski (1992), donde una capa t2a o t2b retiene 31,5 y 42,8 % de humedad a capacidad de campo (pF = 2,5), mientras que su macroporosidad, medida en las muestras inalteradas, es sólo del 9-16 %. El origen tamizado de la muestra explica estas diferencias debido al acceso del agua por los microporos.

La conclusión más importante del análisis micromorfométrico fue que en comparación con las capas adyacentes, las capas cementadas presentan, por un lado, una clara homogeneidad interna de las propiedades físicas, y por otro, un cambio brusco tanto en su porosidad y densidad aparente como en el contenido de humedad en las fronteras. Este último cambio es la razón principal por la que los límites entre las capas cementadas y otros horizontes pueden ser buenos reflectores de las ondas electromagnéticas, lo que, a su vez, permite suponer la eficiencia del uso del GPR para su identificación.

Reflectómetro del dominio de tiempo (TDR)

El TDR se utilizó en los campos experimentales de los tepetates recuperados de Prat (1994) durante el crecimiento del cultivo. El contenido de humedad volumétrica medido con el TDR en la capa roturada varió entre 0,29 y 0,31 $m^3\ m^{-3}$, datos que fueron similares a los del aspersor de neutrones, reportados por Prat para las mismas fechas. La comparación de los datos de humedad volumétrica con los de humedad gravimétrica, permitió estimar una densidad aparente de 1,26 Mg M^{-3} del tepetate roturado, lo que es inferior a la densidad aparente del tepetate t3 sin roturación determinada con los métodos de terrones.

Radar de penetración terrestre (GPR)

Fueron dos los objetivos principales del empleo del GPR en el presente estudio. Se trató, por un lado, de detectar las capas cementadas que se encuentran a diferentes

profundidades, y por otro, de confirmar la homogeneidad de los tepetates, desde el punto de vista de sus propiedades físicas, detectada en el análisis micromorfométrico. En general, la calidad de los datos no fue suficiente (Grandjean, 1996), ya que las exploraciones se realizaron en tiempos cortos, lo que no permitió seleccionar los mejores parámetros de entrada. Esta deficiencia se expresó en un decaimiento sistemático de todas las señales alrededor de la amplitud cero y una sobreestimación de los intervalos del muestreo en los perfiles obtenidos con la antena de 450 Mhz. Además, todos los límites entre las capas eran horizontales, casi perfectos (indicador del depósito de materiales durante los eventos catastróficos), lo que dificultó su identificación.

Pese a las dificultades mencionadas, la resolución del GPR en los tepetates fue sorprendente. Con la antena de 225 Mhz, en el área testigo de la zona de estudio, se observó una penetración de ondas a más de 3 m de profundidad, detectándose 9 capas reflectoras. En la descripción del perfil 30, Peña y Zebrowski (1992) también reportan 9 capas diferentes que se encuentran exactamente a la misma profundidad que los reflectores detectados por el GPR. Las mejores imágenes se observaron en los límites entre las capas cementadas y las arcillosas (3BC1 y 4B). Se obtuvo una mayor resolución con la antena de 450 Mhz, aunque la penetración en este caso fue menor, llegando aproximadamente a 2,2 m. Según Grandjean (1996), a una profundidad de 5 y 11 m en el tepetate, se observaron señales que indican rasgos muy específicos del subsuelo en la zona de estudio.

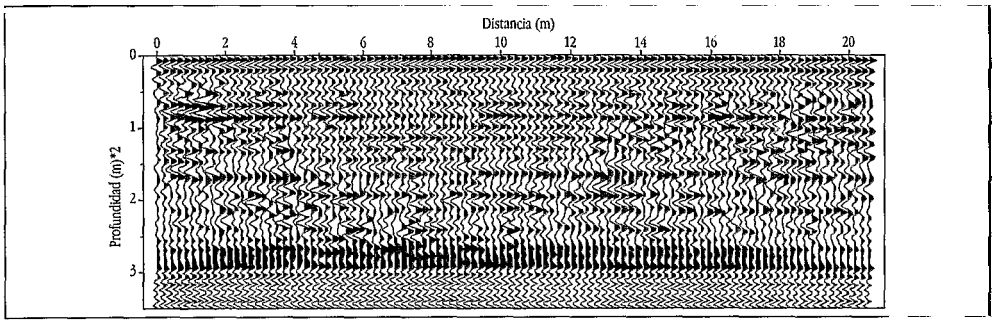


Figura 1 - El perfil obtenido con GPR en el área de interés, con una antena de 225 Mhz y velocidad de 0,08m/ns (Tepet 2b.mig)

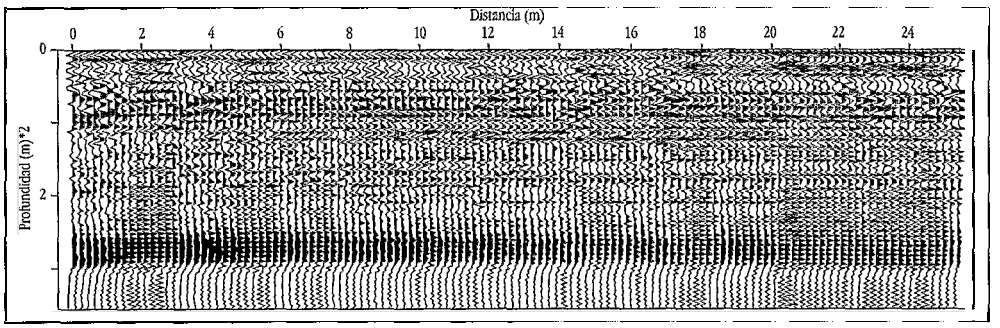


Figura 2 - El perfil obtenido con GPR en el área de interés, con una antena de 450 Mhz y velocidad de 0,08m/ns (Tepet 4b.mig)

En lo que refiere a la homogeneidad de las capas cementadas, por un lado, se detectaron límites horizontales perfectos y abruptos entre los tepetates y las capas adyacentes y, por otro, los reflejos fueron lo suficientemente homogéneos como para poder afirmar que la humedad y porosidad de los tepetates son variables homogéneas en sentido horizontal.

CONCLUSIONES

1. El análisis micromorfométrico es útil para estimar a microescalas la porosidad efectiva de los materiales cementados.
2. Las técnicas no destructivas del control de humedad, tales como el TDR, son aplicables al análisis de los tepetates.
3. Las exploraciones con el GPR permiten detectar las capas endurecidas, confirmar su continuidad horizontal y, posiblemente, comparar el contenido de humedad entre las capas adyacentes.

Referencias bibliográficas

BREWER, R., 1976: *Fabric and Mineral Analysis of Soils*, Krieger Publ., Huntington, New York, 482 p.

DASBERG, S.; HOPMANS, J., 1992: Time Domain Reflectometry Calibration for Uniformly and Nonuniformly Wetted Sandy and Clayey Loam Soils, in *Soil Sci. Am. J.*, 56, p. 1.341-1.345.

DIRKSEN, C.; DASBERG, S., 1993: Improved Calibration of Time Domain Reflectometry Soil Water Content Measurements, in *Soil Sci. Am. J.*, Vol. 57, p. 660-667.

GRANDJEAN, D., 1996: *Preliminary GPR Survey in Texcoco and* Tepetates (unpublished).

HERKELRATH, W.N.; HAMBURG, S.P.; MURPHY, F., 1991: Automatic, Real-Time Monitoring of Soil Moisture in a Remote Field Area with Time Domain Reflectometry, *Water Resour. Res.*, 27, p. 857-864.

HIDALGO, C., QUANTIN, P., ZEBROWSKI, C., 1992: La cementación de los tepetates: estudio de la silicificación, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM/Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 192-201.

HOOK, W.R.; LIVINGSTON, N.J., 1995: Reducing Propagation Velocity Measurement Errors in Time Domain Reflectometry Determinations of Soil Water, in *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59, p. 92-96.

JURY, W.; GARDNER, W.; GARDNER, W.H., 1991: *Soil Physics*, J. Wiley & Sons Inc., New York, 47 p.

OLESCHKO, K.; ZEBROWSKI; C., QUANTIN, P.; FEDOROFF, N.; OSORES, E., 1994: Hardened Volcanic Soils (*Tepetate*) in Mexico: Their Geological, Pedological or Anthropological Origin, in *Transactions of the 15th World Congress of Soil Science*, Acapulco, Mexico, Vol. 6a, p. 229-249.

PEÑA, D.; ZEBROWSKI, C., 1992: *Estudio de los suelos volcánicos endurecidos* (tepetates) *de las cuencas de México y Tlaxcala (México). Informe del mapa morfopedológico de la vertiente occidental de la Sierra Nevada*, anexo al informe final, Contrato CCE-ORSTOM N° TS2-0212, 101 p.

QUANTIN, P., ARIAS H. M.; ETCHEVERS, J. D.; FERRERA-CERRATO, R.; OLESCHKO, K.; NAVARRO, H.; WERNER, G.; ZEBROWSKI, C., 1993: *Terra*, Vol. 11 (número especial: Tepetates de México, caracterización y habilitación para la agricultura), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, 72 p.

SMITH, M. W.; TICE, A. R., 1988: Measurement of the Unfrozen Water Content of Soils: Comparisons of NMR and TDR Methods, in *Cold Regions Res. Eng. Lab. Rep.*, U.S. Army Corps of Engineers, p. 88-108.

SPOSITO, G.; REGINATO, R., 1992: *Opportunities in Basic Soil Science Research. SSSA*, Madison, USA, 109 p.

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P., 1980: Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurement in Coaxial Transmission Lines, in *Water Resour. Res.*, 16, p. 574-582.

VADIUNINA, A. F.; KORCHAGINA, Z. A., 1986: Métodos del estudio de las propiedades físicas de suelos (en ruso), *Agropromizdat*, Moscú, p. 328-376.

ZEBROWSKI, C. 1992: Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 15-23.

ZEGELIN, S. J.; WHITE, I.; JENKINS, D.R., 1989: Improved Field Probes for Soil Water Content and Electric Conductivity Measurements Using TDR, in *Water Resour. Res.*, 25, p. 2.367-2.376.

Análisis fractal de los tepetates

Klaudia OLESCHKO, María E. MIRANDA, Christian PRAT

Abstract

The degree of fragmentation and irregularity of tepetate areas can be measured with fractal parameters. A lot of different empirical fractal dimensions can be used with this purpose. Some of these dimensions were estimated and compared in the present work. The tepetates lineal and mass fractal dimensions were independent of the scale of measurement. These data indicate the near ideal fractal dimensionality of tepetate areas. The doble value of lineal fractal dimension was similar to the mass fractal dimension. The tepetate surface fractal dimensions indicate the considerable irregularities of tepetate areas boundaries related with advanced erosion in the studied area.

Keywords *: Fractal Analysis - Dimension - Irregularity*

INTRODUCCIÓN

Los métodos probabilístico-estadísticos constituyen una base sólida para el análisis de la variabilidad de los sistemas naturales. Sin embargo, ni la estadística clásica ni la geoestadística, permiten caracterizar el patrón de heterogeneidad de un sistema natural a diferentes escalas. Tampoco son útiles para describir las relaciones fundamentales entre las propiedades de un sistema, los procesos que se operan en él y los mecanismos de estos últimos. Una nueva técnica analítica, la geometría fractal promete ser la herramienta necesaria para resolver los problemas anteriormente mencionados y proporcionar además la información sobre los procesos responsables de la heterogeneidad original de un sistema determinado. Una de las principales ventajas del uso de los parámetros fractales consiste en la posibilidad de describir no solo las propiedades geométricas estáticas de las estructuras fractales sino también sus propiedades dinámicas y sus interacciones con el medio exterior (Orbach, 1986).

La heterogeneidad en el espacio de los tepetates aflorantes representa uno de los principales problemas para el diseño de las prácticas de recuperación. Hasta el momento, tal heterogeneidad ha sido estudiada parcialmente y solo desde el punto de vista cartográfico —mapa morfopedológico de la vertiente occidental de la Sierra Nevada elaborado por Peña y Zebrowski (1992)—. En ese mapa, los tepetates que afloran a la superficie forman manchas de tamaño variable y morfología irregular. A primera vista, el mosaico general del paisaje tiene un carácter autosimilar, y puede ser descrito mediante los parámetros fractales. Se sabe que los rasgos morfológicos del paisaje, creados por el efecto acumulativo de diferentes eventos de magnitud similar (erosión, depósito, sedimentación,

etc.), tienden hacia las propiedades fractales (las fronteras de las áreas de tepetates aflorantes) —Hlavka, 1992—.

En el caso de demostrar el carácter fractal del conjunto de las áreas tepetatosas, estas pueden ser representadas como una «colección de islas geométricamente similares» (Mandelbrot, 1993), con lo que se puede simplificar su representación cartográfica, especular sobre los procesos responsables de su formación (geológicos o pedogénicos) y pronosticar su desarrollo en el tiempo y en el espacio.

Los objetivos principales del presente estudio son: a) describir, mediante los parámetros fractales empíricos, la fragmentación y la irregularidad de las fronteras del conjunto de áreas de tepetates aflorantes (escala macro), con el propósito de demostrar su origen autosimilar; b) estimar el grado de fragmentación y de irregularidad de la superficie de la fracción gruesa de algunos tepetates (escala micro) para confirmar su origen (geológico o pedogénico); c) establecer, de ser posible, un vínculo entre los parámetros fractales de los niveles micro y macro.

MATERIALES

Nivel macro

Para el análisis fractal del conjunto de las áreas tepetatosas que afloran, se tomó como base el mapa morfopedológico (a escala 1:50.000) de la vertiente occidental de la Sierra Nevada elaborado por Peña y Zebrowski (1992), en el que se efectuaron dos tipos de análisis. Por un lado, se analizó la distribución en el espacio de todas las unidades cartográficas que pertenecen a los piedemontes y glacis, y que comprenden la existencia de las capas tepetatosas, tanto a cierta profundidad dentro del perfil (unidades 23, 24, 26-28), como aflorantes (unidades 31-39). Por otro lado, se estimó de manera individual el grado de irregularidad de las fronteras de cada área de tepetate aflorante, así como su grado de fragmentación. El análisis fractal se realizó utilizando los mapas originales (método manual) y digitalizados —métodos automatizados, programas Linfrac y Fractal, desarrollados por Parrot y Rico (1997)—. Para la digitalización de los mapas se utilizó un *scanner* comercial con resolución de 600 dpi. Cada imagen obtenida tenía un tamaño de 216 x 216 pixeles.

Nivel micro

Para el análisis fractal, se utilizaron las láminas delgadas preparadas para el estudio micromorfológico. La descripción detallada del procedimiento de preparación de las láminas se encuentra en Oleschko y Miranda (1997).

MÉTODOS

Dimensiones fractales empíricas de capacidad

El concepto básico de la geometría fractal es la dimensión fractal (D) —Mandelbrot, 1993— y el procedimiento empírico común para su estimación es el conteo de caja (*box counting*). En términos generales, los fractales que se encuentran en el espacio euclidiano E-dimensional se caracterizan por tener un espectro infinito de dimensiones D_q, donde q es un número íntegro. Hentschel y Procaccia (1983) definen las dimensiones fractales en términos probabilísticos mediante p_i que representa la probabilidad de encontrar un pedazo del fractal en la i-ma caja de las N de lado r que se necesitan para

cubrir el fractal completamente. Sin embargo, según Falconer (1990), de un modo aproximado, se puede decir que todas las dimensiones reflejan de alguna manera el grado de ocupación del espacio por el conjunto fractal.

a. Dimensión fractal lineal

Para el análisis fractal de suelos, se desarrollaron algunos métodos para determinar las dimensiones fractales empíricas que reflejan simultáneamente el grado de fragmentación del sistema y la irregularidad de las interfases sólido-poro. Todos los métodos propuestos son variantes de la técnica común del conteo de caja que, hasta el momento, han sido utilizados solo a nivel micro. En el presente trabajo, el análisis fractal se realizó tanto a nivel macro como a escala micro, utilizando los mismos procedimientos. Los métodos empleados se dividen en lineales y areales y sirven para estimar el grado de ocupación del espacio euclidiano uni y bidimensional por parte del conjunto fractal.

El análisis lineal (E = 1) se basó en el modelo de los conjuntos fractales de puntos sobre la recta (Korvin, 1992). La siguiente regla expresa la propiedad general de estos conjuntos: si la resolución del método de análisis es ε, cualquier intervalo de longitud L de la recta, contiene N puntos del conjunto fractal, por lo que:

$$N \; \& \; (L/\varepsilon)^D$$

donde D es la dimensión fractal lineal de la capacidad del conjunto.

Al mapa mencionado se superpuso un conjunto de rectas paralelas, de longitud similar (L), trazadas sobre una mica. A varias distancias regulares (ε, escala del análisis o tamaño del divisor) se estimó el número total de divisiones de cada línea (N_t mas N_0) y el número de intersecciones entre las líneas y áreas de tepetates (N_t). La pendiente de la recta que relaciona los logaritmos de las variables mencionadas representa la dimensión fractal lineal (D) de los tepetates. N_0 corresponde al número de divisores que tocaron áreas libres de tepetates.

El mismo procedimiento se utilizó a nivel micro, donde en lugar del mapa se analizaron las imágenes microscópicas y en lugar de las áreas de tepetates se estimó la distribución de los conjuntos sólidos (N_S) y de los poros (N_P). La pendiente de la recta que relaciona el logaritmo del N_S o N_S y el logaritmo del número total de divisores utilizados para el análisis, da la dimensión fractal lineal del conjunto de sólidos o de poros.

Posteriormente, los datos del análisis fractal manual se compararon con los del análisis automatizado de los mapas digitalizados. Para tal propósito se utilizó el programa Linfrac.

b. Dimensión fractal areal (D_a)

Tanto a nivel macro como a escala micro, para obtener la D_a se utilizó primeramente la regla de Mandelbrot (1983). Esta, definida para un conjunto de figuras fractales planas con una frontera fractal autosimilar de dimensión D_a, relaciona el perímetro del objeto fractal con su área. La siguiente ecuación establece la relación entre el perímetro (P_i) de la figura, medido con una regla de longitud ε (la resolución del método), y el área de cada una de las figuras (A_i) medida en las unidades de ε_2:

$$P_i \; \& \; A_i^{Da/2}$$

En lugar de las rectas, se utilizó una mica con cuadros de tamaño variable de lado (ε). Como dimensión fractal areal del conjunto analizado se tomó la pendiente de la recta que relaciona el logaritmo del número total de cuadros que tocan la superficie de las

áreas tepetatosas (en el mapa) o los bordos de las partículas gruesas (en la imagen microscópica), y el número de cuadros completos que caben dentro del área de interés.

c. Dimensión de la superficie o de la frontera fractal (D_b o dimensión de Minkowski)

Según varios autores, la caracterización de la estructura fractal de un conjunto autosimilar no es completa si no se determina la dimensión empírica de la superficie fractal (D_b) —Anderson *et al.*, 1996— Esta última dimensión refleja el grado de irregularidad de las fronteras del objeto fractal y se determina según el siguiente procedimiento técnico: se calcula el número de cuadros (o pixeles) de lado ε (resolución del método) que tocan la frontera de un fractal. La pendiente de la recta que se obtiene en el papel logarítmico y que relaciona al logaritmo del número total de pixeles que tocan la frontera del objeto con el logaritmo de la resolución del método (ε), es igual a uno menos la dimensión de la frontera fractal (D_b).

d. Dimensión de la masa fractal

Para disminuir el sesgo del análisis manual realizado, se compararon todos los valores de los parámetros fractales obtenidos con los datos del análisis fractal automatizado de las imágenes (macro y micro) digitalizadas. Para este último propósito, se utilizaron los programas Linfrac y Fractal, especialmente para el análisis fractal de las imágenes del suelo. Ambos programas, escritos en el ambiente Borland (lenguaje C++), sirven para estimar la dimensión de la masa fractal del conjunto. Las áreas cubiertas de tepetates y las ocupadas por otros suelos se cubrieron sucesivamente con los intervalos del tamaño de r pixeles (Linfrac) o con las cajas del lado r pixeles (Fractal), de tamaño creciente. En total, se utilizan 16 diferentes tamaños de intervalo (o de caja), empezando con 1 pixel y terminando con el tamaño máximo de 216 pixeles. Se calculó el número de r pixeles (intervalos o cajas) que caben dentro de las áreas evaluadas. La pendiente de la recta que relaciona el número de intervalos (o de cajas) con su tamaño es la dimensión de la masa fractal del conjunto analizado. Si este conjunto se comporta como masa fractal (M), se cumple la siguiente proporcionalidad:

$$M \propto r^{Dm}$$

donde el exponente D_m se refiere a la dimensión de la masa fractal y es siempre menor a la dimensión del espacio euclidiano, dentro del cual está sumergido el conjunto fractal (Anderson *et al.*, 1996).

Al final del análisis, todas las dimensiones estimadas se compararon entre sí.

e. Modelo fractal de áreas

El modelo fractal unificado, propuesto por Oleschko (1997) para la recuperación de las imágenes bi y tridimensionales a partir de los datos de la distribución del conjunto fractal a lo largo de las líneas analizadas, fue utilizado para estimar el área de los tepetates aflorantes. Dicho modelo se basa en dos variables de entrada: el número total ($N_t + N_0$) de los puntos que se analizan a lo largo de la línea de una longitud conocida (L) a distancias regulares (r, el paso del análisis), y la dimensión fractal del conjunto de interés (D_t). Esta última variable refleja el grado de ocupación de la línea por parte del objeto fractal. Se modelizó el área de los tepetates aflorantes (ATA) a lo largo de las líneas de longitud de 12 cm, tomando el valor medio de la dimensión lineal (D_t) de las áreas de los tepetates aflorantes y utilizando la siguiente ecuación:

$$ATA = (N_t + N_0)^{2(Dt - 1)}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Nivel macro

Análisis lineal

La distribución de las áreas de tepetates en el mapa morfopedológico, analizada manualmente aplicando a cuatro diferentes escalas la técnica lineal diseñada, tiene un carácter claramente fractal, aproximadamente ideal, con una dimensión D_t media igual a 0,84 (figuras 1 a 3). La variación de los valores de D_t es reducida y siempre menor al 10 % (cuadro 1). Todos los valores de D_t son superiores a la dimensión fractal del modelo clásico de polvo de Cantor (0,63), pero siempre menores a 1. Los datos de Korvin (1992) permiten suponer que existe una relación entre el valor de D_t y el grado de erosión en el área del estudio.

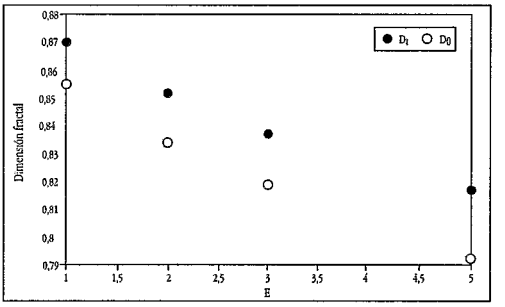


Figura 1 - Dimensión fractal lineal de los tepetates (D_t) y de las áreas con tepetate a profundidad (D_0)

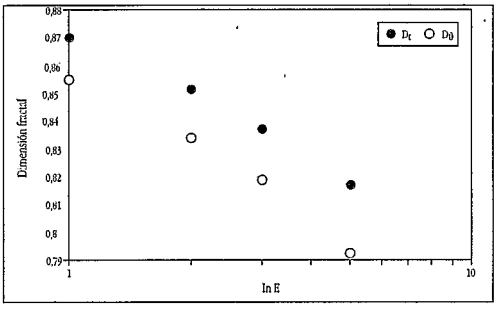


Figura 2 - Relación entre la dimensión fractal lineal (D_t y D_0) y el logarítmo de la escala del análisis (ε) cw

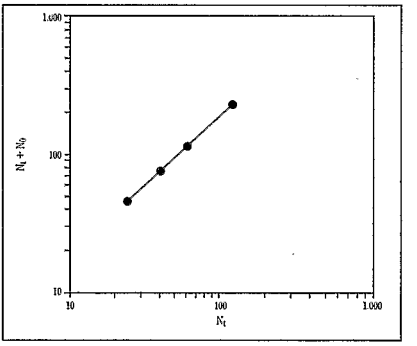


Figura 3 - Relación entre el número total de divisores de tamaño ε que ocupan las líneas analizadas ($N_t + N_0$) y el número de divisores que tocan los tepetates (N_t)

Hoja	N_t (C.V.[1])	N_0 (C.V.)	D_t[2] (C.V.)	D_t[3] (C.V.)
1	120,5 (0,29)	110,8 (0,32)	0,871 (7,3)	0,855 (1,6)
2	60,4 (0,29)	55,6 (0,32)	0,852 (8,6)	0,863 (2,7)
3	40,0 (0,29)	37,0 (0,32)	0,837 (9,7)	0,849 (5,2)
5	24,1 (0,29)	21,9 (0,32)	0,817 (11,2)	0,832 (6,7)

[1]: coeficiente de variación (C.V.)
[2]: datos del método manual
[3]: datos del análisis automatizado (programa Fractal)

Cuadro 1 - Dimensión fractal lineal de los tepetates aflorantes (D_t) y de las áreas con tepetates a diferente profundidad (D_0)

Los resultados del análisis automático de los mapas digitalizados fueron similares a los del análisis fractal manual: las áreas de los tepetates aflorantes se caracterizaron por una dimensión fractal lineal media de 0,85, mientras las áreas cubiertas con los suelos tenían una dimensión de 0,97 (cuadro 1).

El área total de tepetates modelizada a partir de los datos del análisis fractal lineal utilizando el modelo propuesto por Oleschko (1997) y refiriéndose solamente a un área de 986 km^2 (la máxima concentración de los tepetates), fue de 300 km^2, o aproximadamente 30 % del territorio considerado. Zebrowski (1992), para el doble del área y una distribución no homogénea de las capas cementadas, reporta una cobertura de alrededor de 450 km^2 de tepetates.

Análisis areal

Los datos del análisis areal, basado en la regla del Mandelbrot (1983) que relaciona el perímetro con el área, se presentan en el cuadro 2 y muestran una dimensión fractal areal media de 2,28. Este valor puede ser considerado erróneo, ya que las dimensiones de los conjuntos fractales dentro del plano son menores a 2 (dimensión del espacio euclidiano en el cual está sumergido el fractal). Posiblemente, la razón de este error es la poca exactitud del análisis del conteo de caja realizado de manera manual con un solo tamaño del cuadrado (r). En general, la variación de los datos del análisis fractal areal fue mayor que en el caso del análisis lineal, por lo que D_a fluctuó entre 2,02 (hoja 2) y 2,84 (hoja 5), refiriéndose a las hojas del mapa morfopedogénico de Peña y Zebrowski (1992). Se concluyó que la aplicación de la regla de Mandelbrot al análisis de los datos cartográficos requiere el desarrollo de un procedimiento específico de conteo.

Hoja	P_i (km)	A_i (km^2)	D_a	D_m	D_b
11	204	114	2,246	1,603	1,896
2	211	203	2,015	1,650	1,911
3	89	34	2,546	1,685	1,892
4	204	74	2,471	1,323	1,864
5	351	62	2,840	1,758	1,939
6	77	28	2,607	1,727	1,903
7	253	76	2,555	-	1,901
8	57	1	-	-	-
9	0	0	0	0	0

[1]: Los números de las hojas corresponden al Informe del mapa morfopedológico de la vertiente occidental de la Sierra Nevada (Peña y Zebrowski, 1992)

Cuadro 2 - Dimensión fractal areal (D_a), calculada con base en la relación entre el perímetro (P_i) y el área (A_i) del conjunto, la dimensión de la masa fractal (D_m) y de la superficie fractal (D_b)

El análisis de la masa fractal (D_m) del conjunto de áreas de tepetates realizado por el método alterno automático (aplicando el programa Fractal) dio un valor medio de la dimensión fractal de 1,65 para las áreas de los tepetates aflorantes (cuadro 2). Este último valor parece correcto, ya que cumple con la regla general establecida anteriormente para los conjuntos fractales estadísticos (Oleschko, 1997): la dimensión fractal calculada dentro del área es aproximadamente igual al doble de la dimensión fractal estimada a lo largo de las líneas. Las áreas cubiertas con diferentes suelos y con los tepetates enterrados tuvieron un valor promedio de la dimensión fractal de 1,97. La diferencia entre los valores señalados puede ser relacionada con diferentes grados de erosión que se presenta en ambas áreas del estudio. Consecuentemente, es lógico esperar los menores valores de las dimensiones fractales en el caso las áreas de los tepetates aflorantes.

Con el propósito de relacionar el valor de la dimensión fractal con la génesis de los diferentes tepetates, se realizó el análisis por grupos de tepetates, según la clasificación adoptada en el proyecto (Peña y Zebrowski, 1992). Sin embargo, no se encontró correlación alguna entre la magnitud de la dimensión fractal y el tipo de tepetate analizado. Por ejemplo, las áreas cubiertas con los tepetates t3 sin y con carbonatos presentaron una dimensión fractal similar, de un rango de 1,68 a 1,77, sin mostrar ninguna tendencia clara (cuadro 2).

Análisis de las fronteras fractales

La dimensión media de la frontera (D_b) fue de 1,90 para áreas de tepetates aflorantes, lo que puede relacionarse con un elevado grado de irregularidad de sus fronteras y con efectos pronunciados de los procesos erosivos (cuadro 2).

Nivel micro

Las mediciones geométricas de las distribuciones de los granos de arena de diferente tamaño a lo largo de las líneas y dentro de las áreas, refiriéndose a los tepetates del perfil 30, no mostraron evidencias claras de su carácter fractal. Las propiedades geométricas tanto de los granos de feldespatos, como de los de vidrios volcánicos, ambos minerales predominantes en la fracción gruesa de los tepetates analizados, tienen dimensiones regulares, cercanas a las euclidianas. Esto último se cumple para las mediciones de las dimensiones tanto lineales como areales y de la frontera fractal. Por ejemplo, la dimensión lineal media de las arenas es de 0,98, mientras que la dimensión areal es de 1,99. Los datos mencionados confirman que la alteración de los minerales gruesos en los tepetates analizados es poco avanzado, y que en ellos los procesos pedológicos son incipientes.

La comparación de los datos del análisis fractal realizado a nivel macro y micro permite llegar a una conclusión relevante. Mientras a nivel macro existen claras indicaciones de las altas tasas de erosión en las áreas de los tepetates aflorantes, a nivel micro se detectó una meteorización poco importante de los minerales de poca estabilidad. Esta visible contradicción puede ser indicativa de la reciente aparición de la mayor parte de las capas tepetatosas aflorantes, y de su origen relacionado con los eventos volcánicos catastróficos de corta duración.

CONCLUSIONES

Nivel macro

1. Los resultados del análisis fractal de algunos tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada evidencian su carácter fractal casi ideal: la dimensión fractal del conjunto

de las áreas de tepetates tanto aflorantes, como profundos, no depende de la escala de análisis.

2. Los valores de las dimensiones fractales obtenidos a lo largo de las líneas analizadas y dentro de las áreas se correlacionan entre sí, cumpliendo con la regla establecida para los fractales autosimilares: el valor de la dimensión calculada dentro del área se aproxima al doble del valor de la dimensión fractal lineal.
3. Con base en la dimensión fractal lineal (de 0,844 en promedio para tepetates aflorantes) se modelizó el área total ocupada por los tepetates, mostrándose claras evidencias del funcionamiento satisfactorio del modelo fractal, ya que los resultados son comparables con las estimaciones directas del campo. Este resultado confirma el carácter fractal casi ideal del conjunto estudiado.
4. Las áreas con tepetates localizados a diferente profundidad presentan una dimensión fractal significativamente mayor al de aquellas con tepetates aflorantes, lo que confirma la hipótesis inicial según la cual la dimensión fractal puede servir de indicador del grado de erosión.

Nivel micro

El análisis geométrico de la distribución de las fracciones gruesas de los tepetates estudiados no mostraron evidencias de su carácter fractal. Sus propiedades geométricas se ajustaron más a las dimensiones euclidianas regulares.

Comparación de los datos a diferentes escalas

Al comparar los parámetros fractales obtenidos a nivel macro y a nivel micro, se llegó a la conclusión de que la mayor parte de las áreas de tepetates aflorantes es de formación reciente y su origen se relaciona con los eventos volcánicos catastróficos de corta duración.

Referencias bibliográficas

ANDERSON, A.N.; MCBRATNEY, A.B.; FITZ, P., 1996: Soil Mass, Surface, and Spectral Fractal Dimensions Estimated from Thin Section Photographs, in *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60, p. 962-969.

FALCONER, K., 1990: *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications*, John Wiley Sons, 288 p.

HENTSCHEL, H.G.E.; PROCACCIA, I., 1983: The Infinite Number of Generalized Dimensions of Fractals and Strange Attractors, in *Physica*, 8D, p. 435-444.

HLAVKA, CH.; STRONG, L., 1992: Assessing Deforestation and Habitat Fragmentation in Uganda Using satelite Observations and Fractal Analysis, in *Journal of Imaging Science and Technology*, 36, 5, p. 440-445.

KORVIN, G., 1992: *Fractal Models in the Earth Science*, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, Netherlands, 395 p.

MANDELBROT, B.B., 1983: *The Fractal Geometry of Nature*, W. H. Freeman, San Francisco, 488 p.

OLESCHKO, K.; MIRANDA, M.E., 1997: Calibración de los métodos no destructivos en los tepetates del estado de México, en este volumen.

OLESCHKO, K., 1997: The Dellesse Principle and Statistical Fractal Sets, *Soil Technology* (en revisión).

ORBACH, R., 1986: *Dynamics of Fractal Networks*, Science, 231, p. 814-819.

PARROT, J.F.; RICO, J., 1997: *Implementación y operación de un algoritmo para las mediciones fractales de las imágenes del suelo*, UNAM, Instituto de Geología, Proyecto DGAPA, Informe final.

PEÑA, D.; ZEBROWSKI, C., 1992: *Estudio de los suelos volcánicos endurecidos (*tepetates*) de las cuencas de México y Tlaxcala (México). Informe del mapa morfopedológico de la vertiente occidental de la Sierra Nevada*, anexo al informe final, Contrato CCE-ORSTOM N° TS2-0212, 101 p.

Pine Root-induced Petrocalcic Horizons in Volcanis Ash Soils of the Mexican Altiplano

Didier DUBRŒUCQ, Daniel GEISSERT, Pierre ROGER

Abstract

Scanning electron microscope (SEM) studies of calcareous encrusting in volcanic ash soils containing active and petrified roots of pine trees revealed that the calcified material is related to the fine root mat of the pine rhizosphere and particularly to a dense network of very thin biologic filaments of about 0.1 µm in diameter. These filaments are mostly covered with a gel-like sheath that increases their diameter to 0.5 µm. The diversity in morphology of the calcitic accretions, from fibers to rods with epitaxial growth of anhedral crystals, results from different stages in the calcification. In the first stage, freshly calcified filaments are semi-rigid and coated with gel-like products composed mainly of Ca, Al and Si. In the most advanced stages, secondary anhedral calcite crystals a few microns in size develop on the biologic structures and form an open network with the accumulated debris of calcified filaments. Amorphous silica, as a cementing agent, contributes to the hardening of this porous calcitic fabric. The most advanced stages of calcification are observed in soils below 30 to 50 years old pine trees, whereas 15 years old pine plantations display only filamentous and needle-fiber calcifications.

Keywords: *Calcite Deposits - Biogenic Structures - Volcanic Soils*

INTRODUCTION

Geologists and pedologists have long time ago recognized the diversity in morphology and spatial arrangement of calcite mineralizations in soils of arid and semi-arid regions. Calcite in arid soils, however, has generally been viewed as a geochemical process involving rapid evaporation of Ca-rich solutions throughout the largest pores of the soil (Jenny, 1941; Doner and Lynn, 1989; Verges *et al.*, 1982). Geochemical processes generally relay biological processes (Klappa, 1979). Numerous evidences of calcite mineralization by microorganisms indicate that biological processes may have played an important role in carbonate accumulation in soils of semi-arid to temperate regions. These observations resulted mainly from scanning electron microscop on pedogenic calcite encrustings. Clear similarities between fungal hyphae and filamentous calcite has been evidenced in modern soils of temperate regions (Callot *et al.*, 1985a and b). In calcite encrustings in soils of the New Mexico desert, fossilized calcified structures of *Microdium* bacteria colonies were found to be involved in calcite precipitation (Monger *et al.*, 1991). In calcareous paleosoils and calcretes

from South Australia, hyphae filaments and rod-shaped bacteria have been indentified (Phillips *et al.*, 1987) and needle-fiber calcite has been determined to form within mycelial strands, as a product of metabolism (Phillips *et al.*, 1985b).

The formation of calcretes is however not well understood. In regards to the specific habit of calcite microcrystals on the mucilaginous sheath of hyphae filaments or on the cell of microbial colonies, it is supposed that calcite accretion is a response of micro and mesoorganisms to their highly calcareous environment, as a detoxification mecanism. But calcite encrustings are also observed in Ca-poor materials. The present study of carbonate concentrations in rhyolitic and dacitic volcanic ash soils is a new contribution in the comprehension of the global mechanism of biological Ca-transfer and -accumulation in soils.

MATERIALS AND METHODS

Location and environment

The study area is on the western leeside of the Cofre de Perote volcano (4,250 m), a complex andesitic strato-volcano on the eastern edge of the central altiplano, Veracruz State, Mexico. The site is along the track from Perote to Escobillo, at 4 kms from Perote. Altitude is 2,700 m, corresponding to the piedmont of the volcano. Climate is temperate semi-arid, with annual precipitations of 500 mm. The dry season lasts for 6 to 7 months and the average annual temperature is 12°C.

Parent materials of soils are unconsolidated ashes of rhyolitic composition, in which SiO_2 represents more than 78% of the whole anhydrous material. The upper deposit is a dacitic ash of late Pleistocene age, discordant upon a rhyolitic pumice fall deposit of middle Pleistocene (240,000 y. B.P.). These deposits overlie a thick rhyolitic ash flow of early Pleistocene age (460,000 y. B.P.).

Soils are of loamy sand texture, rich in glass and pumice fragments and poor in clay, only 5 to 17%. Andic properties due to the existence of allophane are very weak or absent. pH is slightly acid (6.5) near the soil surface and reaches 8.3 in the calcic horizons. They are classified as Vitrandic Ustorthent (Soil Survey Staff, 1990).

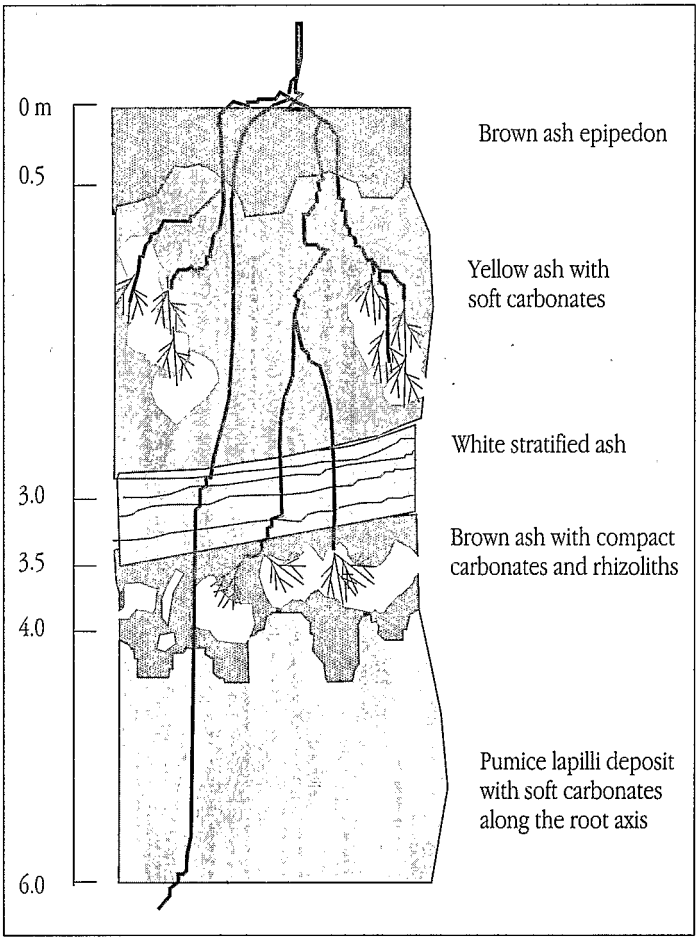
Vegetation is a small wood predominantly of pine trees. Among the 30 y. and older Pinus and Alnus trees there is a 15 y. old plantation of pure *Pinus montezumae* trees.

Soil profile and pine roots distribution

Profile description:

- 0 to 0.5 m - Pale brown, fine sand texture, reworked ash mixed with small pumice lapilli. NaF test: very weak. Clear and wavy transition.
- 0.5 to 3.0 m - Yellowish brown (10YR5/4), loamy sand texture with altered pumice lapilli, friable, whitish carbonate coatings on the walls of vertical cracks and around the fine root hairs of pine tree. Clear transition.
- 3.0 to 3.5 m - White ash of fine sand texture with beds of fine pumice lapilli. Neither secondary carbonates nor fine pine roots. Abrupt transition.
- 3.5 to 4.0 m - Brownish yellow (10YR6/6), firm when air-dried, brittle when wet. Compact ash of sandy loam texture with frequent weathered pumice lapilli. Abundant carbonate encrustings into vertical cracks and around the fine root hairs of pine trees. Several fossilized carbonated roots (rhizoliths) are visible. Clear and wavy transition.
- 4.0 to 6 m - Unconsolidated pumice fall deposit of coarse (1 to 4 cm) rounded lapilli. Soft powdery lime is deposited around the pine root axis and within the cavities of the weathered lapilli.

The profile is polygenic. The bottom layer of coarse pumice lapilli has been successively weathered into a pale brown soil and covered by a white ash containing fine pumice lapilli, itself weathered at turn into a pale yellow soil. Direct observation of the root system of pine trees in the profile shows clearly that the fine root hairs establish themselves only into the weathered soil horizons whereas unweathered ash layers or lapilli deposits are only crossed throughout by tap roots and main roots (Fig. 1). The soft powdery lime deposits are found close to the active root hairs of pine trees. Unlike pine trees, other species such as *Alnus* and *Cupressus* do not show any secondary carbonates close to their fine root system.



Sample collection and analytical methods

Taking advantage from a landslide of unconsolidated ash material due to recent erosion, sampling has been executed in vertical profiles beneath the pine trees. Undisturbed and oriented soil samples were collected (a) from the soft carbonate deposits in contact with root hairs of young pine trees in the 0.5 to 3.0 m horizon (samples COF752., COF753 and COF 756, COF 757), (b) from the soft carbonate deposits in contact with root hairs of old pine trees in the 0.5 to 3.0 m horizon (sample COF761), (c) from carbonate encrustings in contact with roots of old pine trees in the brown 3.5 to 4.0 m horizon (sample COF 762), (d) from powdery carbonate deposits on weathered pumice lapilli in the 4.0 m to 6.0 m horizon, (e) from rhizoliths in the 3.5 to 4.0 m horizon (sample COF 763). Samples were picked from fresh soil material during the end of the dry season in april of 1995 and preserved from evaporation in sealed plastic boxes until microscope observation.

Small fragments of these samples were previously mounted on aluminium plates and spray coated with gold before observation under a Cambridge Stereoscan 200 scanning electron microscope equipped with an energy dispersive X-ray (EDX) microanalyser

providing spectra of the chemical composition. The spectra include the major elements except for C, H, O and N which are not reported by the microanalyser. Additional thin soil sections were cut in the samples for observation under optical microscope.

RESULTS

SEM studies provide convincing evidence on the intense biological activity in pores, fissures and channels occupied by fine pine roots. The filamentous structures observed in the neighbourhood of root hairs are organised into a network of interconnected hyphae of very small diameter about 0.1 µm each, around a central strand composed of several coaxial filamentous units with several branching divisions (photo 1). The kind of the filaments organization, the very small diameter of individual hyphae and the ornamented spores grouped in spiral-like chains (photo 2) suggest that they are not fungi but Ascomycetes (*Streptomyces sp.*) or probably various associated species including filamentous bacteria.

Photo 1
General aspect of the calcitic fabric composed of elongatred rods about 1 µm in diameter and interconnected very thin hyphae, about 0.1 µm in diameter

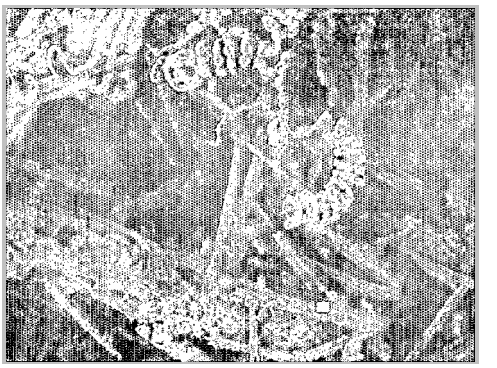


Photo 2
Some filament bear spores groupes in spiral-like chains which are characteristic of the *Streptomyces* group in Ascomycetes

1. The progressive calcification of individual filaments

Active bodies are sinuous filaments of 0.1 µm in diameter. Decaying bodies become straighter but still flexible. The filament surface is covered with a gel-like product displaying a longitudial groove that increases the filament diameter to 0.5 µm (photo 3). Except for C, H, O and N which are not determined, the chemical composition is essentially made of Ca, Si, Al with minor quantities of K and Mg (Fig. 2, microanal. S2P8). In more advanced stages of decay the filament is rigid. The mucilaginous sheath increases in diameter to about 1 µm and becomes roughly covered with small coalesent humps (photo 4). It is parted by a wide-opened longitudinal groove (photo 5). The chemical composition is predominantly Ca, with a minor quantity of Si (Fig. 2, microanal. S4P7). These observations confirm that Ca is concentrated in the mucilaginous sheath of the hypha, as an exudate. This ability of fungi, Ascomycetes, and other soil microorganisms like bacteria, to concentrate Ca on their external surface has been widely observed in soils (Klappa, 1979; Phillips and Self, 1987) and experimented in laboratory conditions (Callot, 1985; Monger *et al.*, 1991).

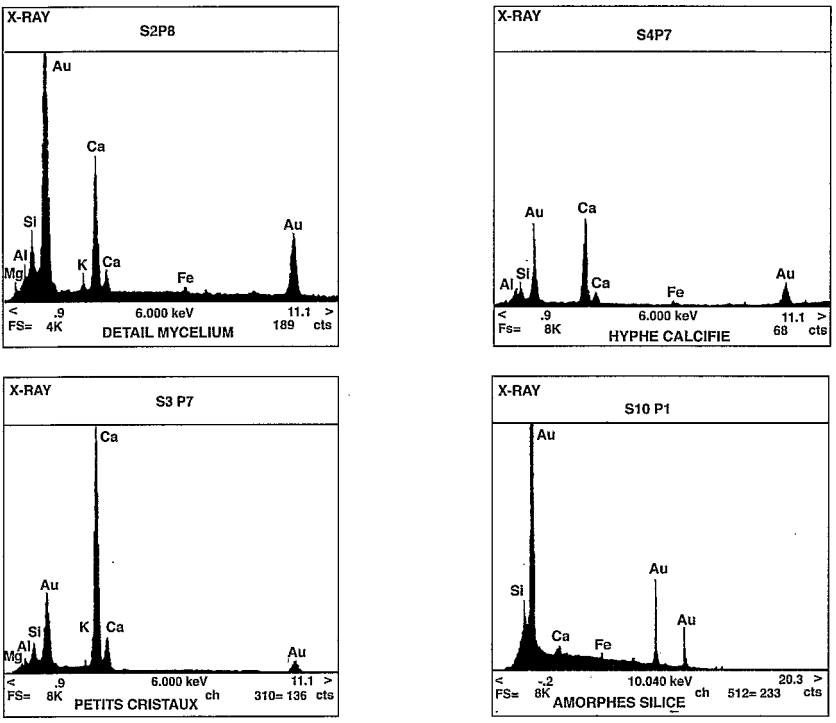


Fig. 2 - Diagrams of the chemical composition of various samples
The peak of gold results from the sputter coating on the sample
Upper left: Chemical composition of a gel-like sheath. **Upper right**: Chemical composition of a rigid sheath.
Lower left: Composition of small rhomboedric cristals. **Lower right**: Composition of an amorphous silica deposit on the calcified fragments.

2. Secondary calcite crystal growth on the biogenic calcified filaments

SEM observations on the calcitic encrusting from the buried B-horizon within soil depths of 4 to 4.5 m. show that they are almost constituted of randomly packed fragments of calcified filaments encrusted by secondary calcite rhomboedrons (photo 6). They develop on the surface of the calcified filament by epitaxial growth (photo 7). These calcite crystallizations are chemically different from the biological calcitisations. They are composed of almost pure calcium carbonate (Fig.2, microanal. S3P7). Unlike fiber calcite crystals, normal rhomboedric calcite crystals preferentially grow slowly in low concentrated solution. Rhomboedric calcite crystals are found only in the compact buried B-horizon, where solutions of low Ca concentration percolate slowly through the soil and the biogenic fragments.

Conversely, in the pumice lapilli deposit, a rapid drainage and an abundant porosity prevail, offering good conditions for evaporation and subsequent concentration of the solutions. In such material secondary needles of calcite can develop on the pore walls (photo 8) or between the calcified biologic filaments (photo 9).

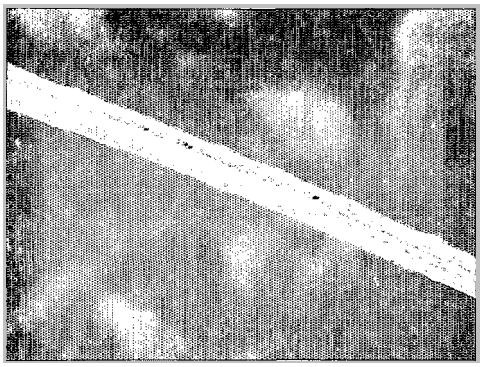


Photo 3
Detail of a still flexible filament with its gel-like sheath

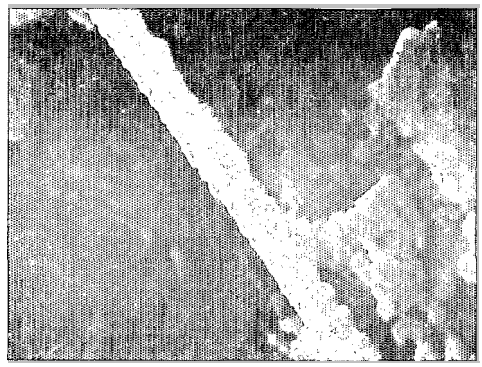


Photo 4
Detail of the rigid sheat of the filament with its rough surface and longitudinal groove

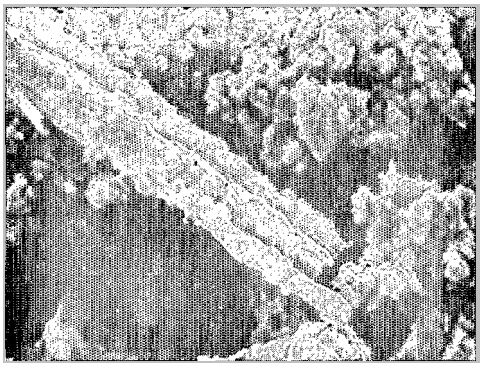


Photo 5
Detail of a petrified filament with a wide-opened longitudinal groove and a very rough surface

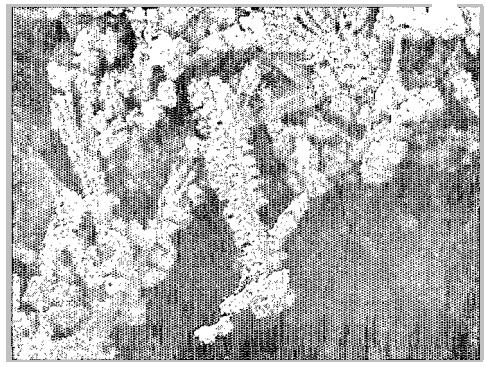


Photo 6
Secondary rhomboedric calcite crystals growing on a petrified biological fragment

3. Secondary silicification in porous biogenic calcifications

Fissures and channels in the fine ash deposits are preferential sites for fine root activity and biogenic calcitisations. Around root hairs of old pine trees, within depths of 0.5 to 3.5 m (sample COF 761), thin silica gel coatings are observed on the rod-like fragments of calcified filaments (photo 10). The shape of these products suggest a natural precipitation of Si-rich solutions. Spherules of 0.1 to 0.5 µm in diameter are visible on the surface of amorphous products, suggesting the in situ condensation of silica gels into silica lepispheres. Microanalysis spectra display a bulge of the baseline indicating abundant amorphous products and a high predominance of Si (Fig.2, microanal. S10P1). The precipitation of silica gels attests to an incipient cementation process leading, sooner or later, to the induration of the biogenic calcitic encrustings, if the actual conditions are still favourable for pine growth and rapid percolation of soil water.

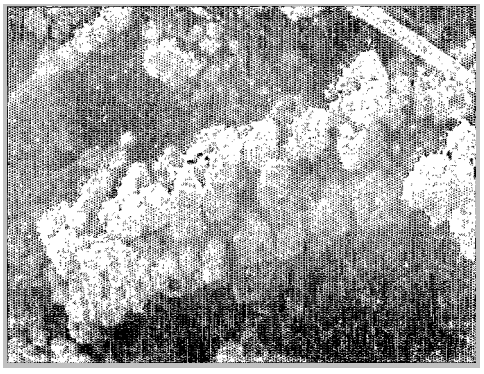


Photo 7
Detail of the rhomboedric calcite crystals growing on a petrified biological fragment

Photo 8
Detail of fine root inside a pumice fragment with secondary needle-fiber calcite growing perpendicularly to the pore wall

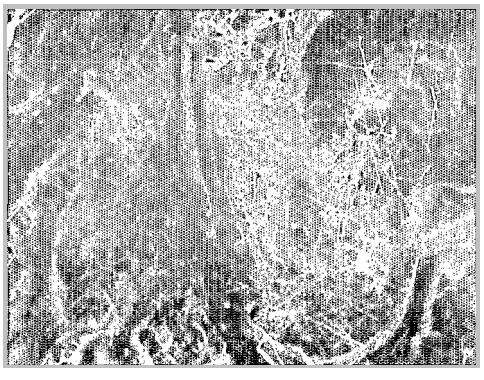


Photo 9
Aspect of biological filaments intercrossed with secondary needle fiber calcite inside a pumice lapilli

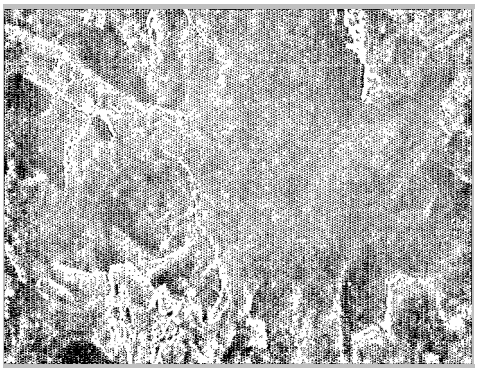


Photo 10
Detail of a silica gel coating on calcified filaments
Note the small silica spherules at the surface of the gel.

4. Secondary calcification and silicification in rhizoliths

Rhizoliths are organo-sedimentary cylindrical structures made by plant roots within permeable host sediments in regions of water deficiency (Klappa, 1980). Significance has been attached to them because they provide evidence of past vegetation and are good paleoenvironmental indicators. In the soil profile of the present study, rhizoliths are root moulds of 2 to 3 cm in diameter, which mark the position of now decayed roots. These roots probably belong to the vegetation of the paleosoil actually buried. Present and past calcitizations have fossilized the structure of the root, and they are a good example of advanced stages of pedo-biogenic induration. The internal root structure is no more discernible and the volume is occupied by a very porous material composed of residual fragments of calcified filaments cemented by a secondary micritic fabric and silica spherules

0.5 to 1 µm in size (photo 11). The shape and size of the spherules suggest that they result of the condensation of silica gels (photo 12). Nevertheless, in the internal cavities of the indurated material, many filamentous bodies are still active and grow together with few sinuous individual fungal hyphae.

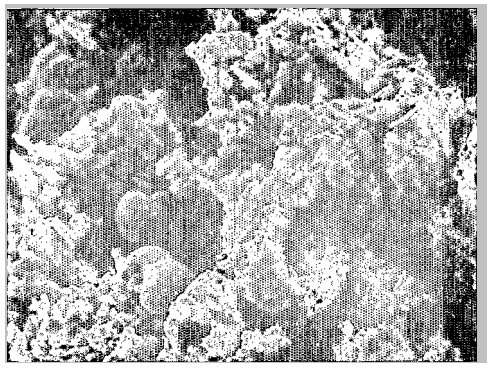


Photo 11
The silica lephispheres result from the condensation of silica gels and lead to a strong cementation of the calcified fragments

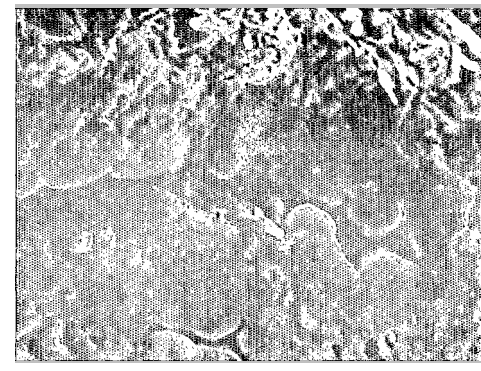


Photo 12
Detail of a silica in process of condensation into silica lepispheres

INTERPRETATION AND CONCLUSION

The fine pine roots observed in the studied soil profiles do not exhibit specific ectomycorrhyzae. The root surface is only crossed by few individual sinuous filaments about 1µm in diameter, probably of fungal origin. The thin filamentous bodies responsible for the carbonate deposits are not in close contact with the root surface. They are located in the neighbourhood of the fine pine roots, filling the macrovoids and the fissures of the soil.

Direct observation of different stages in the filament growth has shown that the mucilaginous sheath produced by the filament evolves into a calcified sheath with a longitudinal groove. The rigid sheath usually breaks down into small rods which accumulate around the central strand of the mycelium, leading to the formation, after a certain period of time, of a white deposit currently named soft powdery lime. Several observations show that enclosed individual hyphae are partially liberated when the rigid sheath is wide-opened and breaks down. But in other examples a thin filament can be observed growing from an extremity of the broken calcified sheaths. This suggests that the enclosed filament is able to endure long periods of latency and to reduce its axial growth during renewed wet conditions. Successive sheath formation and dissemination by breaking down are thus a specific aspect of the normal metabolism of the active filamentous bodies found in the pine tree rhizosphere.

The biogenic material resulting in filaments formation is a network of randomly accumulated calcitic rods and this type of fabric usually has a very abundant porosity, which facilitates a rapid water percolation and aerobiotic conditions. Secondary inorganic processes may occur in this material. The first occurre as silica gel deposits. They are observed

in the soft carbonate deposits bonded on the root hairs of 15 y. old pine trees. The second products are calcitic accretions of rhomboedric crystals and anhedral micrite, in intergrowth with the calcitic rods and infillings between the rods. This secondary phase of micritization as acicular calcitic fabrics in soils of the Mexican altiplano has also been observed as responsible for the present induration of one type of *tepetate* soils (Feodoroff *et al.*, 1994). In the profile under study, secondary calcitizations are observed in more compact horizons with fine pores and around 30 y. and older pine trees roots. In such materials silica is also relatively abundant and in solid state. Silica particles have an aspect of agglomerated spherules, each one of 0.5 to 1 µm in diameter, resulting from the progressive condensation of gels. Together with the calcitic accretions they play the role of cement, increasing considerably the compactness of the biogenic material.

Pine trees are key players in the formation of carbonate-rich horizons in volcanic ash soils of rhyolitic and dacitic composition in semi-arid regions. Conspicuous accumulations are formed under 15 y. old pine plantations and the cohesion and hardening of the calcitic horizons may have occured before 30 y. old pine trees. Secondary silica precipitations and calcitic accretions are mainly responsible for the hardening of carbonate-rich horizons. The result is the formation of a semi impervious horizon retaining the vertical water percolation of the water, which is normally very rapid through ashy and pumitic materials.

References

ALEXANDER, M., 1977: *Introduction to Soil Microbiology*, John Wiley & Sons (Eds.), 407 p.

CALLOT, G.; MOUSAIN, D.; PLASSARD, C.; 1985a: Concentrations de carbonates de calcium sur les parois des hyphes mycéliens, dans *Agronomie*, 5 (2), p. 143-150.

CALLOT, G.; GUYON, A.; MOUSAIN, D.; 1985b: Inter-relations entre aiguilles de calcite et hyphes mycéliens, dans *Agronomie*, 5(3), p. 209-216.

DONNER, H. E.; LYNN, W. C., 1989: Carbonate, Halide, Sulfate, and Sulfide Minerals, in *Minerals in soil environments*, Dixon, J.B. and Weed S.B. (Eds.), Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, p. 279-234.

FEODOROFF, N.; COURTY, M. A.; LACROIX, E.; OLESCHKO K., 1994: Calcitic Accretion on Indurated Volcanic Materials (Example of *Tepetates*, Altiplano, Mexico), in *Transactions of the 15th International Congress of Soil Science*, Acapulco, Mexico, Vol. 6a, p. 460-473.

JENNY, H., 1941: Calcium in the Soil: III. Pedologic Relations, in *Soil Sci. Soc. Am. Proceedings*, 6, p. 27-37.

KLAPPA, C., 1979: Calcified Filaments in Quaternary Calcretes: Organo-mineral Interactions in the Subaerial vadose Environment, in *Journ. Sediment. Petrology*, 49 (3), p. 955-968.

MONGER, H. C.; DAUGHERTY, L. A.; LINDEMANN, W. C.; LIDDELL, C. M., 1991: Microbial Precipitation of Pedogenic Calcite, in *Geology*, 19, p. 997-1000.

PHILLIPS, S. E.; MILNES, A. R.; FOSTER, R. C., 1987: Calcified Filaments: an Example of Biological Influences in the Formation of Calcretes in South Australia, in *Austr. Journ. of Soil Research*, 25, p. 405-428.

PHILLIPS, S. E.; SELF, P. G., 1987: Morphology, Crystallography and Origin of Needle-fiber Calcite in Quaternary Pedogenetic Calcretes of South Australia, *Austr. Jour. of Soil Research*, 25, p. 429-444.

SOIL SURVEY STAFF, 1990: *Keys to Soil Taxonomy*, SMSS Technical Monograph 19, fourth edition, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, USA.

VERGES, V.; MADON, M.; BRUAND, A.; BOCQUIER, G., 1982: Morphologie et cristallogénèse de microcristaux supergènes de calcite en aiguilles, in *Bull. de Minéralogie*, 105, p. 351-356.

Indurated Volcanic Ash Soils in Kyushu of Japan, their Properties and Typology

Hideo KUBOTERA, Ichiro YAMADA

Abstract

Several indurated volcanic ash soils are distributed throughout Kyushu, Japan. The profile morphology, physical, chemical and mineralogical properties and micromorphology of five layers of these volcanic ash soils were investigated. The indurated layers could be divided into two types based on the physical and chemical properties. Type 1 is not indurated in buried state, but shrinks and becomes very hard by air-drying. It is the buried volcanic ash layer with properties common in volcanic ash soils such as high carbon and clay content, high phosphate retention and low bulk density. Such soils are thought to have been generated by soil formation processes. The weathered tephra layers which constitute type 2 soils are indurated in both moist and air-dried state. The induration of type 2 is thought to be geologic. Neither type 1 nor type 2 contained cementing materials and neither could be classified into any indurated horizons in the present Soil Taxonomy. For improvement of soil productivity, type 1 should be harrowed thoroughly into fine blocks in the nooding condition and type 2 should be harrowed or removed using rake dozers or other such farm machinery.

Keywords: *Volcanic Ash Soils - Induration - Properties - Typology - Pedogenic - Geologic - Kyushu of Japan*

INTRODUCTION

Volcanic ash soils are widespread in Japan. In Kyushu, the southwestern island of Japan, volcanic ash soils amount to a quarter of all farming land and half of upland fields. Volcanic ash soils usually have suitable physical properties for plant growth such as high water retention, good drainage, favorable tilth and resistance to water erosion (Shoji *et al.*, 1993). Therefore they are excellent soils for upland crops, especially with the improvement of their chemical properties through processes such as heavy application of phosphate fertilizer. However, indurated layers which inhibit root growth and water and air penetration are seen in some volcanic ash soils in Japan. Especially in Kyushu, several indurated layers in volcanic ash soils have often disturbed farming activity. Based on field survey, the physical, chemical and mineralogical properties and micromorphology of these indurated soils are shown and their typology, genesis, classification and soil management are discussed in this paper.

MATERIALS AND METHODS

1. Studied soils

Five kinds of indurated volcanic ash soils, i.e. «Kashinomi» in Unzen volcanic ash soil area, «Nigatsuchi» and «Banban» in Aso volcanic ash soil area, «Hanamure» in Kuju volcanic ash soil area and «Kora» in Kaimon volcanic ash soil area, were studied.

Kashinomi (meaning «acorn» in Japanese) is a buried volcanic ash soil layer distributed in the eastern area of Shimabara peninsula. Nigatsuchi (meaning «bitter soil» in Japanese) is a multi-storied buried volcanic ash soil distributed in plateaus west of Aso volcano. Nigatsuchi is not indurated in buried state, but when exposed to the surface it shrinks and becomes very hard by air-drying. Banban (meaning «pan layers» in Japanese) is the tentative name of the indurated volcanic ash layers distributed in the eastern area of Aso somma. Hanamure (a place name) is an indurated volcanic ash layer distributed around Kuju volcano. Kora (meaning «carapace» in Japanese) is an indurated volcanic sand and scoria layer distributed in Satsuma peninsula.

2. Profile survey

A soil profile survey was conducted to the representative pedon of each indurated soils. For Nigatsuchi, several pedons in the plateaus, foothills (between the plateaus and Aso somma) and Aso somma were surveyed in order to follow the topo-sequential continuity of each layer. Location of the indurated soils and their morphology are shown in Figure 1 and Figure 2. Hardness of the soils in the pedons was measured by Yamanaka corn penetrometer, a commonly used Japanese soil survey tool. If its penetration depth into the soil is 27 mm or more, it is assumed that plant roots cannot grow (Research Association of Soil Physics, 1979) and if it is 29 mm or more, the soil is regarded as an indurated layer in classification of cultivated soils in Japan (Cultivated Soil Classification Committee, 1995).

3. Laboratory analysis

Laboratory analysis was performed to assess the physical properties (particle size

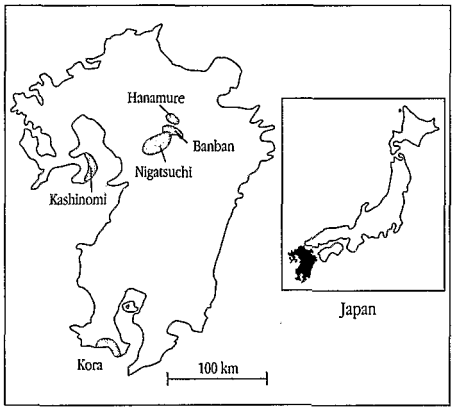


Figure 1
Location of the Studied Indurated Soils

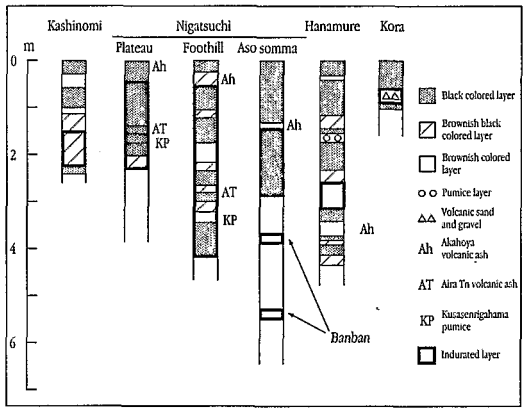


Figure 2
Profiles of the Indurated Layers in Kyushu

distribution, bulk density, unconfined compressive strength and soil block hardness measured by Yamanaka corn penetrometer), and chemical properties (pH, T-C, CEC, exchangeable cations and phosphate retention). In addition, selective dissolution analysis by acid oxalate and pyrophosphate was conducted. Primary mineral composition was determined by polarized microscope observation. Soil micromorphology was observed in thin section prepared by penetrating unsaturated polyester resin into the air-dried soil block.

RESULTS

A. Morphology and age

1. Kashinomi

In the Yatogi profile (Kunimi town), a 75 cm thick Kashinomi appeared from 15 cm depth. Its color was brownish black to dark brown and it contained many fine white particles. Its hardness was 25 to 27 mm and friability was firm to very firm. There were two buried black volcanic ash soil horizons between the surface and the Kashinomi. In the profile 3 km east of Yatogi, a volcanic sand and gravel layer with an indurated upper part overlied the buried black volcanic ash soil layer above Kashinomi. However, its distribution area was small. The age of the Kashinomi was estimated as 20,000 Y.B.P. by means of 14C dating (Yano*).

2. Nigatsuchi

Nigatsuchi layers are subdivided into «Kuroniga» (black Nigatsuchi), «Akaniga (brown Nigatsuchi) and «Gomaniga» (Nigatsuchi containing many white fine particles). The profile morphology of Nigatsuchi varied with the distance from Aso volcano. In the Kikuchi and Mashiki plateaus, thick Kuroniga underlay the surface horizon with one or two Gomaniga layers in its lower part. The total thickness of Nigatsuchi at the Kyushu National Agricultural Experiment Station profile (Nishigoshi town) was 200 cm. In the foothills, ten or more Kuroniga and Akaniga layers accumulated with two Gomaniga layers in the lower part, and total thickness of the Nigatsuchi was 350 cm at the Takaono profile (Oozu town). In the plateaus and foothills, the soil below Nigatsuchi was brown colored volcanic ash soil. On the ridge of the Aso somma, black volcanic ash soil accumulated 2 to 3 m thick from the surface. In addition, there was an orange volcanic ash layer «Akahoya» about 1 m deep with 10 to 15 cm thickness. The black soil below Akahoya was Kuroniga, and brown volcanic ash accumulated below the Kuroniga layer. The hardness of each Nigatsuchi layer was 20 to 25 mm and friability was friable to firm. The total area in which Nigatsuchi appears within 1 m depth is estimated as 7,000 ha (Miyauchi *et al.*, 1976). As shown in Figure 2, three tephras, i.e. Akahoya volcanic ash erupted from Kikai submarine caldera 6,300 Y.B.P., Aira Tn volcanic ash erupted from Aira caldera 22,000 Y.B.P. and Kusasenrigahama pumice erupted from Aso volcano 30,000 Y.B.P. can be used as keytephras for following the extent of each Nigatsuchi horizon and estimating their ages (Yamada & Kubotera, 1996). The ages of the uppermost and lowermost Nigatsuchi layers were estimated as 10,000 Y.B.P. and 30,000 Y.B.P., respectively, by means of 14C dating (Chikano & Koga, 1982) and the above-mentioned key tephras.

3. Banban

In the Koga profile (Ichinomiya town), two layers of Banban, both 10 cm thick, appeared from 370 and 530 cm depths, respectively. The layers were bright brown to dull

yellow in color, showed 33 to 38 mm hardness and extremely firm friability. Banban was observed in the limited areas of the eastern part of Aso somma, and only one layer of Banban existed in some pedons in this area. Indurated volcanic ash layers like Banban are often observed around active volcanoes in Kyushu, though their distribution areas are usually small. The age of Banban was estimated as between 10,000 to 20,000 Y.B.P. as the layers lie between the Aira Tn volcanic ash and the lower boundary of black volcanic ash soil layer, whose age is estimated as about 10,000 Y.B.P.

4. Hanamure

In the Hanamure profile (Kokonoe town), a Hanamure layer was appeared from 2.5 m depth with 50 cm thickness. Its color was dark olive brown to dull yellowish brown and contained many yellow root-like shaped spots. The hardness was 30 mm and friability was firm. The profile was composed of twenty-one black to brownish black volcanic ash soil layers. There was a pumice layer 1 m above Hanamure layer and Akahoya volcanic ash 25 cm below Hanamure. The age of Hanamure was estimated as 4,000 Y.B.P. by 14C dating (Takada & Tsuno, 1982).

5. Kora

Kora layers are subdivided into Ei type, Yamakawa type and Makurazaki type based on the hardness and particle size distribution, and Ei type is further subdivided into Higora, Doppuigora and Awameshigora (Hanai, 1961). In the Hiratanga profile (Ei town), Higora (the most typical Kora) appeared at 60 cm depth with 30 cm thickness. Its color was brownish black, hardness was 30 to 32 mm and friability was firm. There was a thick black volcanic ash soil above Kora and buried black volcanic ash soil layer below Kora. The age of Kora was estimated as 1,000 Y.B.P. by old archives (Hanai, 1952).

B. Physical properties

1. Particle size distribution and bulk density

As shown in Table 1, the clay content was 40 % or more in Kashinomi and Nigatsuchi and 10 % or less in Banban, Hanamure and Kora. Sand content was negatively correlated with clay content. Bulk density was less than 0.7 g/ml in Kashinomi and Nigatsuchi and more than 1.0 g/ml in Banban, Hanamure and Kora due to particle size distribution and total carbon content.

2. Shrinkage and hardening by air-drying

Figure 3 shows the relationships between water content and shrinkage. The water content of Kashinomi and Nigatsuchi was 68 % or more in field state. These two indurated soils showed remarkable water content decrease and shrinkage by air-drying. On the other hand, water content values for Banban, Hanamure and Kora were 37 % or less even in field state and showed no shrinkage by air-drying. Figure 4 shows the relationship between water content and hardness of soil blocks. Kashinomi and Nigatsuchi had hardnesses of 26 mm or less in field state. However these increased to up to more than 30 mm by air-drying. On the other hand, Banban, Hanamure and Kora had hardnesses of more than 30 mm in both field and air-dried state. Figure 5 shows the relationship between water content and unconfined compressive strength. Kashinomi and Nigatsuchi had strengths of less than 5 kg/cm^2 in field state. However these increased to up to more

	type	clay (%)	silt (%)	sand (%)	bulk density (g/ml)	T-C (%)	pH (H_2O)	CEC (cmol(+)/kg)	exchangeable cations (cmol(+)/kg				base saturation (%)
									Ca	Mg	K	Na	
Kashinomi	1	40	15	35	0.74	3.4	5.6	9.3	0.7	0.2	0.1	0.2	14
Nigatsuchi*	1	67	24	9	0.42	3.0	5.6	27.5	2.3	1.4	0.2	2.5	16
Banban	2	1	10	89	1.06	0.4	5.9	8.9	1.6	0.3	0.1	0.2	25
Hanamure	2	2	20	78	1.18	0.4	6.2	3.2	1.1	0.1	0.1	0.2	47
Kora	2	1	15	84	0.95	0.2	6.0	6.2	5.7	0.8	0.1	0.4	112

	phosphate retention (%)	selective dissolution					primary mineral composition**		rock type	age (yr)***
		Sio (%)	Alo (%)	Feo (%)	Alp (%)	Fep (%)	heavy mineral	light mineral		
Kashinomi	83	1.75	4.22	1.13	0.40	0.04	Ho>Op>Hy	Wp>VG>Pl	dacite	20000
Nigatsuchi	99	5.14	7.68	2.74	0.36	0.04	Hy>Op>Au	VG>>VG>>Pl	andesite	15000~20000
Banban	72	4.42	6.18	3.15	0.19	0.05	Au>Op>Ol	VG>>Pl	basalt~andesite	10000~20000
Hanamure	53	2.61	2.61	1.85	0.65	0.02	Hy=Op>Au	VG>>Pl	andesite	4000
Kora	76	2.54	3.18	2.28	0.12	0.02	Op>Au>Ol	VG>>Pl	basalt	1000

* Data are of the hardest by air-drying in Nigatsuchi layers.
** Data of 0.1~0.2 mm fraction. heavy mineral ≥ specific gravity 2.96 ≥ light mineral. Au: augite, Ho: hornblend, Hy: hyperthene, Ol: olivine, Op: opaque mineral, Pl: plagioclase, Vg: volcanic glass, Wp: weathered particle.
*** The uppermost Nigatsuchi layer is 10000 yr and the lowermost is 30000 yr.

Table 1 - Physical, Chemical and Mineralogical Properties of Indurated Volcanic Ash Soils in Kyushu

than 8 kg/cm^2 by air-drying. Banban had a strength of more than 10 kg/cm^2 in both field and air-dried state. Hanamure and Kora had strengths of less than 3 kg/cm^2 in both states.

3. Slaking of Nigatsuchi

In order to determine the degree of slaking, soil blocks of Nigatsuchi were air-dried and soaked in water. This treatment was repeated four times, and the size distribution of soil blocks after each treatment was determined by sieving. As shown in Figure 6,

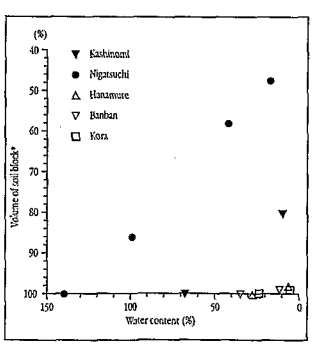


Figure 3
Water Content vs. Volume of soil block changes by air-drying
*Volume of soil in field moisture state is calculated at 100 %.

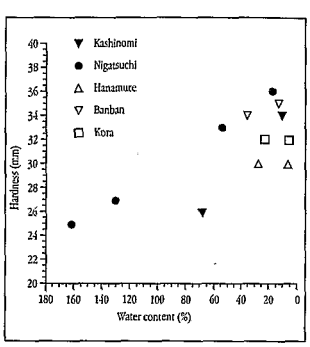


Figure 4
Water Content vs. Hardness of soil block changes by air-drying
*Hardness was measured by Yamanaka com penetrometer.

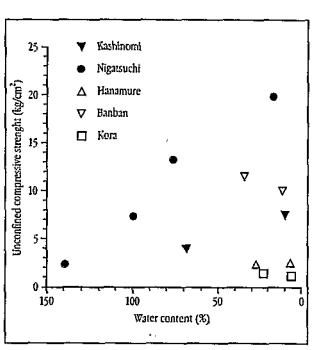


Figure 5
Water Content vs. Unconfined Compressive Strength by air-drying

Nigatsuchi was composed more than 90 % (wt%) of the fraction larger than 2 mm, and more than 50 % of the fraction larger than 10 mm, even after the fourth treatment. On the other hand, normal volcanic ash soil (surface horizon of the Takaono profile) slaked easily and the ratio of the fraction smaller than 2 mm was about 80 % and 100 % after the first treatment and the fourth, respectively.

C. Chemical properties

Total carbon content was more than 3 % in Kashinomi and Nigatsuchi and less than 0.4 % in Banban, Hanamure and Kora. In all samples, pH was around 6.0, CEC was less than 10 (cmol(+)/kg) except for 27.5 (cmol(+)/kg) in the case of Nigatsuchi and exchangeable cations contents were small. Phosphate retention was 86 % in Kora, 91 % in Hanamure, and 97 % or more in Nigatsuchi, Kashinomi and Banban.

D. Mineralogical properties

Selective dissolution analysis showed that allophane and imogolite are dominant in clay minerals of all these indurated soils. Primary mineral composition analysis showed that heavy mineral composition reflects the sources and rock types of the parent materials. Kashinomi erupted from Unzen volcano contained a high amount of hornblende. Kora erupted from Kaimon volcano and Banban erupted from Aso volcano contained olivine, which is common in volcanic ashes and scorias of basaltic andesite and basaltic rock types. Nigatsuchi and Hanamure had two-pyroxene type heavy mineral composition commonly observed in volcanic ashes of andesitic rock type.

E. Soil micromorphology

Kashinom, Nigatsuchi and Banban had a microstructure of small numbers of unconnected pores. On the other hand, Hanamure and Kora showed the microstructure of a large number of pores which were connected with one another (Figure 7). The former was massive structure or vughy structure and the latter was spongey structure or intergrain micro-aggregate structure (Bullock *et al.*, 1985).

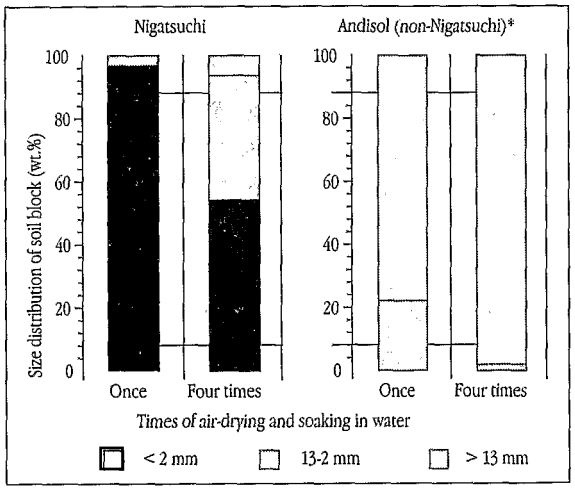


Figure 6
Size Distribution of Soils After Repeated Drying and Wetting
*Surface horizon of the Takaono profile

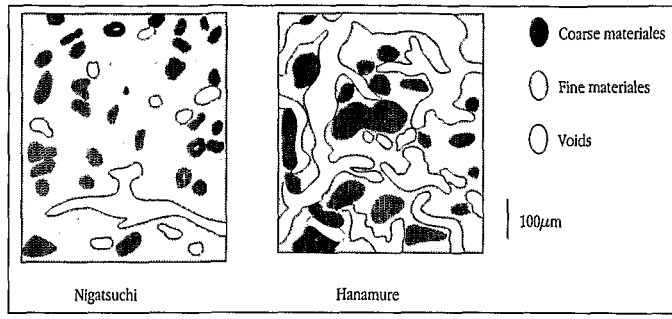


Figure 7
Soil Micromorphology

DISCUSSION

1. Typology of indurated volcanic ash soils

The indurated volcanic ash soils in Kyushu can be divided into two types, i.e. Kashinomi and Nigatsuchi (hereafter «type 1») and Banban, Hanamure and Kora (hereafter «type 2») based on the properties shown above.

Type 1 is not hard in buried state, but shrinks and becomes very hard by air-drying whereas type 2 is hard in field state and shows no shrinkage or increase of hardness by air-drying. Type 1 contains remarkably larger amounts of clay and total carbon, and shows lower bulk density than type 2.

The ages of type 1 soils are 10,000 Y.B.P. or older whereas type 2 soils vary from 1,000 to 10,000 ~ 2,0000 Y.B.P. There was no relationship between rock types or primary mineral composition of parent materials and types of indurated soils.

An intimate relationship was observed between unconfined compressive strength and micromorphology, and type 2 can be subdivided into two groups based on these characteristics, i.e. the layers with large unconfined compressive strength and massive or bughy type microstructure like Banban, and the layers with small unconfined compressive strength and spongey or intergrain micro-aggregate structure like Hanamure and Kora.

2. Genesis and classification

Type 1 soils were generated by soil formation process as they have the characteristics common in Andisols such as low bulk density and high phosphate retention. Their genesis and mechanism of induration are still unknown, although it has been shown that there is no difference between the physical and chemical properties of Nigatsuchi and other buried volcanic ash soils in Japan except for the higher water retention in buried condition and shrinkage and hardening by air-drying of Nigatsuchi (Kubotera & Yamada, 1995). Type 2 samples have the andic soil properties such as high Alo+1/2Feo contents, high phosphate retention values and high volcanic glass contents although the clay contents of these samples are relatively low and bulk density values are higher than 0.9 g/ml. We assume that a part of silt and sand fractions alter to allophane and/or imogolite. The profile description of the type 2 samples shows D or R horizons in Kora and Banban layers and C horizon in Hanamure layer. The carbon contents of these samples are very low in contrast to the high carbon contents of the type 1 samples. These data show that the geological weathering has advanced in these samples and we also think that the formation of the induration of type 2 may be geologically similar to *Tepetate* and *Cangahua*.

The classification of indurated volcanic ash soils is discussed in detail by Flach *et al.* (1994), including geologic indurated and pedogenic layers. The former are not regarded as soils in Soil Taxonomy therefore recognized as lithic or paralithic contact. The latter are indurated soil layers defined in Soil Taxonomy (Flach *et al.*, 1994), i.e. duripan cemented by silica, petrocalcic horizon by calcium carbonate, petrogypsic horizon by calcium sulfate, placic horizon by iron or iron and manganese or iron-organic matter complex, orthstein which is the cemented spodic horizon and fragipan which is the loamy or sandy subsurface horizon with low content of organic matter and high bulk density, and becomes hard when dry but slakes in the water.

Although type 1 is pedogenic, they cannot be classified into any above-mentioned pedogenic indurated layers in Soil Taxonomy because they are not indurated in buried state and no cementing material such as silica, calcium and iron was detected by EPMA. Although type 1 and fragipan have the same characteristics of hardening by air-drying, type 1 is not fragipan because it has a high carbon and clay content, and air-dried soil blocks do not slake in water. Therefore type 1 is defined, in the present Soil Taxonomy, not as indurated layers but buried volcanic ash soil layers. As type 2 is geologic, it is defined as lithic contact or paralithic contact in the present Soil Taxonomy as discussed by Flach *et al.* (1994).

3. Soil management

As discussed above, there are conspicuous differences in physical and chemical properties of type 1 and type 2 indurated soil layers. This means that different soil management is required for each type. Type 1 soils are not problematic in buried state, but once exposed and air-dried they shrink and become very hard. As shown in Figure 6, type 1 remains as large blocks even after repeated wetting and drying in comparison with normal Andisols, so it is important to break soil blocks thoroughly immediately after exposure. Productivity of Nigatsuchi had been improved by breaking soil blocks and heavy applications of phosphate and manure in Kumamoto prefecture (Miyauchi *et al.*, 1976). As type 2 is indurated in both buried and exposed state, breaking or removal are needed if they lie near the surface. Productivity of upland fields in Kora area was remarkably improved with breaking of Kora by rake dozer (Matsushita *et al.*, 1960).

Deep soil layers are easily exposed during large scale field development by heavy machine today, which means that probability of exposure of the problem soils such as indurated soil layers is increasing. It is important to survey the existence of problem soil layers in advance and to prepare the appropriate measures if they exist.

References

BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T.; BABEL, U., 1985: *Handbook for Soil Thin Section Description*, Waine Research Publication, Wolverhampton, United Kingdom, p. 47-49.

CHIKANO, K.; KOGA, T., 1982: Application of Soil Survey for Upland Reclamation in Western Foot of MT. Aso., in *Soils in Kyushu*, Kyushu National Agricultural Experiment Station, Japan, p. 191-202 (in Japanese)

CULTIVATED SOIL CLASSIFICATION COMMITTEE, 1995: *Classification of Cultivated Soils in Japan*, The National Institute of Agro-Environmental Sciences, Tsukuba, Japan, 37 p. (in Japanese)

FLACH, K. W.; NIMLOS, T. J.; ENGEL, R. J., 1994: Criteria and Classification of Indurated Volcanic Soil Horizons, in *Proceedings of 15th World Congress of Soil Science*, Vol. 6a, p. 481-486.

HANAI, H., 1952: Studies on the «Kora» Horizons Distributed in the Southern Satsuma Penisula. I. Chemical Composition, in *Bulletin of Kagoshima University*, 1, p. 29-41 (in Japanese with English Summary)

HANAI, H., 1961: Studies on the «Kora» Horizons Distributed in the Southern Satsuma Penisula IV. Distributions of the «Kora» horizons, in *Bulletin of Hyogo University of Agriculture*, 5, p. 54-64 (in Japanese with English Summary)

KUBOTERA, H.; YAMADA, I., 1995: Characteristics of Induration of Tephra-derived Soils in Kyushu. (1) Morphological, Physical, Chemical and Mineralogical Properties of «Nigatsuchi» in the Western Foot Area of Aso Volcano in Kumamoto Prefecture, in *Pedologist*, 39, p. 84-98 (in Japanese with English Summary).

MATSUSHITA, K.; UDAGAWA, Y.; OBARA, H.; SEKI, T., 1960: Deep Tillage of Upland Fields in the Volcanic Ash Soils, in *Bulletin of Kagoshima Prefecture Agricultural Experiment Station*, A Special Number, p. 220-243 (in Japanese with English Summary).

MIYAUCHI, T.; CHIKANO, K.; MORITA, S.; KOGA, T.; KAWANABE, M.; KOZAI, N., 1976: Characteristics of So-called «Nigatsuchi» (Buried Volcanic Ash Layer) in Kumamoto Prefecture, in *Bulletin of Kumamoto Prefecture Agricultural Experiment Station*, 6, p. 121-143 (in Japanese)

RESEARCH ASSOCIATION OF SOIL PHYSICS, 1979: *Soil Physical Properties and Plant Growth*, Yokendo, Japan, 190 p. (in Japanese)

SHOJI, S.; NANZYO, M.; DAHLGREN, R., 1993: *Volcanic Ash Soils*, Elsevier, Amsterdam, 235 p.

SOIL SURVEY STAFF, 1994: *Keys to Soils Taxonomy*, 6th Edition, Pocahontas Press, Virginia, USA, 64, p. 14-22.

TAKADA, K.; TSUNO, R., 1982: Distribution of Kora Layer and Agriculture in Handa Plateau, in *Soils in Kyushu*, Kyushu National Agricultural Experiment Station, Japan, p. 231-240 (in Japanese)

YAMADA, I.; KUBOTERA, H., 1996: Tephras and Soils in Aso Region, Central Kyushu, Japan, in *Miscellaneous Publication of the Kyushu National Agricultural Experiment Station*, 83, p. 1-35 (in Japanese with English Summary)

YANO, T.: Private letter.

Characterization of Three Andosols of the Azores Archipelago (Portugal) Showing Differents Types of Indurated Horizons

Jorge PINHEIRO

Abstract

Data of three Andisols showing different types of indurated horizons are presented and their processes discussed. In pedons with placic horizons, cementation may occur under the iron pan either as the result of a previous coprecipitation of transported Al-Si, as suggested by the high values of allophane found, or may have a lithological origin. In both cases the cementation intensifies wetness conditions of the above horizons and favors lateral movement of iron-rich solutions. The third pedon, representative of Hydric Andisols, shows strong properties of shrinkage and hardness upon drying, associated with a very high microporosity, suggesting the existence of some type of hydrogel structure still not well understood.

Keywords: *Andisols - Placic Horizon*

INTRODUCTION

Soils of the Azores archipelago have developed from modern volcanic materials under humid temperate climatic conditions, belonging in large extent to the category of Andisols (Soil Survey Staff, 1992).

Especially at higher altitudes, in general over 500 meters, where cooler and wetter conditions prevail, a poorly drained condition frequently develops as the result of indurated horizons generally located in the top half-meter of the profile, being the placic horizon (Soil Survey Staff, 1975) the most frequent one. Nevertheless, other constraining horizons can also occur, such as partially cemented layers or horizons which become irreversibly hard when exposed to a surfacing condition.

MATERIALS AND METHODS

Three pedons of Andisols were selected to cover some of the most frequent forms of indurated horizons that can be found in the Azores. Table 1 shows soil classification and site details.

Pedons S. Barbara and Caldeira, studied by Pinheiro (1990), are representative of ashy-pumiceous Placic Andisols, the second one additionally exhibiting a partially cemented fine-sandy horizon which influences the genetic mechanism of the placic horizon lying above it. Pico pedon, firstly described by Madeira *et al.* (1996), is representative of Hydric

Andisols which shrink and become irreversibly very hard when dry, being probably very similar to those from Japan, referred as «Nigatsuchi» by Kubotera and Yamada (1994).

Pedon designation	Lithology	Classification (Soil Taxonomy)		Altitude (m)	Mean annual rainfall (mm)	Mean annual temperature (°C)
		1975	1994			
S. Barbara S	ashy/pumiceous	Placaquod*	Placudand	765	3,800	12.5
Caldeira	ashy/pumiceous	Placandept	Placudand	600	3,000	13.5
Pico	ashy/hydrous	Hydrandept	Hydrudand	550	2,700	14.0

* In this profile the Bsm horizon satisfies the chemical criteria of spodic horizon (data not totally presented).

Table 1 - Soil Classification and Site Details

Morphological descriptions and horizon designations were referred to the Soil Survey Manual (Soil Survey Staff, 1980). All laboratory determinations were performed under the methodology conventionally used for volcanic soils and mostly described by Blakemore *et al.* (1981).

RESULTS AND DISCUSSION

Environmental conditions and soil morphology

Soils with placic horizons, represented by S. Barbara and Caldeira pedons, are extensive in the uplands, were annual rainfall is estimated to be over 3,000 mm and soil moisture regimes tend to be perudic or aquic. Mean annual air temperatures are in the range of 12-14 °C with a mean variation of 5 °C between summer and winter. Parent materials are rhyolitic pyroclasts (pumice and ash) or lapilli from basaltic nature, frequently showing a relatively weak weathering degree. These soils, in general, support a peat-forming ericaceous and junipers community or grassy semi-natural vegetation. In S. Barbara pedon, the placic horizon develops in the transition between an organic rich horizon of high moisture retention, peaty at the surface, and the better aerated coarse material of the BC horizon. In the other pedon, the placic horizon occurs in a lithologic discontinuity on the top of an indurated and somewhat cemented fine-sandy layer showing iron mottling associated to a low hydraulic conductivity. This cementation intensifies wetness conditions of the above horizons and favors lateral movement of iron-rich solutions.

At the micromorphological level, placic horizons are defined by an intense and progressive accumulation of a Fe-oxides plasma filling intergranular spaces and impregnating the surface of the vitric fragments of the mineral skeleton, forming a yellowish red to dusky red non-stratified isotropic mass. The absence of stratification of the ferruginous mass, indicating that precipitation takes place directly from the solution, suggests that the dominant process involved, concerning iron oxide accumulation and the development of the placic horizon, is a selective movement of dissolved iron into the thin ironpan.

The Pico soil, representing the Hydric Andisoil, is not indurated in the buried natural moist condition, being the formation of irreversible hardening due to air drying, generally visible only in exposed cuts in the landscape, where the shrinked hard subangular

blocky peds detach in «bunches» from the humid massive surface. The indurated fragments do not slake in water and shear strength, determined by an unconfined compression test, can reach values as high as 15 Kg/cm^2.

Physical and chemical properties

Physical and chemical analytical results are shown in table 2. The three pedons well accomplish the andic properties criteria, namely bulk density, phosphate retention, and Alo+1/2Feo values.

Water retention (1.5 MPa of undried samples) is extremely high for the Pico soil, highlighting its «hydrous» character, which is accompanied by a particularly low bulk density, with values around 0.2 g/cc, and shrinkage, after oven drying, up to five times.

Organic carbon (C) contents are quite high in all the studied pedons, and pH (H_2O) values are below 5 in most of the organic-rich horizons, but tend to increase gradually with depth, ranging from 5 to 6 in all the horizons below the uppermost ones. The high content of organic matter of the top horizons, lowering pH (H_2O) below 5, inhibits the formation of allophane and imogolite (Shoji *et al.*, 1982).

All the horizons, with the exception of the uppermost ones, show pH (NaF) values higher than 10, which indicates the presence of allophane or humus-Al. The phosphate retention values (P ret) show similar trends reflecting the amounts of active Al (acid-oxalate-extractable Al).

Alp and Fep contents are low in the uppermost horizons, but they tend to increase in the other horizons above the Bsm being Alp values higher then those of Fep. The accumulation of Fe in placic horizons is very marked, representing the maximum level of Fe accumulation in the profile, as shown by oxalate (Feo) and dithionite-citrate (Fed) data. Allophane, estimated by the method of Parfitt and Wilson (1985), is also present in significant amounts in the Placic Andisols but its higher value is attained in the Hydric Andisoil.

Nature of the induration processes

The mechanisms responsible for Fe accumulation as indicated by the values of Fep/Feo ratios of the placic horizons suggest the occurrence of a process of redox nature, where Fe, accumulated in the Bsm horizons, is mainly present as inorganic poorly ordered forms like ferrihydrite. Campbell and Schwertmann (1984), using differential X-ray diffraction, determined the Fe-oxide mineralogy of 15 placic horizons developed in a variety of parent materials. They found a very strong correlation between Feo values and abundance of ferrihydrite.

Both Placic pedons, S. Barbara and Caldeira, show some sort of compaction and cementation beyond the placic, down to the BC horizon, but while in the former the cementation is weak and progressive, in the second one that condition is much more consistent and homogeneous. Morphological evidence and chemical data suggest that in the first case the progressive cementation may have been the result of a previous coprecipitation of transported Al-Si, since allophane presents its highest values in these horizons, while in the second situation the cementation, apparently, is of lithologic origin rather then from pedogenetic nature. However, in both cases the consequent increase of bulk density at this level of the profile, might have been responsible for the intensification of reductive conditions above. About the indurating process in Pico soil, the hydric conditions associated with a very high microporosity, suggest the existence in this constituents of some type of hydrogel-like structure which irreversibly collapses upon drying, whose nature and genesis is, at present, certainly rather unknow.

1,5 Mpa %	C %	pH H_2O	pH NaF	P ret %	Alp %	Alo %	Alp/Alo	Fep %	Feo %	Fep/Feo	Sio %	Al/Si	Alloph. %	Fed %	Fed-Feo
68.0	34.0	4.8	7.9	41	0.7	0.5	1.40	0.2	0.2	1.00	0.1	•	0.0	•	•
59.7	13.3	5.0	10.7	77	1.1	1.0	1.10	0.5	0.7	0.71	0.2	•	0.0	•	•
77.2	17.2	5.1	11.2	92	3.2	2.4	1.30	0.1	0.1	1.00	0.1	•	0.0	0.1	0.0
43.3	5.8	5.2	11.0	96	2.4	3.5	0.69	8.5	10.5	0.81	0.7	1.6	4.3	11.1	2.0
29.4	0.9	5.4	10.8	98	0.4	5.1	0.10	0.1	1.3	0.10	2.5	1.9	17.6	1.6	1.2
73.2	2.9	5.5	10.8	99	0.7	5.5	0.13	0.7	3.3	0.21	2.2	2.2	18.3	3.3	2.6
65.0	12.1	4.8	9.6	45	0.9	0.9	1.00	0.6	0.8	0.75	0.0	•	0.0	•	•
25.7	3.1	5.1	10.1	65	0.4	0.4	1.00	0.3	0.3	1.00	0.0	•	0.0	•	•
35.7	2.2	5.5	10.9	89	0.9	1.9	0.47	1.0	3.2	0.32	1.0	1.0	5.2	5.3	2.2
•	0.7	5.9	10.8	92	0.1	2.7	0.04	0.1	5.6	0.02	1.5	1.7	9.6	7.1	5.5
46.8	1.1	5.6	10.6	92	0.1	2.6	0.10	0.1	3.9	0.05	1.5	1.7	10.0	3.9	3.8
196.0	19.9	5.1	11.5	99	4.2	4.1	1.00	4.5	4.9	0.92	0.9	•	0.0	6.3	1.4
263.0	14.5	5.5	11.5	98	4.0	6.8	0.59	3.5	3.8	0.92	1.5	1.9	11.0	6.7	2.9
•	4.5	5.6	11.0	100	1.0	5.7	0.18	0.4	3.1	0.13	1.7	2.8	21.0	3.4	0.3
•	9.5	5.8	11.1	100	1.9	7.6	0.25	1.4	3.5	0.40	2.2	2.6	22.0	6.0	2.5
•	7.3	5.7	10.9	100	1.3	8.3	0.16	0.2	2.5	0.08	2.7	2.6	32.0	6.2	3.7

Table 2 - Selected Physical and Chemical Properties

References

BLAKEMORE, L. C.; SEARLE, P. L.; DALY, B. K., 1981: *Soil Bureau Laboratory Methods: A. Methods for Chemical Analysis of Soils*, N. Z. Soil Bur. Sci. Rep. 10A (revised).

CAMPBELL, A. S.; SCHWERTMANN, U. S., 1984: Iron Oxide Mineralogy of Placic Horizons, in *J. Soil Sci.*, 35, p. 569-582.

KUBOTERA, H.; YAMADA, I., 1994: Induration of Air-Dried Volcanic Ash Soil in Aso Area of Japan, in *Proceedings of the 15th International Congress of Soil Science*, Vol. 7, p. 214-215.

MADEIRA, M.; PINHEIRO, J.; MEDINA, J., 1996: Características físico-químicas e mineralógicas de Andossolos do arquipélago dos Açores (Portugal) que endurecem irreversivelmente por secagem, in *Proceedings of the 13th Latin American Soil Science Congress* (accepted for publication).

PARFITT, R. L.; WILSON, A. D., 1985: Estimation of Allophane and Halloysite in Three Sequences of Volcanic Soils, New Zealand, in *Volcanic Soils*, CALDAS, E. F. and YAALON, D. H. (Editors), Braunschweig, p. 1-8.

PINHEIRO, J., 1990: *Estudo dos Principais Tipos de Solos da Ilha Terceira (Açores)*, PhD Thesis, University of the Azores, Portugal.

SHOJI, S.; FUGIMARA, Y.; YAMADA, I.; SAIGUSA, M., 1982: Chemistry and Clay Mineralogy of Ando Soils, Brown Forest Soils, and Podzolic Soils Formed from Recent Towada Ashes, Northeastern Japan, in *Soil Sci.*, 133, p. 69-86.

SOIL SURVEY STAFF, 1975: *Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*, Agric. Handbook, 436, USDA-SCS, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

SOIL SURVEY STAFF, 1980: *Soil Survey Manual (revised)*, USDA Soil Conservation Service, Washington, D.C.

SOIL SURVEY STAFF, 1992: *Keys to Soil Taxonomy*, 6th Edition, 1994, USDA Soil Conservation Service, Washington, D.C.

Dissolution Kinetics of Silicon and Aluminium in a Mollic Fragiudalf of Central Italy, Derived from a Volcanoclastic Sediment

Paolo LORENZONI, Paul QUANTIN, Massimo SPADONI

Abstract

In the sedimentary basin of Rieti (Central Italy) a Mollic Fragiudalf was studied in order to verify, through the analysis of differential dissolution kinetics of Si and Al, whether the presence of this two elements could be involved in determining the fragic characters of its deep horizons. The results of the main physico-chemical analysis confirmed the fragic features of the deep horizons Bt3x and Ctgx which have been already observed in the field study. Differential dissolution of Si and Al was performed using 0.5 N NaOH at 25 °C, and the values of silica and alumina obtained after each of ten consecutive extractions were cumulated to trace the cumulative curves of dissolution. Slope changes of the curves, which indicate changes in dissolution rate, allowed us to recognize three mineralogical phases with different degree of solubility. The total quantity of SiO_2 and Al_2O_3 dissolved in all the extractions and relative to each of these three phases was estimated, by a graphic method, together with SiO_2/Al_2O_3 molar ratio. This one was indicative of the mineralogical composition and behaviour of each horizon. This study showed an accumulation of free silica which could be present in the form of phytoliths or diatoms as well as a fine precipitate of opal-A and silica-gel in the whole soil, mainly in the Ap and Ctgx horizons. Moreover neogenesis of clay was more evident in Bt3x horizon. The volcanic origin of the parent material, a trachytic ash fall, probably deposited in a lacustrine environment, could have favoured the availability of Si and the authigenic formation of halloysitic clay from the weathering of glass and feldspars. Our study therefore corroborates the findings of previous studies by Chadwick et al. *(1987) and Karathanasis (1989) indicating the important role played by silica, probably as bonding agent, in contributing to produce characteristics of a fragipan.*

Keywords: *Fragipan - Al and Si Forms - Volcanoclastic Sediment - Italy*

INTRODUCTION

The term *fragipan* is used in Soil Taxonomy to designate a diagnostic subsurface horizon with particular characteristics such as compaction, high bulk density, very low porosity, moderate or weak brittleness in the moist state, very hard consistence after drying. These features represent a serious limiting factor for agricultural and nonagricultural uses of soils

since they restrict rooting depth and water percolation. As a result of their extent and importance fragipans have been for several years the subject of a great number of papers which, nevertheless, have not yet completely clarified the mechanism of their formation. A few soil scientists think its peculiar features mainly derive from physical processes (see Bryant, 1989), others believe that fragipans are a result of chemical bonding between the different constituents of the soil. Karathanasis (1989) has recently strenghtened the role of amorphous SiO_2 and Si-rich amorphous aluminosilicate as bonding materials in fragipan formation. The present study was therefore carried out in order to verify, through the analysis of the differential dissolution kinetics of Si and Al in a soil with fragipan (Mollic Fragiudalf), whether the presence of this two elements in their amorphous or crystalline forms, could have taken part in determining the fragic characters of deep soil horizons of the soil studied. We selected for this analysis a soil outcropping in the Rieti basin (Central Apennines; Carrara *et al.*, 1993).

MATERIALS AND METHODS

We excavated an Alfisol, whose deep horizons show characters of a fragipan in the form of extreme compaction and presence of a polygonal pattern bounded by bleached vertical streaks. The study site is located at 406 m a.s.l. (42°23' N, 12°52' E), on the left side of the Velino river, on a terraced surface mainly formed by a travertine. The parent material of the soil is a fine volcanoclastic deposit, probably reworked in a lacustrine environment. The soil was classified according to Soil Survey Staff (1992) as Mollic Fragiudalf. Five horizons, Ap, Bt1, Bt2, Bt3x and Ctgx were recognized and sampled. We also sampled a thick clayey infilling between prismatic peds in the deep part of the Bt horizon. Physico-chemical analysis (particle size distribution, bulk density, Cole, pH (H_2O), pH (KCl), pH (NaF), organic C, exchangeable basis, extractable acidity, CEC, Feo, Fed, total Fe) were carried out by standard methods. Clay mineral analysis was performed by XRD both on the podwer and oriented Mg saturated clay; the following treatments were also carried out: glycerol solvation, heating at 110 °C and 500 °C. The following procedure was used to study the differential dissolution kinetics of Si and Al: 0.5 g of soil, of each horizon, were placed in a centrifuge tube and shaked for 5 minutes with 0.5 N NaOH at 25°C. This procedure was repeated ten times consecutively and after every shaking the extractant solution was separated off the ground by centrifugation, collected separately in a 200 ml flask and finally made to volume with deionized water after adding 37 ml of concentrated HCl. Si and Al in solution so extracted were determined by AAS and the obtained values, converted to oxides, were cumulated to trace the dissolution curves. The amount of allophane from the rapidly soluble phase was calculated according to hydrated halloysite formula ($2SiO_2.Al_2O_3.4H_2O$) using the content of Al_2O_3 extracted (allophane % = Al_2O_3 % x 2.88). Allophane-linked SiO_2 was estimated multiplying Al_2O_3 extracted by 1.176 and free SiO_2 was estimated from it, by difference from total SiO_2.

RESULTS AND DISCUSSION

Physical and chemical properties

Table 1 shows the results of the physico-chemical analysis.

Oven dry bulk density increases from 1.11 Mg m-3 in Bt2 to 1.53 and 1.57 in Bt3x and Ctgx respectively. On the contrary Cole (coefficient of linear extensibility) decreases from 0.076 in Bt2 to 0.027 and 0.023 in the two deeper horizons. Clay content is higher than 53 % both in the Ap horizon and in the three Bt subhorizons with a maximum of 66 % in Bt1. The highest

Horizon	Ap	Bt1	Bt2	Bt3x	Ctgx	clayey infilling
Depth (cm)	0-35/40	35-40/65	65-120	120-190	190-220+	
Texture (%)						
sand	15.1	10.4	19.8	20.1	23.9	7.8
silt	31.5	23.9	23.5	22.5	38.5	15.2
clay	53.4	65.7	56.7	57.4	37.6	77.0
Oven dry bulk density ($Mg.m^{-3}$)	n.d.	n.d.	1.1	1.5	1.6	n.d.
Bulk dens. 20 % hum. ($Mg.m^{-3}$)	n.d.	n.d.	n.d.	1.9	1.9	n.d.
COLE	n.d.	n.d.	0.1	0.0	0.0	n.d.
pH (H_2O)	7.4	7.4	7.2	6.9	7.0	n.d
pH (KCl)	6.0	6.3	6.1	5.9	5.8	n.d.
pH (NaF)	9.8	10.3	10.2	10.1	10.0	n.d.
C (%)	0.9	0.1	0.1	0.0	0.0	n.d.
Exchang. basis ($cmol(+)Kg^{-1}$)						
Ca	15.8	15.3	14.8	11.4	9.3	n.d.
Mg	1.1	0.8	0.6	0.4	0.6	n.d.
Na	1.2	1.1	1.2	1.4	1.2	n.d.
K	0.9	1.1	1.8	2.5	1.0	n.d.
Extr. ac.(BaCl2) ($cmol(+)Kg^{-1}$)	8.7	11.2	12.5	12.5	5.0	n.d.
CEC (NH_4-Ac.)($cmol(+)Kg^{-1}$)	27.4	29.3	34.3	32.8	10.5	n.d.
Base saturation (NH_4-Ac.) (%)	69.0	63.0	54.0	48.0	115.0	n.d.
(Mg+Na)/Ca	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	n.d.
Fe_o (%)	2.0	2.1	2.3	2.5	0.8	0.8
Fe_d (%)	2.8	3.3	3.8	3.7	1.7	1.7
Fe_t (%)	6.6	7.7	8.3	8.0	4.0	4.2

Table 1 - Analysis of the Main Physico-chemical Properties of the Soil Studied

value of clay content (77 %) is found in the clayey infilling. Clay content decreases to 37 % in Ctgx horizon. Both pHH_2O and pHKCl decrease downward, the former from 7.4 to 6.9, the latter from 6.3 to 5.8. The pHNaF, except in the Ap horizon, ranges from 10.0 to 10.3 in the whole profile. DpH (pHH_2O - pHKCl), a little higher than 1 in all the horizons, indicates clays with strong permanent charge (halloysite, illite) and consequently absence of Al-rich allophane. Organic C content is very low, 0.07 both in Bt1 and Bt2 and is absent in Bt3x and Ctgx horizons. CEC ranges from 34.3 in Bt2 to 10.5 in Ctgx, corresponding to ≈ 45÷60 cmol(+)/100 g of clay; this is probably related to the presence of a halloysite-illite mixture. Base saturation decreases from the epipedon to Bt3x horizon. In Ctgx a value of oversaturation shows that this trend is reversed. (Mg+Na)/Ca ratio, proposed by Hutcheson *et al.* (1959) as revealing index for fragipan horizons, increases from 0.12 in Bt1 and Bt2 to 0.16 and 0.19 in Bt3x and Ctgx respectively.

Clay mineral analysis

X-ray diffraction patterns of clay powder show the presence of halloysite (0.7 nm) (peaks relative to d ≈ 7.50 - 4.46 - 3.59 - 2.56 Å) and quartz (peak relative to d = 3.34 Å).

The height of the halloysite peaks remains almost even in all the analyzed horizons but is higher in the clayey infilling sample; the height of quartz peak in Ctgx horizon is twice greater than that in Bt2 horizon. X-ray diffraction patterns show that halloysite (0.7 nm) is the main clay mineral and detect also a small quantity of illite (the peak relative to 1.0 nm remained in fact also after heating at 500 °C). Illite is relatively more present in the deep zone of the profile (Ctgx horizon) than in subsurface horizons (Bt1 and Bt2), while the minimum quantity is in the Bt3x horizon.

Dissolution kinetics of Si and Al

Figs. 1a and 1b show dissolution curves of Si and Al, traced by cumulating the values obtained after each extraction.

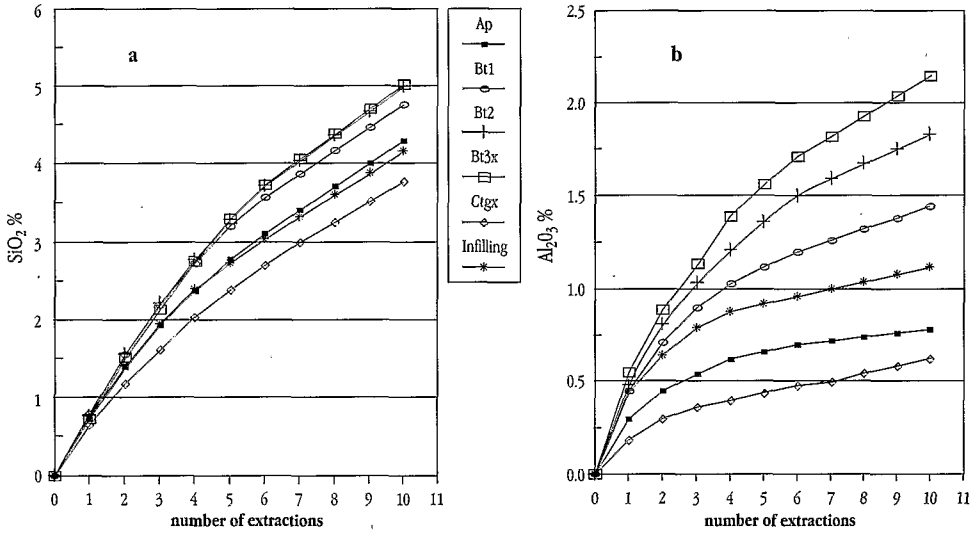


Fig. 1 - Dissolution Kinetics of Si (1a) and Al (1b)
The cumulative values of SiO_2 and Al_2O_3 are expressed in % on weight of the fine earth, after each extraction with 0.5 N NaOH at 25 °C.

Changes in the slope of the curves indicate changes in dissolution rate which correspond, in turn, to mineralogical phases with different degree of solubility. We recognized three phases: a rapidly soluble phase (**phase «a»** represented by the initial, steeper part of the curve) mainly corresponding, at concentration and temperature condition of the extractant, to mineral hydrated non crystalline products (silica gel and allophane); a little more stable phase with intermediate solubility (**phase «b»**) corresponding to a mixture of non crystalline components (e.g. opal-A < 0.1 µm in size and allophane); a more slowly and regularly soluble phase (**phase «c»**) represented by a mixture of more stable non-crystalline minerals (e.g. biological opal a few µm in size) and fine instable clay minerals of halloysitic and illitic type. Starting from the segment of the curve which presents a lower and even slope it was possible to obtain by a graphic method on the

axis of ordinate the quantity of product dissolved on the whole in all the extractions and relative to this phase. Subsequently we estimated the approximate quantity corresponding to the other phases by difference from total amount. Table 2 shows these values together with SiO_2/Al_2O_3 molar ratio corresponding to the three phases. The values of molar ratio indicate the mineralogical composition and behaviour of each horizon. In Fig. 2 they are presented, extraction by extraction, with the likely trend of the corresponding curves. In a general way the proportion of SiO_2 increases towards a high limit. This shows that phase «c» is dominated by a more stable silica, non-crystalline, type opal-A, probably of biological origin, or derived from a mineral precipitate. This trend is more clear in the Ap horizon reaching a value (≈ 25) close to that of biological opal, diatoms or phytoliths type. Phase «a» of this horizon also indicates the presence of very soluble silica (gel) while phase «b» indicates very fine opal (< 0.1 μm) because the molar ratio was found to be higher than the expected values for clay minerals.

Horizons		Ap	Bt1	Bt2	Bt3x	Ctgx	Infilling
SiO_2%	Total	4.29	4.77	4.98	5.04	3.82	4.10
	Phase a	0.58	0.62	0.62	0.62	0.62	0.60
	Phase b	0.77	1.03	1.14	1.14	0.40	0.76
	Phase c	2.94	3.12	3.22	3.28	2.80	2.74
Al_2O_3%	Total	0.81	1.44	1.83	2.12	0.62	1.12
	Phase a	0.30	0.30	0.40	0.37	0.05	0.25
	Phase b	0.22	0.55	0.63	0.73	0.20	0.45
	Phase c	0.29	0.59	0.80	1.02	0.42	0.42
SiO_2/Al_2O_3	Total	9.00	5.63	4.63	4.04	10.47	6.22
molar ratio	Phase a	3.29	3.51	2.64	2.85	21.08	4.08
	Phase b	5.95	3.18	3.08	2.65	3.40	2.87
	Phase c	17.23	8.99	6.84	5.47	11.33	11.09

Table 2 - Selective Sequential Dissolution with NaOH 0.5 at 25 °C
SiO_2 and Al_2CO_3, on weight basis of the fine earth, and molar ratio SiO_2/Al_2CO_3

The curves relative to the Bt horizons firstly show an increasing trend from values of 2÷3 to 6÷9 and become stable on a line parallel to x axis. The relative increasing of SiO_2 in the upward segment of the curves, corresponding to «a» and «b» phases, indicates that the aluminosilicate component decreases and that there is a trend towards a stable mixture (phase «c») of opal-A and a slowly soluble clay mineral.

The opal proportion decreases from Bt1 to Bt3x. Phase «a» (SiO_2/ Al_2O_3 molar ratio from 2.2 to 3) seems to be formed by a mixture of allophane and silica gel. The curve corresponding to the infilling is similar to those of Bt horizons but is characterized by a twice greater proportion of silica (opal-A) in phase «c», while the Ctgx horizon curve shows a particular trend: the first segment is similar to the Ap horizon one, with a certain relative abundance of a silica gel and scarcity of allophane (phase «a»); then, at the 4th extraction, it reaches an easily soluble product, almost exclusively formed by silica

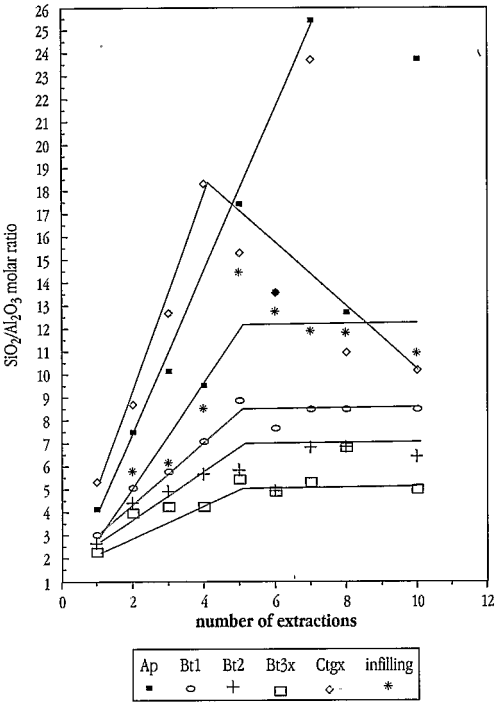


Fig. 2 - SiO_2/Al_2O_3 Molar Ratio after Each Extraction with 0.5 N NaOH at 25 °C and the Likely Trend of the Corresponding Curves

(opal A); finally it decreases towards values of 12÷10, corresponding to a dominant opal-A and a slowly soluble fine clay mineral. In Table 3, the estimate (in percentage of total soil) of free silica and allophane in phase «a+b», and of free silica and equivalent halloysite in phase «c» clearly show a greater amount of free silica and a smaller one of allophane in phase «a+b» of Ctgx horizon compared to the Bt horizons.

The horizon Ctgx, where the fragic characters are mostly expressed, shows a lower content of equivalent halloysite in the phase «c» and a free SiO_2/total (Al_2O_3+ SiO_2) ratio higher than those corresponding to Bt horizons.

Horizons	Ap	Bt1	Bt2	Bt3x	Ctgx	Infilling
Phase a+b						
Al_2O_3 %	0.52	0.85	1.03	1.10	0.25	0.70
SiO_2 %	1.35	1.65	1.76	1.76	1.02	1.36
Allophane % (1)	1.50	2.45	2.97	3.17	0.72	2.02
SiO_2 of allophane % (1)	0.61	1.00	1.21	1.29	0.29	0.82
free SiO_2 % (2)	0.74	0.65	0.55	0.47	0.73	0.54
Phase c						
Al_2O_3 %	0.29	0.59	0.80	1.02	0.42	0.42
SiO_2 %	2.94	3.12	3.22	3.28	2.80	2.74
Hydrated equivalent halloysite % (3)	0.84	1.70	2.31	2.94	1.21	1.21
free SiO_2 (basic formula Ht) % (3)	2.60	2.43	2.28	2.08	2.31	2.25
free SiO_2 / total (Al_2O_3 + SiO_2) %	80	65	57	48	72	71

(1) Hydrated halloysite as basic formula ($2SiO_2.Al_2O_3.4H_2O$); basic estimate: allophane = Al_2O_3 x 2.88
SiO_2 of allophane = Al_2O_3 x 1.176.
(2) free SiO_2 = total SiO_2 - SiO_2 of the allophane
(3) Same calculation constants as in note (1) from the amount of Al_2O_3 present in phase «c».

Table 3 - Estimation of Free Silica, Allophane and Equivalent Halloysite, on Weight Bass of the Fine Earth, in Phases «a + b» and «c»

CONCLUSIONS

The results of the physico-chemical analysis and the observations in the field study confirmed the fragic features of the deep horizons Bt3x and Ctgx of the profile studied. We found in fact extreme compaction and very hard consistence in the dry state, high bulk density, the presence of a polygonal pattern bounded by bleached vertical streaks, the absence of organic C and a relatively high Mg+Na/Ca ratio. The study of differential dissolution kinetics of Si and Al showed an accumulation of free silica which could be present in the form of gel and fine precipitate of opal-A as well as more stable biological forms (phytoliths, diatoms) in the whole soil, mainly in the Ap and Ctgx horizons. Moreover, from the data presented, neogenesis of clay was more evident in Bt3x horizon. The volcanic origin of the parent material, a trachytic fine ash fall, probably deposited in a lacustrine environment, has favoured the availability of Si and the authigenic formation of halloysitic clay from the weathering of glass and feldspars. The soil-forming processes occurred under hardwood forest vegetation in a warm temperate climate characterized by a dry season. Our study therefore corroborates the findings of previous studies by Chadwick *et al.* (1987) and Karathanasis (1989) indicating the important role played by silica, probably as bonding agent, in contributing to produce the characteristics of a fragipan. However we don't exclude that the original tuffaceous lacustrine deposit could have been involved in a process of physical ripening by compaction and desiccation of a waterlogged material during an initial phase of pedogenesis.

References

BRYANT, R.B., 1989: Physical Processes of Fragipan Formation, in *Fragipans: Their Occurrence, Classification and Genesis*, SSSA, Special Publication Number 24, Madison, Wisconsin, USA, p. 141-150.

CARRARA, C.; BRUNAMONTE, F., FERRELI; L., LORENZONI, P.; MARGHERITI, L.; MICHETTI, A.M.; RAGLIONE, M.; ROSATI, M.; SERVA, L., 1992: I terrazzi della medio-bassa valle del F.Velino, in *Studi Geologici Camerti*, Vol. speciale 1992/1, p. 97-102.

CHADWICK, O.A.; HENDRICKS, D.M.; NETTLETON, W.D., 1987: Silica in Duric Soils: I. A Depositional Model, in *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51, p. 975-982.

HUTCHESON, T. B.; LEWIS, R. J. JR.; SEAY, W. A., 1959: Chemical and Clay Mineralogical Properties of Certain Menphis Catena Soils of Western Kentucky, in *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 23, p. 474-478.

KARATHANASIS, A.D., 1989: Solution Chemistry of Fragipans - Thermodynamic Approach to Understanding Fragipan Formation, in *Fragipans: Their Occurrence, Classification and Genesis*, SSSA, Special Publication Number 24, Madison, Wisconsin, USA, p. 113-139.

SOIL SURVEY STAFF, 1992: *Keys to Soil Taxonomy*, 5th ed., SMSS Technical Monograph, number 19, Blacksburg, Virginia, 556 p.

Los suelos con cangahua en el Ecuador

Claude ZEBROWSKI

Abstract

Indurated volcanic soils are located in the North of the interandean basin. Soils are distributed according to a climatic toposequence. The indurated horizons (cangahua) *are located in paleosoils. Their hardness is very high in dry areas, at the bottom of the soil sequence, and lower in high altitude areas which are more humid. The soils with* cangahua *at less than 20 cm depth cover about 80,000 hectares.*

Keywords: Cangahua - *Ecuador - Soils Characteristics*

INTRODUCCIÓN

En el Ecuador, los suelos volcánicos que presentan capas duras llamadas cangahua (lo que significa tierra estéril) están localizados en la parte septentrional del callejón interandino. Sus características y distribución fueron detalladas en el marco de un inventario de los recursos naturales realizado de 1974 a 1984 por el Programa Nacional de Regionalización Agraria (PRONAREG) y el ORSTOM.

Esos trabajos desembocaron en la elaboración de mapas a escala 1:50.000 (Colmet-Daage *et al.*, 1974-1982) y posteriormente en mapas de síntesis a escala 1:200.000 (Colmet-Daage y Zebrowski, 1980-1984). Existe entonces la información básica relativa a la localización y las características de los suelos volcánicos endurecidos, pero dispersa en numerosos documentos.

En el marco del estudio de la «Rehabilitación y conservación de los suelos volcánicos endurecidos y estériles de América Latina» (contrato CE-STD3/ ORSTOM nº TS3*CT 930252), se había previsto una síntesis de los trabajos existentes con el fin de precisar la localización y la extensión de los diferentes tipos de suelo de cangahua.

El mapa de localización presentado (figura 1) es el resultado de esa síntesis. Las superficies ocupadas por los suelos fueron calculadas después de «scannear» los mapas edafológicos originales. El resumen de las características de los suelos se elaboró una vez examinados la descripción y los resultados analíticos de todos los perfiles descritos por Colmet-Daage *et al.*

Antes de presentar los resultados, se revela necesario recordar algunos grandes rasgos de la edafogénesis según las condiciones climáticas y el origen de los materiales en los Andes ecuatorianos.

EL CLIMA

El clima de la cuenca interandina, al Norte de Chunchi, límite meridional de los suelos de cangahua, es tropical de altura. Se caracteriza por una estación lluviosa de

octubre a mayo y dos estaciones secas, la una, bien marcada, de junio a septiembre, la otra, menos pronunciada, en diciembre-enero. En realidad, los climas se distribuyen según una topo-climo-secuencia (cuadro 1). El total anual de precipitaciones es inferior a 500 mm en las zonas más bajas y alcanza 1.500 mm en altura (Cadier *et al.*, 1978).

altura (m)	1.800	3.200	3.600
P media anual (mm)	< 500*	800 1.000	1.500
nº meses secos	> 4		< 4
régimen tº suelos	isohipertérmico	isotérmico	isomésico	isofrígido
vegetación	caña de azúcar	piso del maíz	piso de la papa	páramo
suelos	con capa muy dura	con capa dura	sin capa dura

Cuadro 1 - Topo-climo-secuencia

El número de meses secos disminuye entonces desde la parte inferior hacia la parte superior de la secuencia (según Cadier *et al.*, 1978, el mes seco corresponde a aquel en el que la evaporación potencial promedio es superior a las precipitaciones medias mensuales).

Las temperaturas varían poco a lo largo del año, y la del suelo es muy cercana a la del aire. Disminuyen igualmente con la altura, de manera que el régimen de temperatura del suelo, isohipertérmico a menos de 1.800 m.s.n.m., pasa por los niveles isotérmico e isomésico antes de alcanzar el régimen isofrígido, en el límite de los páramos, a cerca de 3.600 m.s.n.m.

Los cultivos se reparten bastante bien a lo largo de esta toposecuencia al igual que los suelos. Aquellos que presentan capas endurecidas poco profundas están localizados generalmente en las partes bajas de las vertientes que reciben una precipitación media anual inferior a los 1.000 mm.

LOS MATERIALES ORIGINALES DE LOS SUELOS: EL VOLCANISMO RECIENTE EN EL ECUADOR

El volcanismo reciente o Cuaternario se caracteriza por la abundancia de emisiones bajo la forma de lavas pero sobre todo de proyecciones piroclásticas. Se distinguieron dos generaciones de piroclastos (Winckell y Zebrowski, 1992). Una, calificada de antigua, se inició hace más de 50.000 años y concluyó alrededor del año 11.000 BP, es decir a finales de la época glaciar. La segunda, llamada reciente, comenzó en los años 8.000 BP produciendo depósitos históricos.

Las proyecciones antiguas alcanzaron una extensión particularmente importante puesto que cubren, en la parte septentrional del Ecuador, una superficie igual al tercio del país. Fueron identificadas en grandes espesores al Oeste hasta una vertical que pasa por Quinindé, al Sur hasta la latitud de Chunchi y al Este hasta el pie de las vertientes orientales de la Sierra. Nunca se encuentran en cambio en los páramos que estaban en esa época cubiertos de glaciares. En las cuencas interandinas, los piroclastos presentan espesores que pueden alcanzar 30 a 40 m, y muy localmente un centenar de metros. Corresponden a emisiones de tipo freatomagmático o a caídas aéreas, a menudo a una alternancia de las dos. Las formaciones llamadas cangahua están siempre localizadas en esos materiales.

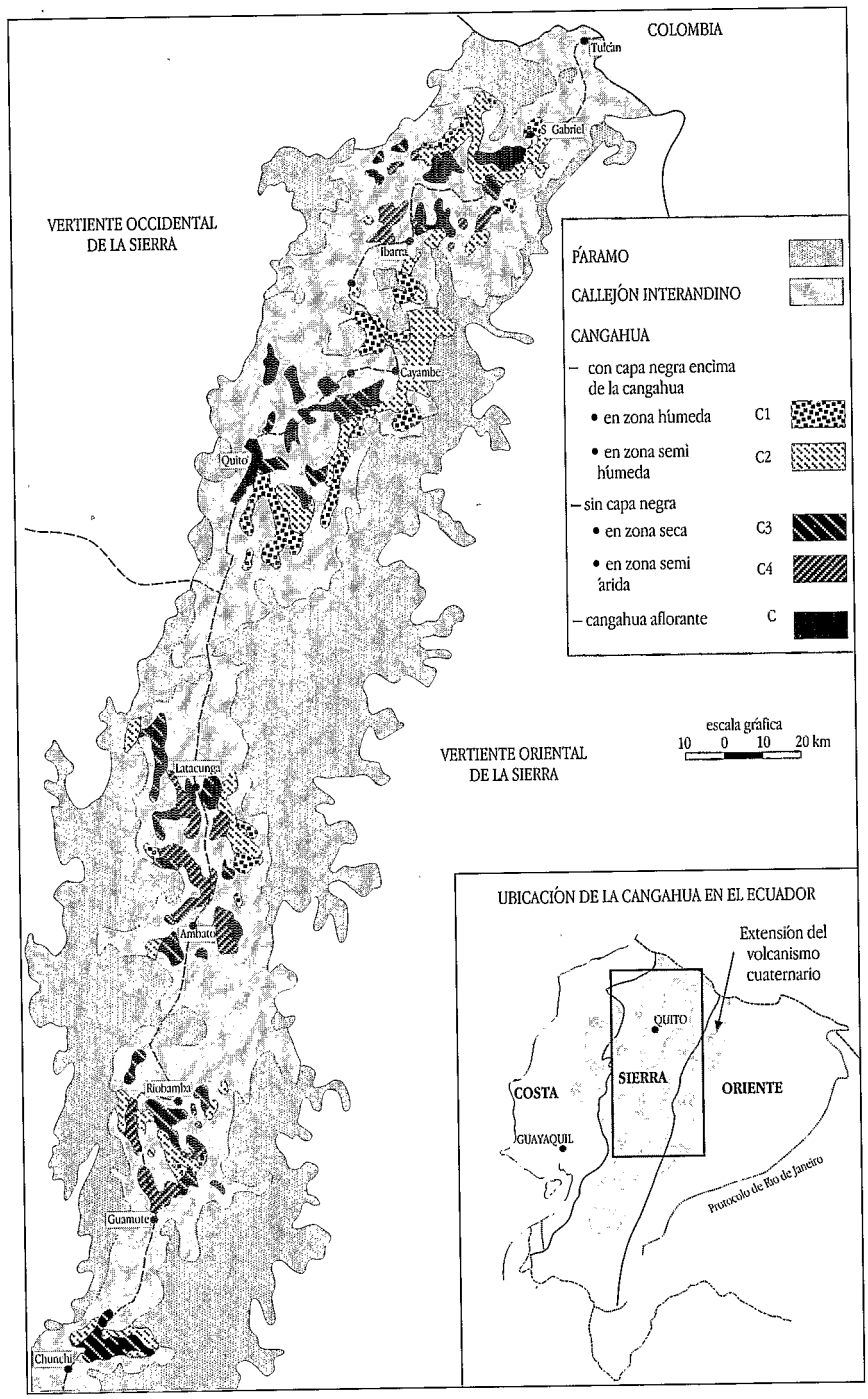

COLOMBIA
Tulcán
S. Gabriel
VERTIENTE OCCIDENTAL
DE LA SIERRA
Ibarra
Cayambe
Quito
Latacunga
Ambato
Riobamba
Guamote
Chunchi
VERTIENTE ORIENTAL
DE LA SIERRA
PÁRAMO
CALLEJÓN INTERANDINO
CANGAHUA
– con capa negra encima de la cangahua
• en zona húmeda C1
• en zona semi húmeda C2
– sin capa negra
• en zona seca C3
• en zona semi árida C4
– cangahua aflorante C
escala gráfica
10 0 10 20 km
UBICACIÓN DE LA CANGAHUA EN EL ECUADOR
Extensión del volcanismo cuaternario
QUITO
SIERRA
COSTA
ORIENTE
GUAYAQUIL
Protocolo de Río de Janeiro

Figura 1

Las proyecciones recientes tienen una extensión sensiblemente similar a la de las anteriores a las que, por lo tanto, recubren, pero siendo posteriores al final de la última glaciación, cubren igualmente al páramo en donde reposan sobre el substrato metamórfico erosionado por los glaciares. Su espesor es menor y no alcanza, en el caso de los depósitos que cubren a los páramos, sino 2 a 4 m. Corresponden únicamente a caídas aéreas de tipo lapillí y ceniza. De esas fases de caídas recientes, dos alcanzaron una extensión importante. La primera fue datada de 2.600 años, la segunda de 1.600 años (Winckell y Zebrowski, por publicarse).

Los suelos que se observan son entonces suelos compuestos: el suelo superior proviene de las piroclastitas recientes, el suelo enterrado de las piroclastitas antiguas.

EVOLUCIÓN DE CIERTAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES EN LA TOPOSECUENCIA

Las piroclastitas recientes

El espesor de los suelos formados a partir de estas caídas está estrechamente vinculado a la altura. Los suelos menos espesos están localizados en la parte baja de la secuencia, los más espesos en la parte alta. En efecto, la alteración de las piroclastitas es menos rápida en clima seco y sobre todo la erosión ha sido más fuerte en las zonas secas cultivadas desde mayor tiempo atrás. Sin embargo, el espesor de los suelos depende igualmente de la distancia con relación al volcán. Así, en la parte inferior de la cuenca de Ambato, en donde se acumularon los depósitos del Tungurahua y del Cotopaxi, los suelos en pendientes débiles son relativamente espesos mientras que, más al Sur, en la región de Cuenca en donde el espesor de los depósitos fue menor debido a su alejamiento de los volcanes, los suelos, que tienen algunas decenas de centímetros de espesor en los páramos, han sido completamente erosionados en la cuenca interandina.

Asimismo, a medida que aumenta la altura, el color de los suelos se torna más oscuro debido al aumento en contenidos de materia orgánica y al cambio de la naturaleza de los acidos húmicos, la textura se afina y el pH, así como la tasa de saturación del complejo absorbente, disminuyen.

Las piroclastitas antiguas

La diferenciación de las capas de los suelos desarrollados sobre materiales antiguos aumenta con la altura.

En las regiones semiáridas (régimen de humedad usti-arídico) y secas (régimen de humedad ústico), los materiales están poco alterados; los diferentes depósitos son perfectamente identificables, los paleosuelos corresponden a una sucesión de capas «C» sin capas «A» y «B». Esas capas son muy compactas y duras. Las más duras, a menudo las menos alteradas, corresponden a tobas fácilmente identificables. En estos materiales, la presencia de concreciones de carbonato de calcio es generalizada.

En regiones semihúmedas (régimen de humedad usti-údico), los suelos presentan una sucesión de capas bien diferenciadas y comprenden:

- una capa humífera negra arcillosa, muy maciza y compacta;
- una capa «B» igualmente arcillosa y muy maciza en donde se encuentran concreciones de carbonato de calcio cuya parte basal forma una red hexagonal en superficie cuando las capas «A» y «B» han sido erosionadas;
- una sucesión de capas C sumamente duras.

En las regiones altas y más húmedas (régimen de humedad údico) los suelos son muy similares. Se diferencian de los anteriores por la inexistencia de concreciones de caliza y por una alteración mayor de las capas «C» que siguen siendo macizas pero menos duras. Generalmente es difícil distinguir los diferentes depósitos.

Al igual que en el caso de los suelos desarrollados sobre piroclastitas recientes, el pH y la tasa de saturación de los desarrollados sobre piroclastitas antiguas disminuyen con la altura.

LA CANGAHUA: UNA DEFINICIÓN DIFERENTE SEGÚN LOS AUTORES

La cangahua, capa endurecida y «estéril», está entonces localizada en las piroclastitas antiguas. Corresponde generalmente a las capas «C» que pueden provenir de tobas o de depósitos de piroclastitas no cementadas pero endurecidas debido a la sequía. Es así como Vera y López (1992) distinguen la cangahua proveniente de flujos piroclásticos de aquella originada por caídas piroclásticas. En condiciones climáticas iguales, la segunda es siempre menos dura que la que proviene de las tobas. Esos autores extrapolan por cierto el término de cangahua a todo material volcánico endurecido (por estar en regiones secas) e incluyen dentro de esa denominación a las coladas de lodo así como a materiales coluvionados.

En sus descripciones de perfil, Colmet-Daage llama cangahua a toda capa dura encontrada en el perfil. Aunque esas capas corresponden siempre a las piroclastitas antiguas, rara vez se especifica si se trata de capas «C» o de capas «B».

Los campesinos ecuatorianos no vacilan en llamar cangahua a la capa humífera de los suelos enterrados, siendo ella más maciza y dura que el suelo superior. La denominan cangahua negra o «chocoto».

Finalmente, en las leyendas de los mapas geológicos, los geólogos de la DGGM (Dirección General de Geología y Minas) agrupan todas las formaciones piroclásticas antiguas bajo la denominación de «formación cangahua». Custode *et al.* (1992) se acercan a este punto de vista y proponen definir a la cangahua como «un suelo antiguo y endurecido».

LAS UNIDADES CARTOGRÁFICAS

Todos los suelos situados por debajo del páramo son entonces suelos compuestos. En la leyenda de los mapas de suelos a escala 1:50.000, los llamados cangahua (suelos «C») tienen una capa endurecida a menos de 70 cm de profundidad. Están localizados en las partes inferiores de las vertientes interandinas. En altura, los suelos recientes son más espesos. Los suelos enterrados están lo suficientemente alterados como para que la agricultura no se vea entorpecida por una capa dura, de modo que fueron agrupados en otras categorías (suelos «M» y «H» de los mapas a escala 1:50.000).

Los suelos «C» de los mapas a escala 1:50.000 fueron divididos en subunidades en función de sus características intrínsecas, de sus regímenes de temperatura y de humedad así como de la profundidad a la que aparece la cangahua. En los mapas de síntesis, en particular en el presentado en este artículo (figura 1), los suelos se agruparon en 5 categorías (C1, C2, C3, C4 y C). La correspondencia entre las siglas de los mapas de síntesis y las de los mapas a escala 1:50.000 se presenta en el cuadro 2.

Características de las unidades

Recordaremos, para cada una de ellas, las principales características, resumidas igualmente en el cuadro 3.

Profundidad a la que aparece la cangahua	Régimen de humedad del suelo			
	usti-arídico	ústico	usti-údico	údico

Siglas de los mapas a escala 1:50.000

	régimen de temperatura: isotérmico			isomésico	isotérmico
70 cm	Cq	Cd	Cm	Cv, Cw	Cf
40 cm	Cu	Cc	Cn	Ci, Cj, Cr	Ck
20 cm	Cy	Cb	Cp	Cs	Ct
10 cm		Ca			
aflorante	C				

Siglas de los mapas de síntesis

cangahua en profundidad	C4	C3	C2	C1
cangahua aflorante	C			

Cuadro 2 - Correspondencia entre las siglas de los mapas a escala 1:50.000 y las unidades de los mapas de síntesis

Unidad C4

Corresponde a los suelos de las regiones semi-áridas con un régimen de humedad usti-arídico. Las piroclastitas antiguas están poco alteradas y no presentan capa humífera negra. Los carbonatos de calcio están presentes en todo el perfil.

El horizonte superior, desarrollado a partir de las cenizas recientes, es de color pardo claro, arenoso fino. La transición al paleosuelo es sumamente brusca. Este último es muy compacto, duro; sus contenidos en arcilla son inferiores al 10 %, y los de limo pueden alcanzar el 40 %.

Las tasas de materia orgánica son bajas (0,5 a 2 %), los contenidos de bases intercambiables elevados (13,5 a 30 me/100 g) y el complejo de intercambio está siempre saturado.

El pH es superior a 7 en todo el perfil. Los carbonatos de calcio están presentes bajo la forma de micelio desde la superficie.

Unidad C3

Agrupa los suelos de las regiones secas con régimen de humedad ústico. Las piroclastitas antiguas están siempre poco alteradas.

Los suelos son poco diferentes a los anteriores, pero los carbonatos de calcio están a menudo ausentes en las capas superficiales y el pH presenta valores un tanto más bajos. Es neutro a poco ácido en superficie, aumenta en profundidad, con la formación de concreciones o costras de calcáreo.

Unidad C2

Corresponde a suelos localizados en regiones semihúmedas cuyo régimen hídrico es usti-údico.

El suelo reciente es pardo oscuro a negro, limo-arenoso, ligeramente más arcilloso y negro en profundidad. La transición hacia el paleosuelo es bastante clara de manera que es posible distinguir el origen de los materiales.

El paleosuelo está compuesto de una capa humífera negra arcillosa a la que sigue una «B» maciza, amarillenta, franco-arcillosa a arcillosa (al menos 20 % de arcilla y 40 a

60 % de limos) con concreciones calcáreas. La sucesión de capas «C» que comportan concreciones calcáreas, es perfectamente reconocible. Las tasas de materia orgánica son más elevadas que en los suelos anteriores (1,5 a 6,9 %). Los contenidos de bases intercambiables siguen siendo elevados (13,5 a 29 me/100 g) en relación a la textura fina. La tasa de saturación está comprendida entre 62 y 96 en la superficie, ligeramente inferior a 100 en el paleosuelo. El pH, ligeramente ácido en la superficie, es cercano a la neutralidad en el paleosuelo.

Régimen de humedad	usti-arídico	ústico	usti-údico	údico

Características morfológicas

Suelos de superficie	Color	pardo	pardo oscuro a negro	
	Textura en superficie	arenoso fino	limo-arenoso	
	Capa argílica	ausente	presente	
			negro revestimientos	muy negro numerosos revestimientos
Suelos enterrados	Materiales originales	*poco alterados*	*muy alterados* perfiles diferenciados (A-B) « A » negro	« A » muy negro
	Textura	limo-arenoso (A < 10 %, L = 25-40 %)	limoso fino (A = 20 %, L = 45-60 %)	
$CaCO_3$		micelio desde la superficie	concreciones posibles en profundidad	ausente

Características analíticas de los suelos de superficie

M.O. (%)	prom. 1,48 med. 1,55 (0,5-2,2)	prom. 1,36 med. 1,22 (068-2,36)	prom. 3,7 med. 4 (1,5-6,9)	prom. 5,3 med. 4,9 (3,2-8,7)
pH	8-9 en todo perfil	6,5 - 7 en superficie cercano a 7 en profundidad		5,5-6 en superficie 6,5 en profundidad
B.I. (me/100 g) en « B »	prom. 19,3 med. 17 (13,4-30)	prom. 9 med. 9 (5-13,1)	prom. 18,5 med. 18 (13,5-29)	prom. 12,5 med. 12 (7,5-18)
Tasas de saturación	saturado		prom. 82 med. 87 (62-69)	prom. 65 med 62 (52-77)
P_2O_5 (Truog)	prom. 12,2 med. 10,8 (4,2-29)			

Clasificación	Durandept	Durandept	Durustoll	Duriudoll
Siglas	C4	C3	C2	C1

Cuadro 3 - Características de los suelos

Unidad C1

Localizada en las regiones húmedas, el régimen hídrico de sus suelos es claramente údico.

El suelo reciente es aún más negro, sobre todo en profundidad (2,5Y2/0) en donde los revestimientos arcillosos son abundantes, de manera que la transición al paleosuelo es gradual y es a veces difícil reconocer lo que proviene de materiales recientes y lo originado en materiales antiguos, a no ser por una diferencia de granulometría y de consistencia.

El paleosuelo, bastante similar al anterior en la sucesión de las capas, se caracteriza por una alteración mayor que se traduce en un mayor espesor de la capa «B» y en la inexistencia de concreciones calcáreas.

Las tasas de materia orgánica son aún más elevadas. Los contenidos en bases intercambiables son menores (7,5 a 18 me/100 g) así como la tasa de saturación del complejo absorbente (52 a 77 % en el suelo superior, cercano al 80 % en el paleosuelo). El pH, ácido (5,5-6) en la superficie, lo sigue siendo ligeramente (6,5) en profundidad, inclusive en el paleosuelo.

Unidad C

Comprende el conjunto de zonas en las que afloran las capas endurecidas de cangahua después de la erosión de las capas superiores.

La mayor parte de esas unidades están localizadas en las regiones secas donde la erosión es fuerte y los suelos poco espesos, es decir en las zonas donde se encuentran las unidades C2, C3 y C4.

Los documentos cartográficos a escala 1:50.000 no distinguen los materiales en función de su dureza. Basta con recordar que los más duros, por lo tanto los más difíciles de rehabilitar, están localizados en las regiones más secas (unidades C3 y C4), mientras que los menos duros se sitúan en zonas un tanto más húmedas (unidades C2).

Extensión de las unidades

Se calculó la superficie total de cada unidad en cada una de las cinco grandes cuencas naturales del callejón interandino volcánico:

- la cuenca de Ibarra agrupa las regiones andinas de las provincias de Carchi y de Imbabura;
- la cuenca de Quito corresponde a la parte andina de la provincia de Pichincha;
- la cuenca de Latacunga abarca las partes andinas de las provincias de Tungurahua y Cotopaxi;
- la cuenca de Riobamba, la parte andina norte de la provincia de Chimborazo;
- la cuenca de Alausí, la parte andina sur de la provincia de Chimborazo.

En cada una de esas cuencas se calcularon (cuadro 4):

- la superficie de las ciudades;
- la superficie de cada una de las unidades de suelos de cangahua (C, C1, C2, C3, C4);
- la superficie total de los suelos con cangahua a menos de 70 cm (Cg = C+C1+C2+C3+C4);
- la superficie de los suelos en los que la cangahua aparece a menos de 20 cm (C*).
- la superficie de suelos no cultivados (NA) que no corresponden a las ciudades: dunas, pendientes muy fuertes, erosionadas en regiones secas;
- la superficie de suelos cultivados que no presentan capa endurecida (cangahua) a menos de 70 cm de profundidad (SA);
- la superficie de suelos actualmente cultivados (Sc);
- la superficie total de la cuenca interandina volcánica situada por debajo del páramo (St).

La superficie total de los suelos de cangahua (Cg) es de 239.650 ha, es decir el 21,35 % de la superficie de la cuenca interandina volcánica situada por debajo del páramo. De esa superficie, 36.858 ha, es decir el 15,4 %, están totalmente erosionadas. Agregando los suelos en los que la cangahua aparece a menos de 20 cm de profundidad, son 79.290 ha las que deberían ser subsoleadas con el fin de reincorporarlas a la agricultura eficaz.

Región	C/Cg	C*/Cg	C*/Sc	Cg/St	Cg/SA
Ibarra	18,12	28,80	9,00	17,94	40,19
Quito	17,09	29,84	9,19	23,45	39,26
Latacunga	16,12	34,70	9,91	22,22	35,11
Riobamba	8,63	37,81	9,73	20,63	30,66
Alausí	6,33	52,28	20,60	28,41	48,52
País	15,38	33,09	9,86	21,56	37,24

Superficies

Región	ciudades	C	C1	C2	C3	C4	Cg	C*	NA	SA	Sc	St
Ibarra	1.340	10.420	11.156	22.027	5.687	8.223	57.513	16.562	118.640	143.100	184.050	320.590
Quito	5.150	12.737	23.841	26.213	11.074	652	74.517	22.237	48.367	189.800	242.080	317.830
Latacunga	1.400	10.100	5.640	9.758	17.381	19.790	62.669	21.745	39.440	178.500	219.420	282.010
Riobamba	939	2.835	1.711	9.769	11.249	7.299	32.863	12.424	18.307	107.200	127.640	159.310
Alausí	32	766	0	5.770	5.556	0	12.092	6.322	5.515.	24.920	30.690	42.559
País	8.861	36.858	42.348	73.537	50.947	35.964	239.650	79.290	230.207	643.520	803.880	1.111.600

Cuadro 4 - Superficies de las diferentes unidades (en ha)

CONCLUSIÓN

Los suelos del callejón interandino volcánico son entonces suelos compuestos —un suelo reciente que reposa sobre una sucesión de paleosuelos— e incluso complejos en altura. Se reparten según un esquema tradicional bajo la forma de una topo-climo-secuencia de la parte inferior hacia la parte superior de las vertientes interandinas.

Los paleosuelos en los que están localizadas las capas endurecidas provienen de una sucesión de depósitos piroclásticos que pueden ser tobas o caídas aéreas. Estas últimas se alteran más rápidamente que las tobas y, en condiciones climáticas iguales, son menos duras que las tobas. Los materiales originales de los suelos de cangahua son entonces muy similares a los de los suelos de tepetate de México. Los paleosuelos son siempre macizos y compactos en las zonas secas, con acumulación de carbonatos de calcio, un tanto más friables en altura.

Aunque el término «cangahua» sea empleado sobre todo para las capas «C» de los suelos localizados en la parte inferior de la secuencia, ciertos autores no han vacilado en englobar bajo ese término partes de las capas «B», e incluso las «A», del paleosuelo debido a la repentina transición del suelo superior, siempre muy friable, al suelo enterrado mucho más compacto. En las zonas erosionadas, son sin embargo las capas «C» o «B-C» las que afloran después de la erosión de las capas superiores y son denominadas cangahua. Salvo en el caso de algunas tobas particularmente duras por estar localizadas en las regiones más secas, la dureza de estos materiales parece ser menor que la de los tepetates en México. En efecto, se midió un tiempo de 20 horas para subsolear una hectárea de tepetate, mientras que con un bulldozer idéntico, hacen falta entre 8 y 10 horas en el Ecuador.

El cultivo de las zonas marginales implica un subsoleo no solamente de los suelos erosionados sino igualmente de aquellos en los que la cangahua está presente a menos de

20 cm de profundidad. Esto representa un total de cerca de 80.000 ha, es decir un décimo de las tierras cultivadas actualmente en el callejón interandino volcánico. Esta proporción aumenta considerablemente en ciertas regiones más pobladas y erosionadas.

Referencias bibliográficas

CADIER, E.; POURRUT, P.; WINCKELL, A.; ZEBROWSKI, C., 1978: *Carta de isohietas medias anuales e histogramas mensuales*, ORSTOM-PRONAREG, Quito, Ecuador.

CADIER, E.; HUTTEL, C.; POURRUT, P., 1978: *Carta de número de meses secos*, ORSTOM-PRONAREG, Quito, Ecuador.

COLMET-DAAGE, F. *et al.*, 1974-1984: *Cartas de suelos de la Sierra ecuatoriana a 1:50.000*, ORSTOM-PRONAREG, Quito, Ecuador.

COLMET-DAAGE, F.; ZEBROWSKI, C., 1980-1984: *Cartas de suelos de la Sierra ecuatoriana a 1:200.000*, ORSTOM-PRONAREG, Quito, Ecuador.

CUSTODE, E.; DE NONI, G.; TRUJILLO, G.; VIENNOT, M. 1992: La cangahua en el Ecuador: caracterización morfo-edafológica y comportamiento frente a la erosión, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 332-346.

VERA, R.; LÓPEZ, R. 1992: Tipología de la cangahua, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 113-119.

WINCKELL, A.; ZEBROWSKI, C. 1992: La cangahua en Équateur : le contexte paléogéographique de sa formation, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 107-112.

Évaluation spatiale et multi-temporelle de la *cangahua* à partir d'images SPOT

Georges De Noni, Marc Viennot

Abstract

The cangahua, *important component of the Ecuadorian highlands landscape presents a very weak fertility. This is the result of old-fashioned and inadequate management by the indigenous populations, whose food needs exceed agricultural supplies.*

It was interesting to evaluate a dynamic process such as the extension of the cangahua *with remote sensing from images SPOT as the* cangahua *mineral material presented a typic spectral response in the 3 main bands.*

Two experiences are presented:

- *The first dealt with a spatialization of the* cangahua *on two 10-year periods (1986-1995), on the slopes of the volcano* Ilalo, *close to Quito, in a well-known and small region (15 sq km).*
- *The second compared a conventional field mapping to a satellite mapping of the whole new volcanic highlands (5 scenes of 60 sq km).*

The method leant on the definition of themes, the identification of these on well-known areas (training samples), the definition of spectral characteristics of the training samples and the extrapolation to the whole region (classification) in order to minimize geometrical distortions, angular incidence and atmospheric conditions.

The first study emphasized the increase of cangahua *areas in relation with the settlement, the travelling of men and cattle; the theme of discontinuous* cangahua *with a broad spectral signature explained a process still dynamic nowadays. The comparison of the 2 mappings showed a convergence for the typic* cangahua *but the results differed for the discontinuous one.*

Remote-sensing is an efficient tool for mapping cangahua. *However it requires a good knowledge of the field and improvement and automation of the various distorsions.*

Keywords: *Hardened Volcanic Soils* - Cangahua - *Erosion* - *Remote-Sensing* - *SPOT* -

INTRODUCTION

Cet article, réalisé sur la base des résultats des travaux de Servenay (1995) et de Faure (1996), relate un essai d'évaluation spatiale et multi-temporelle de la *cangahua* à partir d'images Spot. L'acquisition de ces images a été possible grâce à l'appui financier

du programme de l'Union Européenne n° TS3, CT93-0252 portant sur « La régénération et la conservation des sols volcaniques indurés et stériles d'Amérique latine : Chili, Équateur, Mexique » et au soutien du CNES, à travers son programme de subvention « Incitation à l'utilisation scientifique des images Spot » (ISIS).

Le recours à la télédétection a été choisi pour les raisons suivantes :

- la *cangahua* est une composante des paysages des Andes équatoriennes dont la signature spectrale se prête bien à une approche satellitaire. Du fait de ses caractéristiques propres (couleur claire, absence de végétation), la *cangahua*, en particulier lorsqu'elle affleure et se présente sous la forme d'une surface lisse et homogène englobant plusieurs pixels, réfléchit un rayonnement électromagnétique comparable à celui d'une surface minérale. Ce type de surface est particulièrement bien adapté à la technologie du satellite SPOT dont deux des canaux, XS1 et XS2, permettent d'apprécier dans le spectre visible les éléments minéraux ;
- l'existence de données de terrain qui ont servi de référence pour vérifier la pertinence des traitements et des interprétations réalisées sur les images SPOT. Ces données se présentent sous la forme de cartes thématiques (notamment pour les sols et leur usage actuel) à différentes échelles et de relevés de terrain localisés au GPS (*Global Positionning System*).

Afin d'atteindre l'objectif fixé, 2 types d'échelles ont été pris en compte pour interpréter les images SPOT et appliquer les traitements de télédétection :

- d'une part, une échelle locale, de l'ordre du 1/50 000, correspondant au versant oriental du volcan Ilaló dans le bassin de Quito. C'est dans cette région qu'ont été effectués les premiers essais d'évaluation spatiale de la *cangahua* car cette formation occupe ici de grandes surfaces et présente des caractéristiques morphologiques bien marquées par rapport aux autres thèmes. En outre, l'existence de deux images SPOT couvrant cette même zone, à 10 ans d'intervalle, a permis de procéder à une approche multi-temporelle de la *cangahua* sur des zones-tests ;
- d'autre part, une échelle régionale, de l'ordre du 1/500 000, englobant les parties centrales et septentrionales du bassin interandin concernées par la *cangahua*, depuis l'extrémité nord du bassin d'Ibarra jusqu'au sud de Riobamba. Cet essai de spatialisation de la *cangahua* au niveau du bassin interandin a été entrepris une fois réalisés et calés les premiers essais de détection du matériau sur la région orientale du volcan Ilaló.

CANGAHUA ET TÉLÉDÉTECTION

Le fait que la *cangahua* présente une bonne signature spectrale n'est pas une raison suffisante pour justifier le choix de ce thème pour des traitements de télédétection, d'autant plus qu'il s'agit d'un objet d'étude, *a priori* très lié à une problématique locale équatorienne. En effet, la *cangahua* désigne dans les parties centrale et septentrionale de la montagne andine de l'Équateur une formation indurée inculte en l'état pour l'agriculture. Ce matériau présente en effet de fortes contraintes physiques auxquelles s'ajoute une carence importante en matière organique et en phosphore (Custode *et al.*, 1992).

Pourquoi s'intéresser à la *cangahua*, compte tenu de son acception très locale et de ses très faibles potentialités pour l'agriculture ? Plusieurs réponses peuvent être apportées à ce questionnement :

- au-delà de la terminologie locale, il ressort, sur la base d'autres recherches menées en Amérique latine, que la présence d'horizons indurés dans les sols volcaniques n'est pas un phénomène isolé et typique de l'Équateur. En effet, ce matériau occupe, outre

l'Équateur, une grande extension à l'échelle du continent, notamment au Mexique (*tepetate*), au Nicaragua (*talpetate*) et plus localement en Colombie et au Chili (Prat, 1991 ; Zebrowski, 1992) ;

- dans les régions concernées, les horizons indurés, *cangahua* ou autres, n'affleurent qu'après le décapage par l'érosion hydrique des horizons plus meubles qui les coiffent. Dans un milieu où l'emprise forte des Andes, cumulée à une augmentation de la pression démographique sur les sols, est à l'origine d'une érosion chronique et sans cesse plus grave, la connaissance et le suivi de la *cangahua* constituent des indicateurs de première importance pour évaluer la dynamique des processus (De Noni *et al.*, 1986) ;
- des essais agronomiques ont montré qu'après ameublissement et avec une régénération adaptée, la *cangahua* retrouve les propriétés d'un sol et fournit une productivité acceptable. Dans d'autres cas, des essais de reboisement, notamment en eucalyptus, se sont révélés également satisfaisants. Les régions qui ne bénéficient pas d'actions de ce type périclitent et se vident progressivement de leurs habitants. L'étude de la *cangahua* intéresse donc aussi les planificateurs agricoles qui doivent décider d'actions de réhabilitation des sols et de conservation des pentes (De Noni *et al.*, 1992 ; Quantin, 1992).

Parmi les éléments de connaissance à acquérir en premier lieu, se pose, pour les planificateurs agricoles, la question de la dimension spatiale et multi-temporelle de la *cangahua*.

Une réponse partielle est fournie à cette question par les travaux de l'ORSTOM, menés en coopération avec le Ministère équatorien de l'Agriculture, qui ont conduit à la réalisation, entre 1974 et 1984, d'une série de cartes pédologiques qui couvrent tout le pays. La montagne andine a donc été entièrement cartographiée, aux échelles de 1/50 000 et 1/200 000. Une carte de synthèse sur la *cangahua* a été réalisée, sur la base d'informations datant de 1984 (Zebrowski, 1997).

Néanmoins, une cartographie de ce type n'est pas suffisante pour répondre aux questions posées ci-avant, notamment en ce qui concerne la dynamique multi-temporelle de la *cangahua*. Rappelons que ce matériau constitue une sorte d'indicateur naturel d'évolution de l'érosion des sols et qu'il change donc de limites spatiales au cours du temps. Autrement dit, une cartographie élaborée en 1984 ne peut pas renseigner correctement sur l'état du matériau en 1995 ce qui pose la nécessité du recours à une autre approche. En ce sens, la télédétection présente un avantage indéniable dans la mesure où elle peut permettre d'augmenter la fréquence de saisie spatiale du matériau et d'effectuer ainsi un suivi multi-temporel des phénomènes, opérations difficilement concevables par les méthodes conventionnelles de cartographie.

Les traitements de télédétection

Quelques rappels de base sur la télédétection et le satellite SPOT

La télédétection se définit comme « l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci » (J.O. du 12 décembre 1980 et Commission Ministérielle de la Terminologie de la Télédétection Aéro-spatiale, COMITAS, 1980). Ces objets peuvent être déterminés sans contact matériel parce qu'ils produisent des ondes électromagnétiques dues soit au réfléchissement de l'énergie solaire dans le spectre « visible » et « proche infra-rouge » (bande spectrale de 0,4 à 2 µ) soit à l'émission du rayonnement terrestre dans l'infra-rouge (bande spectrale de 2 à 14 µ).

Pour enregistrer ces ondes, il existe différents types de capteurs. Dans notre cas, on a utilisé les données fournies par le satellite français SPOT, équipé de détecteurs ou radiomètres qui enregistrent en continu, au cours du déplacement orbital, les valeurs réfléchies par la surface terrestre. Ces valeurs sont codées sur 8 octets ce qui permet de disposer de 256 valeurs radiométriques (0-255). SPOT travaille en mode multispectral dans le spectre « visible » et « proche infra-rouge ». Il prend en compte 3 longueurs d'ondes principales et génère donc 3 canaux : XS1, XS2 et XS3 (CNES, 1992) :

Longueur d'ondes (en µm)	Ondes électro-mag. réfléchies	Canaux de SPOT
0,50-0,59	Vert	XS1
0,61-0,68	Rouge	XS2
0,79-0,89	Proche Infra-rouge	XS3

Chaque canal est composé de lignes et de colonnes où le point élémentaire de la mesure au sol (pixel) est de 20 x 20 m. La largeur au sol des enregistrements de SPOT est fonction de l'angle d'incidence des prises de vue : pour les images utilisées dans cette recherche, la largeur au sol est comprise entre 60 et 80 km.

Pour pouvoir couvrir la partie du bassin interandin, où se trouve la *cangahua*, on a utilisé 5 images SPOT. Une 6^{e} image a été acquise afin de réaliser l'étude multi-temporelle de la zone de l'Ilaló. Les caractéristiques de ces images sont les suivantes :

Zones couvertes	Références K-J	Date de prise de vue	latit. / long. (centre de l'image)	Angle d'incidence en °
Ibarra-Otavalo	640-349	8/02/95	N0°30'04" W78°10'06"	6,3
Quito-Cayambe	640-350	26/11/86	S0°00'01" W78°10'06"	6,3
Quito-Cayambe	640-350	8/02/95	N0°00'00" W78°16'58"	6,3
Machachi-Cotopaxi	640-351	8/02/95	S0°30'03" W78°23'34"	6,3
Latacunga-Ambato	640-352	25/07/95	S01°00'07" W78°30'28"	28,9
Chimborazo-Riobamba	640-353	25/07/95	S01°30'11" W78°37'16"	28,9

Les premiers essais d'interprétation de la *cangahua* ont porté sur la zone de l'Ilaló qui se trouve sur les images référencées Quito-Cayambe, captées par SPOT respectivement le 29/11/1986 et le 08/02/1995 (Servenay, 1995). Les 5 images prises en 1995 couvrent les parties nord et centre du bassin interandin et ont servi à l'interprétation régionale (Faure, 1996).

Les traitements réalisés

Pour caractériser l'extension spatiale et l'évolution temporelle de la *cangahua*, on a eu recours aux techniques conventionnelles de la télédétection. Celles-ci reposent sur

la mise en œuvre de traitements spécifiques des images : compositions colorées, extractions et parcelles d'entraînement qui conduisent à des « classifications ». Les méthodes de classification sont des opérations portant sur les valeurs spectrales et visent à faire correspondre à une thématique donnée des groupements de valeurs radiométriques. La qualité de cette démarche dépend, bien entendu, de la pertinence à formuler une hypothèse statistique qui dépend, à son tour, d'une connaissance minimale des réalités du terrain.

En fonction des connaissances acquises sur la région du volcan Ilaló, cas traité en premier, et des échelles d'approche différentes, les deux exemples présentent, au niveau des traitements de télédétection, une partie commune et une partie qui les différencie.

Ce qui est commun aux deux approches

Dans les deux cas, quelle que soit l'extension de la zone d'étude et le niveau d'échelle pris en compte, le processus de traitement de l'image s'applique aux 3 canaux de SPOT et passe par les 3 étapes suivantes : composition colorée, extractions et calcul de néo-canaux.

La composition colorée, qui est un néo-canal, est une représentation en fausses couleurs de la zone d'étude où sont superposés les 3 canaux (Lunden *et al.*, 1990). Initialement, la visualisation de chaque canal repose sur l'attribution d'un niveau de gris à une valeur radiométrique. Dans la table de codage associée à l'image, il existe donc 256 niveaux de gris différents. Pour pouvoir apprécier l'apport de chaque canal lorsqu'on les superpose, on leurs affecte des couleurs primaires : bleu pour XS1, vert pour XS2 et rouge pour XS3. En réalisant une composition colorée, on additionne ces couleurs deux à deux et on obtient une visualisation de la zone d'étude en fausses couleurs qui reproduisent l'ensemble du spectre visible. En règle générale, la végétation apparaît en rouge ce qui correspond à la bande spectrale du proche infra-rouge captée par XS3. Les éléments minéraux ou sans végétation sont, quant à eux, captés par XS1 et XS2 et ressortent en bleu (Dubucq, 1989).

Sur l'image, les zones de *cangahua* sont donc à rechercher parmi les unités bleutées ou à dominante de bleu, tout en sachant que ces mêmes teintes représentent aussi d'autres objets sans végétation, radiométriquement proches de la signature spectrale de la *cangahua* : villes, autres sols nus, affleurements rocheux, bordures de nuages...

Compte tenu de la taille énorme du fichier informatique correspondant à une image SPOT (de 30 à 35 méga-octets), on procède, afin de ne pas saturer l'espace mémoire de la machine et de ne pas employer un temps infini dans l'exécution des différents traitements, à des extractions sous forme d'imagettes. Celles-ci sont de taille moyenne (de l'ordre de 500 colonnes par 700 à 800 lignes) et délimitées sur des zones de l'image où la visualisation de la thématique, en liaison avec les connaissances de terrain, est bonne. Par exemple, les relevés GPS, effectués sur le pourtour du volcan Ilaló, ont servi de référence pour le tracé des extractions. Dans un premier temps, chaque extraction est traitée en composition colorée et soumise à une interprétation visuelle. Dans les deux cas, il a été ainsi possible d'ébaucher une première détermination des thèmes majeurs où on a distingué :

- *cangahua* affleurante,
- *cangahua* discontinue,
- végétation et boisement d'eucalyptus,
- cultures,
- eau (lacs et cours d'eau),
- pixels non classés.

Puis, pour optimiser la recherche de critères pertinents de spatialisation, ces extractions ont fait l'objet de la création de néo-canaux. Pour cela, on a utilisé, parmi les méthodes conventionnellement employées en télédétection, les calculs suivants :

- analyse en composante principale,
- indice de végétation,
- indice de brillance.

Au terme de cette étape, on dispose donc, à l'échelle d'une extraction, de 3 canaux bruts (XS1, XS2 et XS3) et de 3 néo-canaux correspondant à chaque type de calcul. Puis, on saisit sur chaque extraction des parcelles d'entraînement (Chaume et Combeau, 1983). La méthode consiste à tracer, pour tous les thèmes définis visuellement, des polygones pixel à pixel. Ceux-ci sont caractérisés par des fichiers statistiques où sont notés les moyennes et les écarts-types se rapportant aux valeurs radiométriques ou numériques des pixels pris en compte.

La représentation graphique adoptée pour pouvoir visualiser ces statistiques est celle des « serpents radiométriques » : les lignes brisées représentent la fluctuation des valeurs radiométriques ou numériques, pour une statistique donnée, des thèmes selon le canal choisi.

Dans le cas de l'Ilaló (figure 1), les statistiques choisies sont dérivées du calcul de la moyenne plus ou moins l'écart-type. Sur les graphes correspondants, on n'a représenté que les valeurs de XS1, XS2, XS3 et des 2 néo-canaux se référant aux indices de végétation et de brillance car les écarts-types de l'analyse en composante principale se sont révélés trop élevés et inutilisables. À la lecture de ces graphes, on constate que ce sont les 2 néo-canaux qui permettent de différencier au mieux les thèmes choisis (Servenay, 1995).

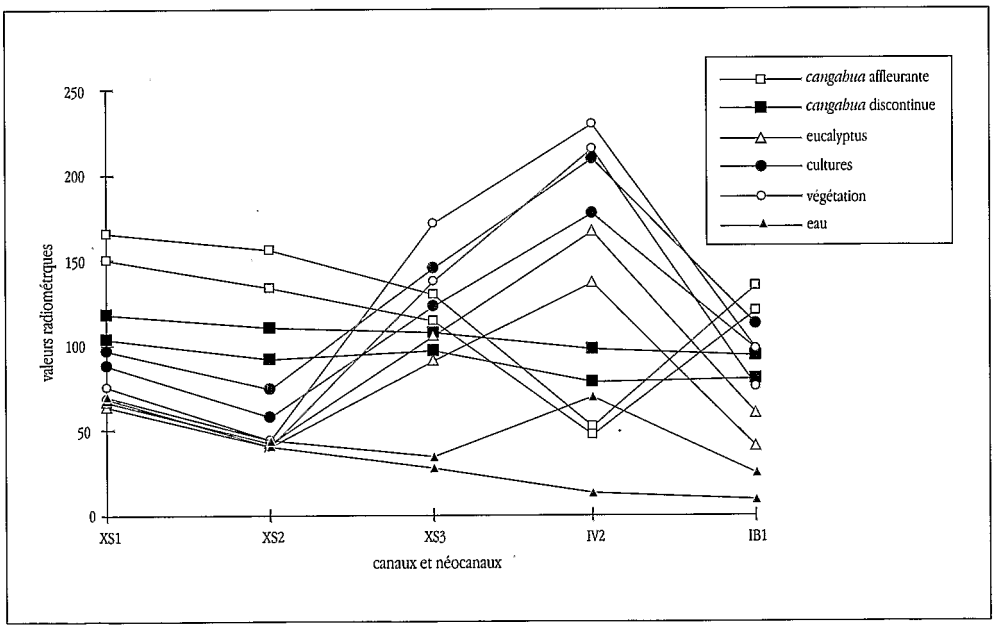


Figure 1 - Serpents radiométriques correspondant aux thèmes d'une extraction centrée sur le volcan Ilaló, images SPOT Quito-Cayambe de 1995 (d'après Servenay, 1995)

Dans l'autre cas, les serpents radiométriques (figure 2) se rapportent aux extractions réparties sur les 3 images SPOT couvrant la partie centre et nord du bassin interandin, soit plus de 120 parcelles d'entraînement. Les statistiques choisies sont : en ordonnées, les valeurs moyennes et par une barre verticale, les écarts-types. À la lecture du graphe, on note que la séparation des thèmes de *cangahua* est réalisée dans XS1, XS2, l'acp1 et l'indice de brillance et que celle-ci est optimale dans l'acp1. Par contre, les thèmes de végétation ne se discriminent avec aucun canal sauf avec le néo-canal IVN où ils ne se confondent pas avec ceux de *cangahua*. Ce sont donc l'acp1 et l'IVN qui ont été finalement retenus (Faure, 1996).

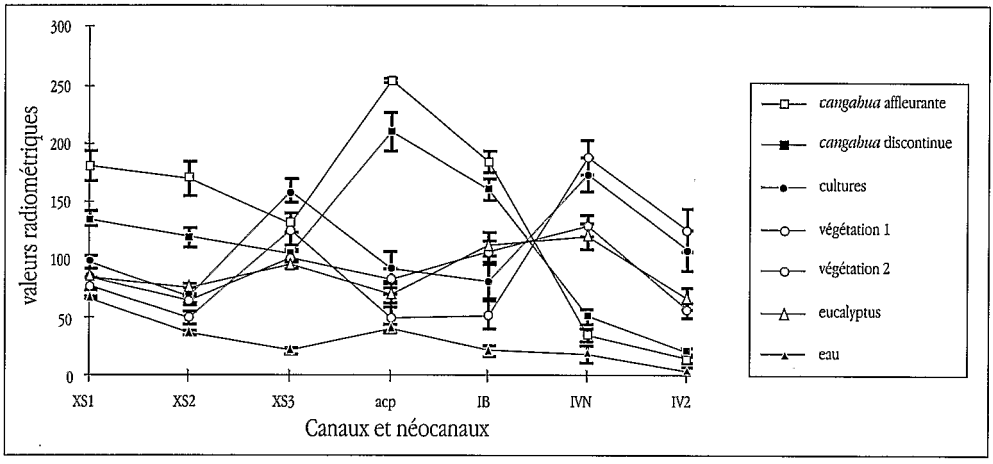


Figura 2 - Serpents radiométriques résultant de l'interprétation de 6 extractions saisies sur la mosaïque de 3 images SPOT de 1995 qui couvrent la partie nord du bassin interandin (d'après Faure, 1996)

Ce qui différencie les deux approches

Il ressort, en comparant les résultats issus des serpents radiométriques de ces 2 cas, que l'indice de végétation est le néo-canal sur lequel la végétation et les thèmes de *cangahua* sont le mieux décorrélés. En revanche, la réponse du thème *cangahua* aux traitements statistiques est sensiblement différente. L'une des principales raisons est la taille de la zone prise en compte. Dans le cas de l'Ilaló, la zone d'étude est limitée à l'aire du massif volcanique où le thème minéral majeur est la *cangahua*. Dans l'autre cas, la zone d'étude se situe à l'échelle régionale et englobe d'autres thèmes qui réfléchissent comme des thèmes minéraux et entrent, par conséquent, en confusion avec la *cangahua*. Parmi ceux-ci, le thème urbain est l'un des principaux éléments perturbants. Compte tenu des caractéristiques spatiales et thématiques des 2 zones, la valorisation des résultats est confrontée à 2 types d'options méthodologiques :

- dans le cas du volcan Ilaló, où la confusion entre les thèmes est minimale, il a été possible, par un algorithme de classification, de discriminer les différents thèmes en un seul traitement. C'est la méthode de classification par les hypercubes qui a été retenue car elle a permis de restituer, de manière satisfaisante, les différents thèmes recherchés dans la zone d'étude (ORSTOM, 1978) ;

- dans l'autre cas, le travail simultané sur 5 images (soit une surface au sol de l'ordre de 300 x 60 km) et la manipulation de fichiers informatiques très volumineux n'ont pas permis l'enchaînement des opérations en un seul traitement. Le principal facteur limitant a résidé dans le confusion du thème *cangahua* avec d'autres thèmes minéraux, en particulier avec l'urbain. Par exemple, à la suite de la première classification sur les 2 néo-canaux retenus, le résultat obtenu, comparé aux cartes topographiques existantes, est très décevant car le contour des villes et des villages ne se distingue pas des zones de *cangahua.*

Pour pallier à ce problème et améliorer les résultats de cette première classification, il a donc été nécessaire d'effectuer une succession de nouvelles classifications (itérations) en utilisant, thème par thème, des masques numériques et spatiaux. Un masque est un traitement de l'image permettant sa segmentation par sélection d'une plage radiométrique ou numérique ou par contourage spatial d'une zone à isoler. Le logiciel Geoimage permet une gestion assistée de 3 types de masques :
(a) des masques spatiaux : contourage visuel d'une ou plusieurs zones ;
(b) des masques numériques : sélection de pixels d'un ou plusieurs thèmes mal classés ;
(c) des masques combinés : sélection de pixels à l'intérieur de masques spatiaux.

Il est ainsi possible de retraiter automatiquement une image mal classée, par saisie et traitement de masques. Les résultats des classifications de chacun des masques sont ensuite incrustés dans l'image classée qui résulte d'un emboîtement des différents masques. Concrètement, après la première classification, la méthode s'est déroulée selon l'enchaînement suivant :

- édition de masques de confusion de type (c) pour retraiter les pixels classés en *cangahua* mais se rapportant à d'autres thèmes minéraux. Par exemple pour le thème urbain, on a procédé successivement à un contourage visuel sur la composition colorée de limites urbaines connues, à l'édition du masque de confusion pour sélectionner les pixels classés en *cangahua* dans la zone contourée et ne retenir que les « pixels urbains », à la classification du masque de confusion et à son incrustation dans l'image ;
- édition de masques de confusion de type (b) pour traiter les pixels non classés à l'étape précédente. C'est ainsi que d'autres thèmes minéraux ont pu être identifiés ainsi que des thèmes de végétation.

RÉSULTATS ET CONCLUSIONS

Les méthodes de télédétection appliquées au thème *cangahua* dans les Andes de l'Équateur, soit en un seul traitement statistique soit par l'amélioration d'une classification sous masques de confusion, montre que cet outil est adapté à une recherche portant sur un matériau comme la *cangahua.* Il a été ainsi possible de répondre à un double objectif :

- spatialisation de la *cangahua* aux échelles locale et régionale,
- évaluation spatiale de la dynamique multi-temporelle de la *cangahua.*

Dans les deux cas étudiés ici, on a pu mettre en évidence l'existence de deux unités : *cangahua* affleurante prédominante et *cangahua* affleurante discontinue. D'autre part, les principaux paysages associés à cet environnement ont pu également être délimités : différentes classes de végétation selon l'activité chlorophyllienne, les boisements d'eucalyptus, les cultures et les zones urbaines.

Sur l'image de l'Illaló, on apprécie, pour un cas précis et de manière relativement détaillée, les affleurements de *cangahua* dont la localisation concorde avec les relevés effectués au GPS. En ce qui concerne l'extension du matériau à l'échelle régionale, elle peut

être appréciée sur la mosaïque des 5 images SPOT où ressort l'importance de l'extension actuelle des affleurements de *cangahua* qui occupent approximativement 20 % des terres du bassin interandin. Globalement, on observe que la *cangahua* affleurante est systématiquement localisée au sein de zones à *cangahua* discontinue plus vastes. En revanche, on note la présence de larges étendues de *cangahua* discontinue sans la présence de *cangahua* affleurante. Le zonage de la *cangahua* correspond à la région géologique où s'est déposée la majeure partie des projections pyroclastiques émises par d'imposants strato-volcans. La *cangahua* est donc bien un matériau d'origine volcanique, situé entre 2 000 et 2 800 m (climat subaride, 600 mm/an), dans des positions topographiques diverses : dans les parois abrupts des nombreux ravins et cañons, sur les interfluves plats du bassin ou en position de transition sur les piémonts de versants et glacis-terrasses. Les images satellite montrent bien également les limites supérieures du matériau grâce à l'excellente réflectance de la végétation de *páramo* et de *matorral* dans le canal XS3. Lorsque le climat devient plus humide, les *cangahuas* disparaissent en altitude vers 3 200-3 400 m.

À l'échelle des parties nord et centre du bassin interandin, les deux thèmes de *cangahua* forment 3 sous-ensembles régionaux :

- le premier est localisé au nord de l'image, dans la région du bassin d'Ibarra,
- le second se situe au centre de l'image, dans la partie nord et orientale du bassin de Quito,
- le troisième prend place entre les grands volcans Cotopaxi et Chimborazo et la région du bassin de Riobamba.

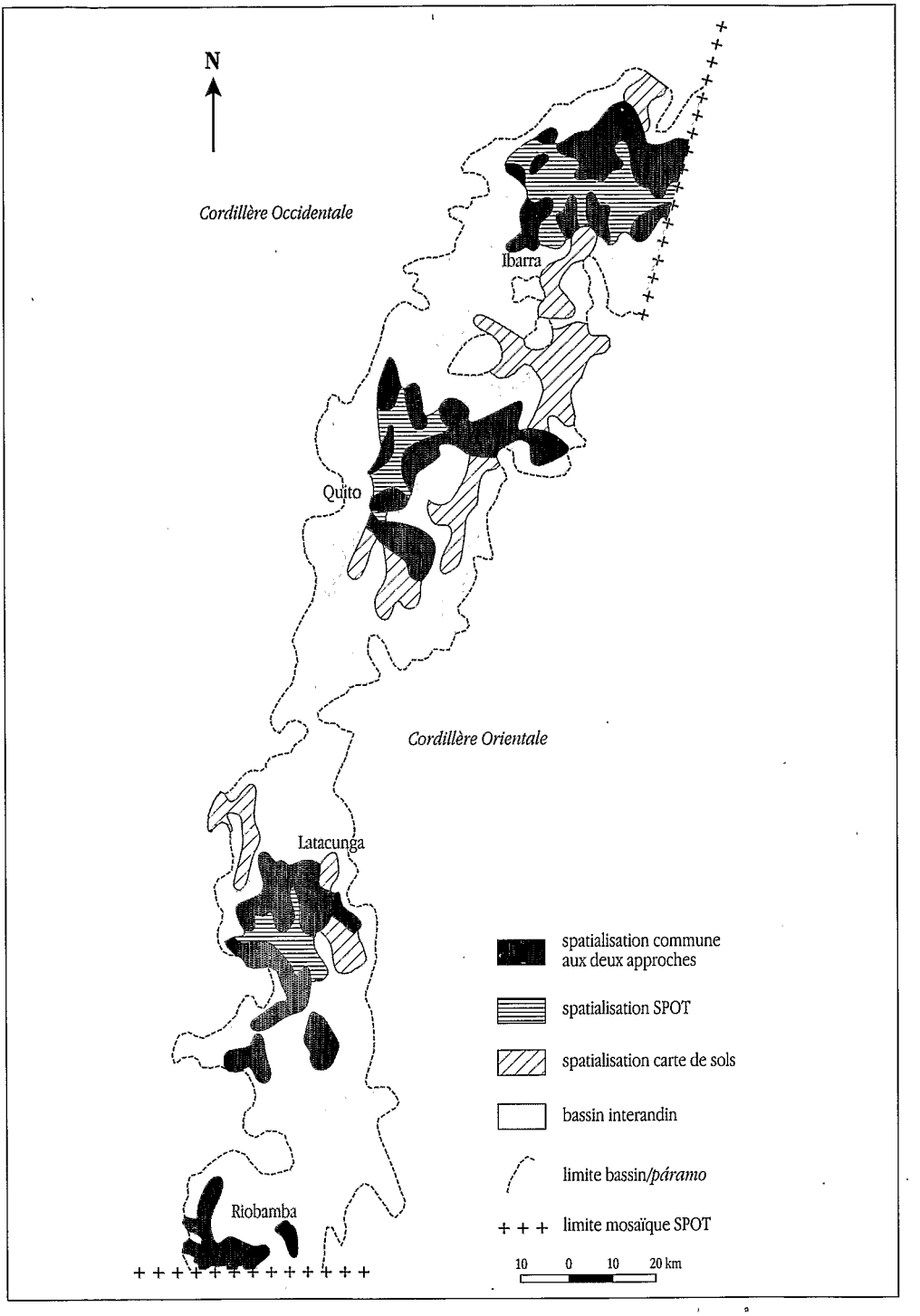
Pour ce qui est de la dynamique multi-temporelle, elle a pu être évaluée dans l'étude de cas sur l'Ilaló en comparant les images prises respectivement en 1986 et 1995. De la superposition des interprétations correspondant à ces 2 dates, il ressort que :

- la partie sud-est de ce volcan montre peu de différence entre les dates. Il s'agit là d'un secteur très dégradé qui révélait déjà en 1986 d'importantes surfaces de *cangahua* ;
- la partie nord-est de l'Ilaló, quant à elle, montre une évolution notable. En 1986, il y avait peu de surfaces de *cangahua* affleurante par rapport aux zones de *cangahua* discontinue. En 1995, les zones de *cangahua* affleurante sont plus nombreuses, en particulier sur les lignes de crête où passent la plupart des chemins, ce qui témoigne d'une activité agricole plus active qu'au sud-est où les terres arables ont beaucoup diminué.

Pour juger de la pertinence des traitements de télédétection, nous avons utilisé le document thématique où est cartographiée la *cangahua* à la date de 1984 (Zebrowski, 1997). À des fins comparatives, on a réalisé une carte où sont superposées les informations dérivées de cette carte et celles obtenues à partir de la mosaïque SPOT de 1995 (figure 3). Il ressort de ce document que :

- globalement, les principales zones d'affleurement de *cangahua* sont localisées dans les mêmes zones sur les deux documents. La superposition est signalée sur la figure 3 par la légende « spatialisation commune aux 2 approches »;
- néanmoins, dans le détail s'expriment des différences qui concernent la cangahua affleurante discontinue et qui se trouvent :

- soit dans des zones communes aux deux approches où la mosaïque SPOT indique, notamment dans les zones d'Ibarra, Quito-nord et Latacunga-Ambato, une extension plus grande de ce thème (noté « spatialisation/Spot » dans la légende de la figure 3). Plusieurs hypothèses, à vérifier par des travaux complémentaires de terrain, sont envisageables pour expliquer la différence : (i) les surfaces de *cangahua* affleurante discontinue ont progressé entre 1986 et 1995 ; (ii) la carte thématique ou alors les traitements de télédétection ne sont pas assez précis sur ce point. Le thème *cangahua* discontinue, qui est un thème


N
Cordillère Occidentale
Ibarra
Quito
Cordillère Orientale
Latacunga
Riobamba
spatialisation commune aux deux approches
spatialisation SPOT
spatialisation carte de sols
bassin interandin
limite bassin/páramo
limite mosaïque SPOT
10 0 10 20 km

composé, est plus difficile à discriminer que le thème *cangahua* « pure » caractérisé par une signature spectrale bien définie. D'autre part, la *cangahua* peut réfléchir, localement, comme les sables ponceux volcaniques ;

- soit dans des zones qui ne sont pas communes aux deux approches et où il existe une information qui provient de la carte thématique (noté « spatialisation/cartes de sols » dans la légende de la figure 3). Dans ce cas, la mosaïque SPOT n'a donné aucune réponse. Les deux documents n'ont pas été conçus dans le même esprit. Rappelons que la *cangahua* n'affleure qu'après décapage des horizons superficiels qui la coiffent. Lorsqu'elles n'affleurent pas, les *cangahuas* sont coiffées par des sols bruns vertiques ou par des sols sableux, ponceux et pulvérulents. Dans la carte thématique, tous les types de *cangahua* ont été pris en compte, que le matériau affleure ou soit recouvert par un sol. Dans les traitements de télédétection, compte tenu de l'importance de la signature spectrale d'un thème, seuls ont été retenus les thèmes de *cangahua* qui se concrétisent en surface par un affleurement total ou partiel.

Références bibliographiques

CHAUME, R.; COMBEAU, A., 1983: *Evaluations saisonnières comparées des signatures spectrales de divers milieux pérennes (forêts, prairies, sols nus) à partir de documents Landsat*, Documents techniques, N° 56, ORSTOM, Paris, 46 p.

CNES, 1992: *Télédétection spatiale*, Éditions Cépadués, 305 p.

CUSTODE, E.; DE NONI, G.; TRUJILLO, G.; VIENNOT, M., 1992: La cangahua en el Ecuador: caracterización morfo-edafológica y comportamiento frente a la erosión, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 332-346.

DE NONI, G.; TRUJILLO, G.; VIENNOT, M., 1986: L'érosion et la conservation des sols en Équateur, dans *Cahiers ORSTOM*, Série Pédologie, XXII, 2, p. 235-245.

DE NONI, G.; TRUJILLO, G.; VIENNOT, M., 1992: Análisis histórico, social y económico de la cangahua en Ecuador, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 503-514.

DUBUCQ, M., 1989: *Identification et cartographie par télédétection des sols érodés : application au lauragais Toulousain*, Thèse, l'Université P. Sabatier, Toulouse, 247 p.

FAURE, J.F., 1996: *Spatialisation et cartographie des affleurements de* cangahua *par télédétection dans le bassin interandin (Équateur)*, DESS, Université Paul Valéry, Montpellier, 111 p.

LUNDEN, B.; NORDSTROM, K.; SRTOMQUIST, L., 1990: An Evaluation of Soil Intensity Mapping from Spot Satellite Imagery by Studies of Colour Air-photos and Top-soil Content of 137 Censium, *University of Stockholm Rap.*, 74, Suède, p. 13-37.

ORSTOM, 1978: Analyse multivariable, Procédure «Loterie», Application à l'analyse multispectrale en télédétection, *Documents Techniques*, N° 39, Paris, 78 p.

PRAT, C. 1991: *Étude du* talpetate *de la région Centre Pacifique du Nicaragua*, Thèse, Université Paris VI, Paris, France.

QUANTIN, P., 1992: *Étude des sols volcaniques indurés « tepetates » des bassins de Mexico et de Tlaxcala, en vue de leur réhabilitation agricole*, Rapport scientifique final, contrat CEE/ORSTOM TS2-0212.

SERVENAY, A., 1995: *Spatialisation de la* cangahua *en Équateur à partir de données Spot : cas du bassin de Quito*, Mémoire de maîtrise IUP Gestion de l'environnement, Université Paris VII, 61 p.

ZEBROWSKI, C. 1992: Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 15-23.

ZEBROWSKI, C. 1997: Los suelos con cangahua en el Ecuador, en este volumen.

Estudio espacial de los tepetates del eje neovolcánico mexicano: metodología para un programa de investigación

Alice SERVENAY, Christian PRAT,
Valentino SORANI, Eduardo GONZÁLEZ

Abstract

Because of the imprecision of the known surface and the real distribution of the tepetates *along the neovolcanic belt, as well as the agro-socio-economical problems that cause the presence of this volcanic indurated level in the fields, we proposed to test a methodology which uses both teledetection and GIS on 1/25,000 scale to identify the area with* tepetates. *This work, based on previous knowledge of natural and anthropogenic reasons for the apparition of* tepetates, *aims to precise if information gathered in the Mexico and Tlaxcala valleys is also valid for the rest of the neovolcanic belt. We created a map of «potential* tepetate *presence» with a GIS and confronted it with teledetection views and field information. Then we crossed agro-socio-economic data to determine types of agriculture and life conditions. Crossing this map with those of the presence of the* tepetates, *we could define conditions and propositions for the generation of new soil from* tepetates.

Keywords: Tepetate - *Mexico - Methodology - Teledetection - Landsat - Mapping - GIS - Agro-socio-economy*

INTRODUCCIÓN

Gracias a varios trabajos de investigación, en particular los realizados en el marco del programa ORSTOM-CP-UAT-UG con un cofinanciamiento de la Unión Europea (Quantin, 1992; Zebrowski *et al.*, 1992), se conocen bastante bien las características bio-físico-químicas de los tepetates de los valles de México y de Tlaxcala. Se sabe también que es factible la formación de un suelo agrícola a partir de los tepetates estériles, duros, que afloran a la superficie (Báez *et al.*, 1997). Sin embargo, se carece de información relacionada con la extensión, las características, etc. de estos horizontes volcánicos endurecidos a lo largo del eje neovolcánico mexicano.

Según unos estudios, los tepetates cubrirían 30.000 km^2 (Zebrowski, 1992) mientras que otros señalan la cifra de 140.000 km^2 (Guerrero *et al.*, 1992). Además de esta imprecisión en cuanto a la extensión real, se desconoce la localización exacta de estas tobas

volcánicas endurecidas. Dadas las inmensas superficies a cubrirse, se puede realizar, a un primer nivel, un estudio espacial de la localización utilizando la teledetección asociada a una verificación de campo y naturalmente los documentos existentes (mapas de suelos, geología...).

Conociendo la localización de los tepetates, es posible, en una segunda etapa, averiguar si las condiciones de habilitación de estos materiales determinadas en los valles de México y de Tlaxcala son válidas para otras zonas. Ellas están relacionadas con el medio natural (clima, pendientes...) y humano (tipo de agricultura, de cultivos, nivel de recursos de la población...). Cruzando estas informaciones mediante un sistema de información geográfica (SIG) se pueden determinar las zonas similares a las conocidas, delimitar las zonas prioritarias para incorporar a la agricultura los tepetates aflorantes, hacer recomendaciones adaptadas al medio natural y humano, de modo que los nuevos suelos sean productivos lo más rápida y efectivamente posible, con un enfoque de desarrollo sustentable.

El estudio espacial de los tepetates aquí presentado es un trabajo en el que se utilizaron dos métodos distintos: la creación y el uso de un SIG y el procesamiento de algunas imágenes de satélite mediante la teledetección. Cada método va a proporcionar por sí solo una serie de informaciones, pero es ciertamente la correlación entre los dos lo que va a ofrecer la información más útil: la localización de las zonas prioritarias (desde un punto de vista tanto humano como del medio ambiente) en las que se podría convertir los tepetates erosionados y estériles en suelos de buena calidad agronómica.

Este trabajo permitirá hacer una evaluación a varios niveles de análisis. En un inicio se podrá averiguar si la metodología utilizada para localizar los tepetates es eficaz o si es necesario cambiar algunos parámetros para mejorar los resultados. A manera de *feedback*, se podrá evaluar si los datos de referencia en cuanto a las condiciones de aparición de los tepetates son válidos fuera de los valles de México y de Tlaxcala. También será posible evaluar la facilidad de consecución de las informaciones necesarias provenientes de muy diversas instituciones y contenidas en diferentes soportes (papel, diskett, fotografías...). Finalmente, se estimarán, para una zona representativa del eje neovolcánico, el tiempo y los costos necesarios para elaborar este tipo de estudio, lo que podrá ser extrapolado al eje neovolcánico en su totalidad.

METODOLOGÍA

El área de estudio seleccionada para este trabajo corresponde a los mapas del INEGI, a escala 1:250.000, de Morelia y de la cuidad de México, más una cuarta parte de los mapas de Pachuca y Querétaro, lo que representa una superficie total de 60.000 km^2 (figura 1). Esta zona fue escogida por cubrir la mayor parte de las áreas experimentales estudiadas por los programas ORSTOM-CP-UAT-UG, que pueden utilizarse como áreas de referencia, al igual que la cuenca del lago de Cuitzeo (Michoacán) donde se está elaborando un proyecto de investigación para el rescate de dicho lago.

Los datos utilizados son en su mayor parte mapas a escala 1:250.000 del INEGI (geología, edafología, climatología, topografía, uso del suelo) que datan de los años 80. Del mismo instituto, se obtuvieron los datos socioeconómicos disponibles en dos CD de la base de datos CIMA que corresponde a los resultados de los censos de 1985 y 1990 (los resultados del censo de 1995 no están aún disponibles en su totalidad). Se contó igualmente con el mapa de inventario forestal y el modelo numérico de terreno (MNT) realizados por el Instituto de Geografía de la UNAM para la SARH (1994) entre 1992 y 1995. Esa misma institución facilitó las imágenes de satélite Landsat TM, con sus 7 canales. Para cubrir la zona de estudio, se requirió parte de 7 imágenes.

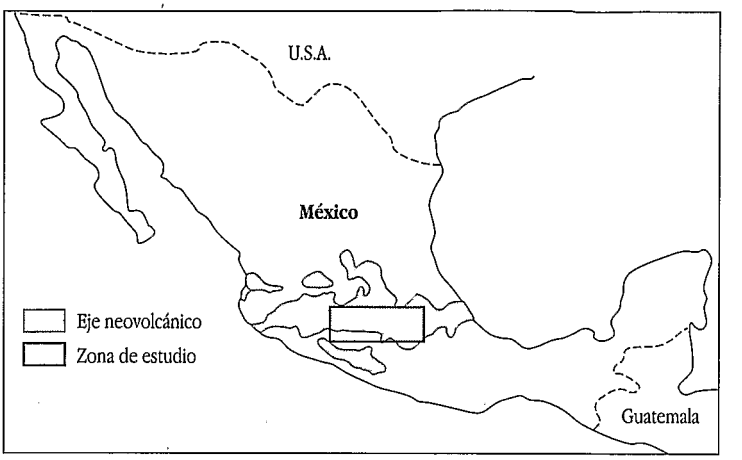


Figura 1
Localización de las comunidades estudiadas

De una forma u otra, las instituciones que participan en este trabajo son el ORSTOM, el Instituto de Geografía de la UNAM, el Colegio de Postgraduados en Agrociencias (estado de México) y la Universidad de Tolosa-Le Mirail en Francia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El medio físico

Conociendo las diferentes condiciones de afloración de los tepetates a la superficie de los suelos, es posible cruzar información cartográfica para obtener un mapa de su presencia potencial. Peña y Zebrowski (1992) consideran que los tepetates en los valles de México y Tlaxcala están presentes si el material geológico es piroclástico y del Cuaternario, si los suelos tienen una fase dúrica o fragipánica, si las precipitaciones anuales son inferiores a 800 mm con una época seca de 4 meses mínimo y si la geomorfología corresponde a las zonas de piedemonte de las sierras con pendientes superiores a 5-10 por ciento, con una altitud inferior a los 2.800 m.s.n.m. En cuanto al uso de suelo, los tepetates no afloran en las zonas de riego y tampoco en los bosques en buen estado, lo que, de una manera general, no es el caso en la frontera forestal.

En primer lugar, la información requerida para crear un sistema que permita encontrar los tepetates es la siguiente: mapas geológico, edáfico, de precipitaciones, de uso del suelo, de inventario forestal, de zonas de riego. Al principio, toda esta información, salvo la del inventario forestal, estaba disponible únicamente en papel. Fue necesario entonces transferirla a un soporte magnético (diskett), para lo cual, primeramente se dibujaron, en papel calco, los límites de las unidades, para luego «scanearlas» y finalmente vectorizarlas. Después de una corrección de los límites «scaneados», que nunca son perfectos, se constituyó la base de datos para cada unidad con la información de los mapas y se la unió a la base cartográfica. Una vez finalizados los mapas de un mismo tema, se verificó que los bordes de cada mapa correspondieran con los de los demás y que los polígonos tuvieran su número de referencia. En cuanto a las pendientes, el modelo numérico de terreno (MNT) las proporciona de manera automática. Al cruzar la información de cada una de las capas geográficas de este SIG, se obtuvo el mapa de localización teórica de los tepetates.

En segundo término, se elaboró un mapa de los tepetates a partir del procesamiento de las imágenes de satélite. Este trabajo consistió en una clasificación dirigida focalizada en la presencia de los tepetates. Gracias a recorridos de campo durante los cuales se tomaron puntos de referencia mediante un GPS (*Geo Positionning System*), se efectuaron correlaciones entre unidades de las imágenes, firmas espectrales de cada canal y presencia o ausencia de tepetates. Obviamente, se trata aquí únicamente de los tepetates que afloran.

Al mapa de localización teórica de los tepetates se sobrepuso el resultado del procesamiento de las imágenes de satélite. Con la ayuda de mapas de suelos muy detallados que sirvieron de referencia, se pudo conocer si las áreas delimitadas con uno y otro sistema coincidían o no. En los casos negativos, se efectuaron correcciones para eliminar o incluir zonas en uno de los dos tipos de mapeo. Finalmente, se obtuvieron las superficies, un mapa de localización de los tepetates aflorantes y otro de tepetates «potenciales».

El medio humano

En México se dispone de los resultados numerizados de los censos nacionales de 1985 y 1990. El INEGI pone a disposición de los usuarios los resultados del censo de 1995 bajo la forma de anuarios numerizados. Cada municipio está relacionado con las variables del censo, de tal forma que se pueden integrar directamente los resultados a una base de datos para conformar un SIG.

Se procesaron los datos correspondientes a los 910 municipios de la zona considerada. En primera instancia, se seleccionaron 9 criterios relacionados con las características de la población (edad, sexo, nivel de educación...), 4 con la economía (ingresos anuales, repartición entre sectores de la actividad económica...), 15 con el nivel de pobreza (acceso al agua, a la electricidad, nivel de desempleo...) y 29 correspondientes a datos agropecuarios (forma de tenencia de la tierra, superficie cultivada, tipo de producción, número de animales...). En una segunda etapa, se están comparando los criterios a fin de ver si se duplican o no, lo que permitirá eliminar las variables inútiles.

Relación del medio natural con el medio humano

Relacionando la base de datos del medio ambiente con la de las condiciones agro-socioeconómicas de los municipios estudiados, se logró caracterizar el uso de las áreas con tepetates y las comunidades locales.

La información obtenida permite alcanzar un triple objetivo: conocer las condiciones agropecuarias para saber si las recomendaciones en cuanto al manejo de los tepetates recién roturados son válidas; determinar las características socioeconómicas de la población para determinar sus capacidades, en particular económicas, para fomentar un programa de roturación de los tepetates; y finalmente obtener informaciones que permitan estimar los impactos agro-socioeconómicos de dicha roturación en las comunidades campesinas involucradas en estos programas.

Por ejemplo, en zonas muy erosionadas con tepetates aflorantes de comunidades pobres, es indispensable emprender un programa de roturación de dicho material con un financiamiento necesariamente exterior. En otro caso, se puede observar la aparición de tepetates en el límite entre bosque y campo, lo cual indica un manejo inadecuado del bosque, generalmente por sobre-pastoreo (Navarro y Prat, 1996). La situación se puede controlar apoyando a la comunidad con asesoría técnica centrada en la ganadería y la producción de forraje así como en el manejo y el aprovechamiento adecuado del bosque, en cuyo caso se trata más de una acción preventiva que de un programa de roturación de los tepetates.

CONCLUSIÓN

Después de cinco meses de trabajo, las diferentes capas del medio físico y humano del SIG están listas y se han llevado a cabo los recorridos de campo, determinado los puntos GPS de referencia, etc., mientras que apenas se inicia el procesamiento de las imágenes de satélite. A pesar de contar con casi toda la información necesaria, se han encontrado problemas de compatibilidad entre computadoras y equipos informáticos conexos. Se ha previsto concluir el procesamiento de los datos en el transcurso del primer semestre de 1997.

Los productos finales serán presentados principalmente bajo la forma de mapas: el mapa de localización «potencial» de los tepetates, el de tepetates aflorantes, el de las características agroeconómicas de las comunidades que tienen tepetates y finalmente el mapa de las áreas de acción prioritaria de protección ambiental. Estos mapas servirán para apoyar el desarrollo socioeconómico de comunidades generalmente marginadas.

Si se logran los objetivos, estos documentos permitirán estudiar, con la misma metodología, la parte restante del eje neovolcánico mexicano para disponer finalmente de datos precisos sobre la problemática de los tepetates en México.

Los trabajos se realizaron a escala 1:250.000, lo que permitirá a políticos, instituciones de estados y federales planear fácilmente programas de acción. Sin embargo, será necesario, una vez definidas las grandes opciones, trabajar localmente a una escala de 1:50.000 o más detallada. Esto dependerá de la comprensión de la problemática y en definitiva de la voluntad política de las autoridades mexicanas...

Referencias bibliográficas

BAÉZ, A.; ASCENCIO, E.; PRAT, C.; MARQUÉZ, A., 1997: Análisis del comportamiento de cultivos en tepetate t3 incorporado a la agricultura pluvial (1993 a 1995), Texcoco, México, en este volumen.

GUERRERO, E.; LUNA, J. L.; CABALLERO, E., 1992: Distribución de los tepetates de la República Mexicana, escala 1:4'000.000, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 131-136.

NAVARRO, H.; FLORES, D.; PÉREZ M. A., 1997: Desarrollo agroecológico y factores agronómicos de la productividad en suelos volcánicos endurecidos, en este volumen.

NAVARRO, H.; PRAT, C., 1996: Habilitación agrícola de los tepetates de los valles de México y de Tlaxcala, en *El campo mexicano: una modernización a marchas forzadas*, P. Bovin (editor), CEMCA-ORSTOM, México, p 253-291.

PEÑA, D.; ZEBROWSKI, C., 1992: *Estudio de los suelos volcánicos endurecidos (tepetates) de las cuencas de México y Tlaxcala (México). Informe del mapa morfopedológico de la vertiente occidental de la Sierra Nevada*, anexo al informe final, Contrato CCE-ORSTOM N° TS2-0212, 101 p.

QUANTIN, P., 1992: *Étude des sols volcaniques indurés « tepetates » des bassins de Mexico et de Tlaxcala, en vue de leur réhabilitation agricole*, Rapport scientifique final, contrat CEE/ORSTOM TS2-0212.

SARH, 1994: *Memoria del inventario nacional forestal periódico*, México, 47 p.

ZEBROWSKI, C. *1992*: Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 15-23.

ZEBROWSKI, C.; PRAT, C.; ETCHEVERS, J.; ARIAS, H.; MIRANDA, M.E., 1992: *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, 572 p.

Síntesis del tema 2

Factores físicos, químicos y biológicos que afectan la productividad de los suelos volcánicos endurecidos

Jorge D. Etchevers B.

INTRODUCCIÓN

En los últimos 10 años se han realizado una serie de investigaciones básicas y aplicadas sobre los suelos volcánicos endurecidos y estériles, principalmente en México, Nicaragua y Ecuador, pero también en otros países, con el propósito de generar tecnología para su rehabilitación y uso sustentable.

Los principales resultados de la investigación conducida en el pasado reciente han sido publicados en libros, revistas especializadas y memorias de congresos: Ruiz (1987), Miehlich (1991), *Terra* Vol. 10 (número especial, 1992), *Terra* Vol. 11 (número especial, 1993) y el volumen 6a de las *Transactions of the 15th World Congress of Soil Science* (1994). En particular, han sido objeto de estudios los suelos volcánicos endurecidos ubicados en la región del Pacífico de todo el continente americano. Especial atención merecen los artículos escritos sobre el tema de su productividad por Pimentel (1992), Arias (1992), Custode *et al.* (1992), Werner (1992), Ferrera *et al.* (1992), Navarro *et al.* (1992), Gutiérrez *et al.* (1994), Etchevers *et al.* (1992 a, b y c), Quantin (1994), Zebrowski (1992), Arias y Oropeza (1994), De Noni *et al.* (1994), Etchevers y Ferrera (1994), Navarro y Zebrowski (1994), entre otros.

La habilitación de los suelos volcánicos endurecidos como tierra de cultivo exige un mejoramiento de sus características físicas, químicas y biológicas para transformarlos en tierras de labor. Sin embargo, tratándose de sistemas relativamente frágiles, hay que manejarlos con cuidado. La anterior situación justifica los esfuerzos que se han realizado y se realizan en ese sentido.

Los aspectos relacionados con la información pasada y la más reciente, generada en torno a los cambios físicos, químicos y biológicos que deben promoverse, así como al mejoramiento de su fertilidad, son el objeto del presente trabajo.

La recuperación y la incorporación de los suelos volcánicos endurecidos a la agricultura requiere de un enfoque integral que considere el mejoramiento de ciertas propiedades relacionadas con el sistema de producción. Entre estas propiedades se cuentan: las físicas, particularmente aquellas que favorecen el crecimiento y desarrollo de las raíces y la capacidad de almacenamiento de agua; las bioquímicas, en especial la presencia de una fuente de carbono rápidamente disponible que permita el funcionamiento adecuado de la actividad microbiana; y las químicas, sobre todo aquellas relacionadas con la nutrición de los cultivos. El conocimiento de la hidrodinámica de los suelos volcánicos endurecidos es de particular interés para utilizar más eficientemente la escasa agua disponible.

En varios tipos de materiales endurecidos, el contenido de nitrógeno es muy bajo, debido a la ausencia casi absoluta de residuos orgánicos. Se trata de uno de los principales factores limitantes. El establecimiento de cultivos agrícolas después de su rehabilitación ha considerado en forma especial el incremento de la materia orgánica y del nitrógeno disponible, mediante adiciones de estiércol, abonos verdes y fertilizantes nitrogenados. La respuesta a estas prácticas ha sido documentada en numerosos trabajos (Ruiz, 1987; Zebrowski, 1992; Ferrera-Cerrato, 1992).

El fósforo aprovechable en los suelos volcánicos endurecidos, es prácticamente inexistente. Tal comportamiento ha sido atribuido por Etchevers *et al.* (1992c) a los bajos niveles de P total en estos materiales, más que a reacciones de adsorción rápida o lenta. Al igual que el nitrógeno, el fósforo debe ser adicionado al suelo, hasta alcanzar niveles compatibles con los requerimientos de los cultivos. Debido a las características adsortivas de estos materiales, es posible alcanzar dichos niveles en corto plazo, mediante la adición de cantidades moderadas de fertilizantes fosfatados de alta solubilidad (Etchevers *et al.*, 1992c).

El resto de elementos esenciales para el crecimiento de las plantas, especialmente Ca, Mg, K y microelementos, se encuentran en estos materiales en cantidades suficientes.

A continuación se presenta una síntesis de las conclusiones más significativas expuestas en estudios realizados en el pasado, y que se relacionan, en general, con la productividad y, en particular, con la fertilidad de los tepetates cultivados (Etchevers y Ferrera-Cerrato, 1994):

- Los tepetates presentan serios problemas físicos, químicos y biológicos, que impiden, en su condición natural, el crecimiento de las plantas.
- Dos tipos principales de suelos volcánicos endurecidos han sido identificados: los fragipanes, que se pueden rehabilitar con relativa facilidad, y los duripanes que son menos susceptibles de rehabilitación. En cada uno de estos tipos existen varias categorías relacionadas principalmente con la naturaleza y la edad del material que les dio origen.
- Los suelos volcánicos endurecidos adquieren propiedades físicas adecuadas mediante fragmentación (subsoleo, laboreo profundo y rastra), lo que requiere una gran inversión económica. Se ha calculado que el tamaño óptimo de los agregados que deben quedar al finalizar los tratamientos de recuperación es de aproximadamente 3 a 5 mm.
- La densidad aparente de los suelos volcánicos endurecidos en su estado natural es cercana a 1,6 gcm^{-1}, mientras que la de los roturados es de aproximadamente 1,2 gcm^{-1}. Su porosidad total en el primero de los estados es de alrededor del 50 %, pero la macroporosidad es muy baja (< 5 %), lo que dificulta la penetración de las raíces, de agua y aire.
- Al roturar los suelos volcánicos endurecidos para mejorar sus propiedades físicas, estos se hacen muy susceptibles a la erosión.
- El mejoramiento de las propiedades físicas no es suficiente para asegurar la productividad de los suelos volcánicos endurecidos.
- En general, los suelos volcánicos endurecidos contienen suficiente arcilla (> 20 %) y poseen una capacidad de intercambio de cationes considerada como media (> 15 $cMkg^{-1}$), lo que es suficiente para tener una adecuada capacidad de retención de agua y nutrimentos.
- La disponibilidad de nitrógeno y fósforo de los suelos volcánicos endurecidos es muy baja, lo que constituye un serio obstáculo para el crecimiento de las plantas. Así, se deben tomar las medidas necesarias para incrementar su disponibilidad y ello se logra mediante la adición de abonos orgánicos, fertilizantes inorgánicos y un adecuado manejo de los residuos.

- El contenido de materia orgánica en estos materiales, característica estrechamente relacionada con el suministro de nutrientes y las propiedades físicas, es muy bajo.
- La baja concentración de carbono y, particularmente de carbono soluble, afecta a la biomasa microbiana que en general es muy baja.
- El pH de los suelos volcánicos endurecidos es de neutro a ligeramente alcalino, reacción propicia para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, algunos suelos contienen carbonato de calcio en concentraciones superiores al 5l %, lo que interfiere con el suministro de micronutrimentos a los cultivos.
- En general, la concentración de cationes intercambiables observada en los suelos volcánicos endurecidos es adecuada, aunque se ha constatado que el potasio de este tipo puede disminuir con los años de cultivo, pese a la abundancia de vidrios volcánicos primarios que contienen.
- La disponibilidad de fósforo para los cultivos es muy baja (< 3 ppm P-Olsen), pero su capacidad de adsorción de ese elemento es elevada, lo que permite aumentar su concentración en el medio con relativa facilidad. Esto se logra mediante la adición de fertilizantes fosfatados.

LOS TRABAJOS PRESENTADOS EN ESTE TALLER

Los trabajos presentados complementan o precisan los estudios resumidos en la sección anterior. Las contribuciones están contenidas en 11 presentaciones: 10 de México y una del Ecuador. Dos de ellas se refieren a la condición de fertilidad de los suelos volcánicos endurecidos en su estado natural en los estados de México y Tlaxcala, en México, y en la provincia de Pichincha, en el Ecuador, respectivamente. Una tercera contribución trata de la dinámica del nitrógeno en tepetates de México, cultivados por periodos que van de 1 año hasta 60 años, y una cuarta al cálculo, mediante un modelo de simulación (QUEFTS), de los rendimientos máximos y del suministro de nutrientes en tepetates recuperados del estado de Tlaxcala, en México. Cuatro ponencias se centran en el uso de distintos tipos de materia orgánica, vermicomposta o abonos verdes, en la recuperación de los tepetates y en el efecto de la inoculación con microorganismos tanto del suelo como de los cultivos establecidos en el proceso de recuperación. Tres trabajos tocan puntos relacionados con los aspectos físicos de los suelos endurecidos de México: dos de ellos tratan el efecto del tipo de vegetación en la formación de agregados y en la desagregación de duripanes del estado de Morelos y el último, de las propiedades físicas de los tepetates recuperados en el estado de Tlaxcala, ambos en México.

De los aportes que hacen estas contribuciones se pueden destacar los siguientes aspectos:

En cuanto a las características químicas relacionadas con la nutrición de las plantas, Brito y Etchevers señalan que los resultados del análisis de un elevado número de muestras provenientes de suelos volcánicos endurecidos aflorantes de los estados de México y Tlaxcala, en México, susceptibles de ser incorporados a la agricultura, confirman la información generada por la observación de un número limitado de casos por autores como Etchevers *et al.* (1992) y Cajuste y Cruz (1987). Esto es que los factores más limitantes para el crecimiento de las plantas son la insuficiencia de nitrógeno y fósforo, mientras que los demás elementos se encuentran en cantidades consideradas como adecuadas. Estos datos proporcionan información valiosa para planear las prioridades de atención que requiere el estudio de los diferentes problemas nutrimentales de los suelos de esa región, ya que se cuantificó la proporción relativa de las clases de fertilidad. Resultados

similares a los anteriores, en cuanto a que las carencias en nitrógeno y fósforo son los principales factores químicos limitantes de la producción, son reportados por Cisneros *et al.* para suelos volcánicos endurecidos del Ecuador. Además, los suelos que contienen elevados niveles de $CaCO_3$ muestran baja disponibilidad de elementos menores, por efecto de alcalinidad (pH > 8).

Los resultados presentados por Etchevers *et al.* en relación a la parte de la dinámica del nitrógeno asociada a los residuos de las plantas, permitió concluir que: en el sistema tradicional de cultivo de maíz empleado en los suelos volcánicos endurecidos del altiplano mexicano, las entradas naturales de nitrógeno orgánico al suelo, se deben a: (a) los restos de los tallos (tocones) que deja el productor después de cosechar y retirar la paja del sembradío; (b) las raíces del maíz y las malezas que crecen durante la estación; (c) los restos de tejidos del cultivo del año anterior incorporados al suelo pero que no han sufrido un proceso de descomposición. La cantidad de N restituida por los residuos es solo de 16 kg/ha/año.

La cantidad de residuos se relacionó directamente con la capacidad del agro-ecosistema para fijar carbono y acumular materia seca. La producción media de materia seca de la parte aérea del maíz, en los 10 sitios cosechados, fue de 2.940 kg/ha. Estos valores son inferiores a la producción máxima posible de biomasa aérea en el agro-ecosistema estudiado, cuando la escasez de agua no es un factor limitante. Baumann y Werner, empleando el modelo QUEFTS, predijeron que, en las condiciones de Tlaxcala, México, era posible obtener, en teoría, rendimientos de aproximadamente 1 a 3 toneladas de maíz por hectárea. Este último valor está asociado a una profundidad de suelo de hasta 70 cm, para incrementar la capacidad de almacenamiento de humedad.

El comportamiento de un cultivo, en cuanto a su eficiencia de desempeño en una situación cualquiera, puede ser juzgado por el valor de su índice de cosecha (IC). El IC para los maíces criollos del altiplano mexicano es de 0,39 (Obrador, 1994). Solo dos sitios experimentales de los observados por Etchevers *et al.* se acercaron a ese valor. En ellos, la producción promedio de materia seca de la parte aérea fue de aproximadamente 3.500 kg/ha, cantidad inferior al rendimiento máximo posible para el agro-ecosistema de la vertiente noroccidental de la Sierra Nevada y al predicho por Baumann y Werner.

De acuerdo con las funciones empíricas generadas, para suelos delgados del altiplano mexicano, por Galvis (1990), por cada milímetro de agua caída en un período crítico para la planta de maíz, podrían producirse aproximadamente 10 kg en suelos someros similares a los tepetates recuperados, lo que significa un potencial de producción de 3.000 kg/ha de grano, cercano al valor predicho por el modelo QUEFTS (Baumann y Werner). Etchevers *et al.* reportan una producción de 3.500 kg/ha de trigo en un tepetate recién recuperado al que se le agregaron 40 toneladas de estiércol. Estas observaciones y deducción indican que en los tepetates existen factores limitantes distintos a la disponibilidad de agua de lluvia, probablemente su distribución o su capacidad de almacenamiento o factores nutrimentales, que habría que revisar.

Etchevers *et al.* reportan que la entrada de nitrógeno al suelo, por el concepto de residuos de la parte aérea, está determinada, en el sistema tradicional de explotación practicado en el altiplano mexicano, por el peso seco de los tocones de los tallos, que quedan en el campo. Este último representa un ingreso de nitrógeno al suelo de aproximadamente 2,0 kg/ha. La cantidad de raíces que se incorporan al suelo depende de la biomasa aérea. A mayor biomasa aérea, mayor cantidad de raíces producida. Se estimó que, bajo las condiciones actuales de producción, pueden ingresar al suelo, por este conducto,

aproximadamente 500 kg/ha de raíces. Su aporte medio de nitrógeno al suelo sería de 7,0 kg/ha. Es interesante destacar que se observó un aporte considerable de otras fuentes orgánicas, presumiblemente raíces de malezas, que también contribuyeron a entradas de nitrógeno y que son más importantes que las del cultivo. En promedio, se obtuvo un aporte global por este rubro del orden de los 20 a 30 kg/ha de nitrógeno. Un 30 a 35 % del nitrógeno ingresado por este concepto se mineraliza durante el periodo de cultivo, lo que determina un aporte neto de 10 a 15 kg/ha, insuficiente para atender la demanda de este elemento en un cultivo de maíz, si consideramos que esta, para un rendimiento de 1,3 toneladas de grano, es de 33 kg/ha. Así, es preciso que se complemente el suministro nativo del suelo con aplicaciones de fertilizante nitrogenado. El uso de leguminosas como fuente de nitrógeno en los suelos volcánicos endurecidos ha sido poco estudiado a pesar de que fue experimentado en ese sentido.

Los trabajos presentados en este simposio referentes al uso de materia orgánica se centran principalmente en la evaluación del impacto de la vermicomposta o composta sometida a la acción de las lombrices (Flores y Ferrera-Cerrato, Santamaría y Ferrera-Cerrato). El empleo de este material resultó en aumentos considerables de la producción de dos cultivos indicadores: cebolla (Flores y Ferrera-Cerrato) y maíz (Santamaría y Ferrera-Cerrato). Estos resultados y los de Delgadillo y Ferrera-Cerrato vienen a confirmar las múltiples experiencias sobre este tema citadas por Ruiz (1987), *Terra*, volumen 10 (número especial, 1992); *Terra*, volumen 11 (número especial, 1993) y las *Transactions of the 15th World Congress of Soil Science*, volumen 6a (1994). Desgraciadamente, a partir de la información presentada no es posible inferir si existe alguna ventaja comparativa de la vermicomposta respecto de la composta sin tratamiento con lombrices. En caso de aporte de vermicomposta, la inoculación del cultivo con una micorriza arbuscular resultó en una ligera ventaja en cuanto al rendimiento de la cebolla respecto al tratamiento sin inoculación (Flores y Ferrera-Cerrato). Dicho comportamiento, sin embargo, no fue observado en el caso del maíz (Santamaría y Ferrera-Cerrato), lo que se atribuyó a un bajo porcentaje de colonización por *Glomus* de las plantas de esa especie.

Delgadillo y Ferrera-Cerrato incursionaron en el uso de una leguminosa forrajera, *Melilotus albus*, como elemento adicional a la aplicación de materia orgánica, en los trabajos de recuperación de los tepetates. La leguminosa se ensayó inoculada y sin inocular. La inoculación no representó una ventaja adicional en la producción de materia seca en un corte hecho 60 días después de la siembra, así como tampoco lo hizo la aplicación de estiércol vacuno, pero en un corte practicado 90 días después del primero se observó cierta ventaja de este tratamiento respecto a aquel que no lo recibió. Ferrera-Cerrato *et al.* concluyen de sus experiencias una influencia positiva de los microorganismos en la recuperación de los tepetates.

En cuanto a los avances de los últimos años en la comprensión de las propiedades físicas de los suelos volcánicos endurecidos relacionadas con la productividad, se reportan dos tipos de experiencias. Las primeras, conducidas por Fechter-Escamilla y Flores se refieren al impacto en la estabilidad de agregados, la distribución del tamaño de poros, la densidad aparente y la conductividad hidráulica de un tepetate t3 sometido a labranza tradicional y a labranza reducida con y sin cobertura vegetal, y al efecto del tiempo de rehabilitación, esto es años de cultivo, en la estructura de estos suelos. Estos autores señalan que los métodos de labranza empleados (tradicional con surcos o reducida) no tuvieron efecto alguno en la porosidad total (55 %), en la conductividad hidráulica (25 cm día-1), ni en la densidad aparente. La macroporosidad media alcanzó el 20 %. La labranza

reducida, sin embargo, tendió a disminuir la proporción de los poros de tamaño medio y a incrementar la estabilidad de agregados en los cinco primeros centímetros, particularmente en el tratamiento con cobertura vegetal. Fechter-Escamilla y Flores concluyeron que la estabilidad de los agregados es el parámetro que permite detectar con mayor sensibilidad los cambios estructurales en los tepetates rehabilitados. En efecto, este parámetro fue utilizado para evaluar el impacto de los años de cultivo en el desempeño del suelo. En general, la estabilidad de los agregados fue mayor en los primeros años posteriores a la rehabilitación. Esto puede ser explicado por el efecto desagregador de los cultivos, paralelo a la formación de agregados, como lo explican los trabajos de Velásquez y Flores, y Acevedo y Flores.

Estos autores reportaron que, además de la naturaleza del material endurecido (un duripán y tepetates «blanco» y «amarillo»), las especies vegetales (arbóreas y herbáceas) y el nivel inicial de trituración (fino y grueso) afectan la formación de agregados estables en agua a pesar de la destrucción de los fragmentos originales. Los primeros autores observaron que en los tratamientos que tenían inicialmente un nivel fino de fracturación, la presencia de especies vegetales produjo una disminución de los fragmentos menores a 0,25 mm, pero simultáneamente un incremento de agregados estables de nivel superior. Por el contrario, cuando el material triturado tenía inicialmente un grado de fragmentación grueso, las especies vegetales favorecieron la disminución de estos fragmentos (> 5 mm), pero acrecentaron la formación de agregados de menor tamaño. A medida que se incrementó el tiempo de permanencia de las especies en el material fragmentado, la estabilidad de los agregados también aumentó. Este experimento, en contraste con el de Fechter-Escamilla y Flores, fue conducido por corto tiempo, en macetas y bajo condiciones ambientales controladas. El eucalipto y el pasto Rhodes fueron las especies que fomentaron en mayor medida la formación de agregados en el duripán fragmentado, aunque la guayaba se mostró particularmente eficiente durante el periodo inicial de establecimiento.

Acevedo y Flores estudiaron, además, el efecto de dos tipos de abonos orgánicos y de una solución nutritiva en los procesos de agregación. El estiércol de gallina promovió una mayor agregación que el de bovino, pero la adición de una solución nutritiva no significó ninguna ventaja en la disgregación de los fragmentos o en la formación de los agregados.

Referencias bibliográficas

ARIAS, H., 1992: Rehabilitación de tepetates: una alternativa para la producción agropecuaria y forestal, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 309-317.

ARIAS R., H. M.; OROPEZA M., J. L., 1994: A *Tepetate* Reclamation Program in the Mexico Watershed, in *Transactions of the 15th World Congress of Soil Science*, Acapulco, México, Vol. 6a, p. 541-553.

CAJUSTE, L. J.; CRUZ, J., 1987: Evaluación de los micronutrientes en maíz criollo (*Zea mays*) en suelos con influencia de tepetate calcáreo, en *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*, J. F. Ruiz F. (editor), Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México, p. 95-104.

CUSTODE, E.; DE NONI, G.; TRUJILLO, G.; VIENNOT, M., 1992: La cangahua en el Ecuador: caracterización morfoedafológica y comportamiento frente a la erosión, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 332-346.

De Noni, G.; Janeau, J.-L.; Prat, G.; Trujillo, G.; Viennot, M., 1994: Hydrodinamique, erodabilité et conservation des sols volcaniques indurés d'Amérique latine (Équateur, Mexique et Nicaragua): impact du matériau originel et effet de la réhabilitation agricole, in *Transactions of the 15th World Congress of Soil Science*, Acapulco, México, Vol. 6a, p. 554-570.

Etchevers, J.; Ferrrera-Cerrato, R., 1994: Fertilidad de los suelos volcánicos endurecidos: características químicas y microbiológicas de los tepetates en México, en *Transactions of the 15th World Congress of Soil Science*, Acapulco, México, Vol. 6a, p. 571-591.

Etchevers, J.; López, R.; Zebrowski, C.; Peña, D., 1992a: Características químicas de tepetates de referencia de los Estados de México y Tlaxcala, México, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 171-177.

Etchevers, J.; Cruz, J.; Mares J.; Zebrowski, C., 1992b. Fertilidad de los tepetates. I. Fertilidad actual y potencial de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada (México), en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 379-384

Etchevers, J.; Zebrowski, C.; Hidalgo, C.; Quantin, P., 1992c: Fertilidad de los tepetates. II. Situación del fósforo y del potasio en tepetates de México y Tlaxcala, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 385-391.

Ferrera-Cerrato, R., 1992: Papel de los microorganismos en la recuperación de suelos marginales, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 408-414.

Galvis, S. A., 1990: *Validación de las normas de fertilización de N y P estimadas con un modelo simplificado para maíz, con las dosis obtenidas en la experimentación de campo*, Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, 113 p.

Gutiérrez G., B.; Velázquez M., A.; Gómez, A.; Etchevers B., J. D., 1994: Mineralizable Soil Nitrogen under Different Thinning Levels in Two Pinus Patula Stands, in *Transactions of the 15th World Congress of Soil Science*, Acapulco, México, Vol. 5b, p. 18-19.

Miehlich, G., 1991: *Chronosequences of Volcanic Ash Soils*, Hamburger Bodenkundl. Arbeiten, 15, 207 p.

Navarro, H.; Zebrowski, C., 1992: Análisis agronómico comparativo en tepetates, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 451-459.

Navarro, H.; Zebrowski, C., 1994: La réhabilitation agricole des sols volcaniques indurés et érodés en Équateur et au Mexique, en *Transactions of the 15th World Congress of Soil Science*, Acapulco, México, Vol. 6a, p. 592-610.

Obrador, J. J., 1994: *Validación de parámetros de planta y clima que se utilizan en un modelo simplificado destinado a determinar dosis de fertilización de N, P y K para maíz*, Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, 120 p.

Pimentel, B.J., 1992: Cómo hacer productivos a los tepetates en México, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 293-301.

Quantin, P., 1994: Intoduction to the Knowlwdge and Management of Indurated Volcanic Soil Horizons, in *Transactions of the 15th World Congress of Soil Science*, Acapulco, México, Vol. 6a, p. 436-444.

Ruiz, J. F. (editor), 1987: *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*, Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos, Chapingo, México, 221 p.

Werner, G., 1992: Suelos volcánicos endurecidos (tepetates) en el estado de Tlaxcala: distribución, rehabilitación, manejo y conservación, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 318-331.

Zebrowski, C. 1992: Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 15-23.

Propiedades físicas de suelos volcánicos endurecidos (tepetates t3) después de su rehabilitación, en Tlaxcala (México)

Ulrich FECHTER-ESCAMILLA, Gustavo FLORES G.

Abstract

Recently rehabilitated indurated volcanic ash soils (tepetates *t3) were analysed for various physical parameters like stability of aggregates, pore size distribution, hydraulic conductivity and bulk density. The study consists of two experiments: comparison of different tillage techniques in maize and comparison of rehabilitated* tepetates *of different age. The tillage techniques didn't show any effect on porosity and bulk density. The material was characterised by a macro-porosity of more than 20 % and a total porosity of 55 %. Reduced tillage showed lower meso-porosity. The hydraulic conductivity was determined in all treatments at 25 cm/d. The reduced tillage treatment with clover underseed showed a highly significant increase in aggregate stability by the soil cover in the above 5 cm. Rehabilitated tepetates of different ages showed a reduction in aggregate stability in the older terraces.*

Aggregate stability, determined by the percolation method, seems to be the most adequate parameter to detect short-term changes of structural properties of rehabilitated tepetates.

***Keywords**: Indurated Volcanic Ash Soils - Mexico - Reduced Tillage - Maize - Rehabilitation - Aggregate Stability - Infiltration - Soil structure - Pore Size Distribution*

INTRODUCCIÓN

Para aumentar el área aprovechable para la agricultura en Tlaxcala, desde hace 20 años se rehabilitan suelos volcánicos endurecidos (tepetates), que han sido degradados por erosión hídrica. El origen y las características de estos suelos fueron descritos por varios autores en Zebrowski *et al.* (1992) y en ISSS (1994). Para asegurar la durabilidad de las obras de rehabilitación es necesario monitorearlas y evaluarlas y al mismo tiempo desarrollar continuamente métodos de manejo adaptados a la situación ecológica y económica de los beneficiarios. Esto requiere parámetros adecuados para detectar a tiempo las deficiencias y necesidades de la rehabilitación, en lo que respecta tanto al campesino como al propio recurso. Como la rehabilitación que se realiza en forma de subsoleo con maquinaria pesada representa una intervención dirigida principalmente a la estructura del suelo degradado, los cambios en este campo requieren una atención especial, y ello aún

más si se tiene en cuenta que la erosión hídrica, determinada en gran parte por la estructura del suelo, sigue siendo un factor importante que pone en peligro el carácter sustentable de las inversiones.

Por otro lado, hacen falta parámetros adecuados con una sensibilidad suficiente para poder monitorear los procesos de degradación en el área de estudio (Lozano y Pla Sentis, 1994). La estructura, que forma parte del conjunto de parámetros mínimos necesarios para fines de monitoreo del efecto de la erosión en la productividad del suelo, consiste en tres componentes (Kay, 1989):

1. la forma estructural o la geometría de los poros, incluyendo la conductividad hidráulica,
2. la estabilidad de los agregados,
3. la resiliencia estructural, es decir, la capacidad del suelo de volver a formar su estructura después de haberse degradado.

Frente a esta problemática, el empeño se centró en aclarar la importancia relativa de la estructura del tepetate rehabilitado, de dos formas:

- comparando diferentes tipos de labranza en lo que se refiere a sus efectos en la estructura del suelo, y
- evaluando acciones de rehabilitación al cabo de distintos períodos transcurridos desde la recuperación.

MATERIAL Y MÉTODOS

Los estudios se realizaron en dos lugares en el estado de Tlaxcala, en tepetates rehabilitados t3, cuyas características generales se reúnen en el siguiente cuadro:

Cuadro 1
Descripción de las parcelas estudiadas

Comparación de diferentes tipos de labranza - Santiago Tlalpan	
Tepetate rehabilitado	Tipo de suelo: *Anthrosol*; Textura (%): arena = 38, limo = 35, arcilla = 27; M.O. = 0,3 %, pH ($CaCl_2$) = 6,5; 7 años de rehabilitación; profundidad del horizonte rehabilitado ▪ 40-70 cm
LRscv	labranza reducida sin cobertura vegetal: aradura, siembra directa de maíz sin labores de cultivo
LRccv	labranza reducida con cobertura vegetal: aradura, siembra directa de maíz, siembra de *Trifolium repens* ssp. enano al voleo
LT	labranza tradicional: aradura, rastra de discos, surcado, siembra de maíz en surcos, una labor cultural
Tepetate desnudo	Tipo de suelo: *Vertic Cambisol* con fase *duric*; Da 1,47 g/cm³; Porosidad (%): Pg 12 Pm 12 Pf 22
Comparación de diferentes años de rehabilitación - San Andrés Cuamilpa	
Tepetate rehabilitado	Tipo de suelo: *Anthrosol*; Textura (%): arena = 60, limo = 26, arcilla = 14; M.O. = 0,6 %, pH ($CaCl_2$) = 6,1; profundidad del horizonte rehabilitado = 30-45 cm; monocultivo de maíz LT (véase arriba)
parcela 1	18 años de rehabilitación
parcela 2	19 años de rehabilitación
parcela 3	15 años de rehabilitación
parcela 4	7 años de rehabilitación
parcela 5	7 años de rehabilitación
parcela 6	14 años de rehabilitación
Tepetate desnudo	Tipo de suelo: *Chromic Cambisol* con fase *duric*; Da: 1,65 g/cm³; Porosidad (%): Pg 9 Pm 10 Pf 16

El tamaño de las terrazas estudiadas fue de 1.000 a 1.500 m^2 y el muestreo se realizó en 1994 y 1995, en Cuamilpa y Tlalpan respectivamente.

La porosidad (DTP) junto con la densidad aparente (Da) se determinaron en muestras no perturbadas mediante el método de platillos de presión, utilizando la constante de 2,65 g/cm^3 para la densidad real (Peña y Zebrowski, 1992). Las muestras fueron tomadas en la mitad de la temporada hasta llegar al tepetate subyacente al horizonte rehabilitado (entre 30 y 70 cm de profundidad), de la siguiente manera:

- en Cuamilpa con 2 perfiles/parcela y 2 horizontes por perfil (por encima y por debajo del piso de arado), con 6 repeticiones por horizonte;
- en Tlalpan con 6 perfiles/parcela hasta el tepetate, a intervalos de 10 cm y 2 repeticiones por horizonte en cada perfil.

Para el análisis de los agregados se tomaron muestras perturbadas (mezcla de varias tomas del perfil) al inicio de la temporada, entre 0 a 20 y 20 a 40 cm de profundidad y de los mismos perfiles arriba mencionados, y en la mitad y al final de la temporada, entre 0 a 5, 5 a 10, 10 a 20, 20 a 30 cm, etc. de profundidad, hasta el tepetate subyacente. Después del secado al aire, las muestras fueron tamizadas en seco, pesando cada fracción para establecer la distribución del tamaño de los agregados (DTA). Para la determinación de la estabilidad de los agregados (EA) mediante el método de percolación (Becher y Kainz, 1983), se tomaron las fracciones 1-2 mm y 3-5 mm, con 3 repeticiones en cada una.

La conductividad hidráulica (CH) se determinó en campo utilizando el permeámetro de fuente con altura constante Guelph (*Soil Moisture Equipment*, Reynolds *et al.*, 1991), y la humedad volumétrica con un TRASE-System (*Soil Moisture Equipment*), con 5 a 9 repeticiones por parcela.

RESULTADOS

Comparación de labranza reducida con labranza tradicional

Densidad aparente y porosidad

La Da no mostró diferencias en el primer año del ensayo. Con un valor de 1,18 g/cm^3, lo que corresponde a una porosidad total de 55 %, es relativamente baja, lo que facilita las labores de cultivo. Aunque se observó igualmente poca variación en la porosidad total, se presenta una ligera diferencia en la DTP entre los tratamientos (cuadro 2).

LT presentó el mayor porcentaje de poros medianos mientras que LRscv mostró el mínimo. Esta tendencia significaría una reducción de la capacidad de almacenamiento de agua aprovechable con labranza reducida, efecto negativo sumamente importante en esta zona semiárida con extensas épocas de sequía. Para compensar este efecto se necesitaría aumentar la profundidad de rehabilitación.

Conductividad hidráulica

No se observaron diferencias significativas entre los tratamientos en cuanto a la conductividad hidráulica en condición de saturación. La variación de la conductividad hidráulica durante el año muestra una alta conductividad al inicio de la temporada, que se redujo y estabilizó en 3 semanas en 25 cm/d (figura 1). Este valor corresponde al que determinó Baumann (1996) 3 años antes en las mismas parcelas, de 18 cm/d. El aumento de la conductividad al final del año 1995 (figura 2) podría ser provocado por una muerte sucesiva, o más bien por un secado, de las raíces al final de la temporada. La conductividad

en general, aun un valor medio, no basta para un drenaje suficientemente rápido durante las lluvias con intensidades mayores a 10 mm/h, que provocan la mayoría de la erosión en esta zona. El aumento de este parámetro debería ser uno de los objetivos principales de cualquier mejoramiento en el manejo de estos suelos.

	Da (g/cm³)	VTP (% vol.)	Poros gruesos > 50 mm (% vol.)	Poros medianos 50-0,2 mm (% vol.)	Poros finos < 0,2 mm (% vol.)
5 - 10 cm					
LT	1,16	56,3	19,5	22,8	14,0
Lrscv	1,18	55,3	24,0	13,3	18,0
LRccv	1,19	55,2	22,8	17,5	14,9
10 - 20 cm					
LT	1,15	56,6	19,3	21,3	16,0
Lrscv	1,16	56,2	24,9	13,3	18,0
LRccv	1,19	55,2	21,9	17,5	15,9
20 - 30 cm					
LT	1,16	56,4	18,5	21,3	16,6
Lrscv	1,24	56,8	24,6	13,2	19,0
LRccv	1,14	53,4	19,4	17,4	16,6
30 - 40 cm					
LT	1,14	56,9	18,1	22,0	16,8
Lrscv	1,20	57,5	27,3	11,2	19,0
LRccv	1,12	54,7	21,2	16,6	16,9
40 - 50 cm					
LT	1,15	56,5	17,2	22,1	17,2
Lrscv	1,15	51,9	25,5	13,2	13,2
LRccv	1,21	59,1	24,9	16,1	18,1

Cuadro 2 - Densidad aparente y distribución del tamaño de los poros en tres diferentes métodos de labranza, en un tepetate rehabilitado (Santiago Tlalpan, 1995)

Estabilidad de los agregados y distribución de su tamaño

La DTA no mostró diferencias entre los tratamientos (figura 2). Los agregados mayores de 10 mm ocuparon entre el 10 y el 20 % del suelo rehabilitado. Baumann (1996) observó un contenido aún mayor, del 35 %, en las mismas parcelas 3 años antes. Esto muestra claramente la integración de los fragmentos gruesos resultantes de la rehabilitación, a la matriz del suelo gracias a las labores de cultivo, y probablemente también por el cambio a un régimen hídrico más húmedo en comparación con el tepetate desnudo. Esto, tomando en cuenta las observaciones de varios autores (Freebairn *et al.*, 1991; Janeau, 1992), es un efecto positivo, pues reduce la cantidad de material fino generado por estos fragmentos en la superficie durante lluvias intensas, formando costras y sellando la superficie.

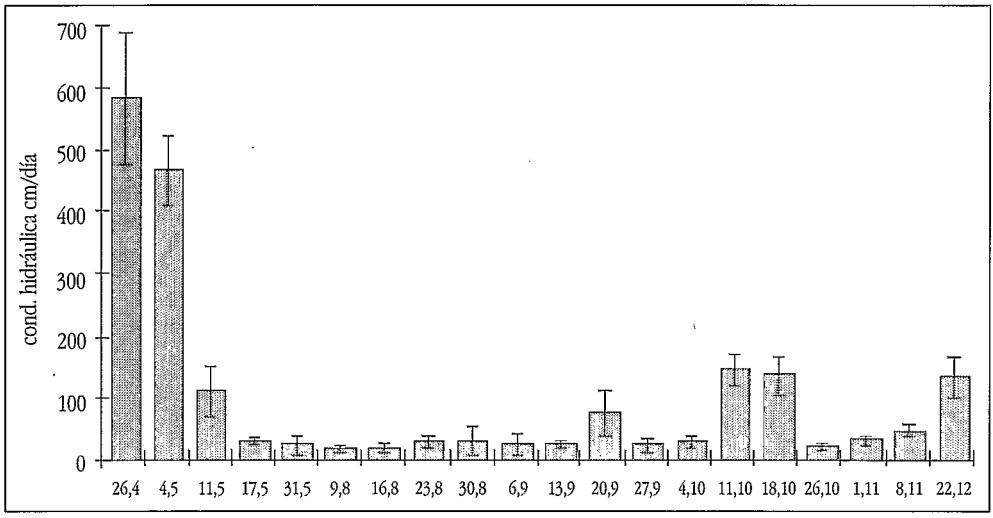


Figura 1 - Desarrollo de la conductividad hidráulica durante el ciclo del cultivo de maíz en tepetate rehabilitado (Santiago Tlalpan, 1995)

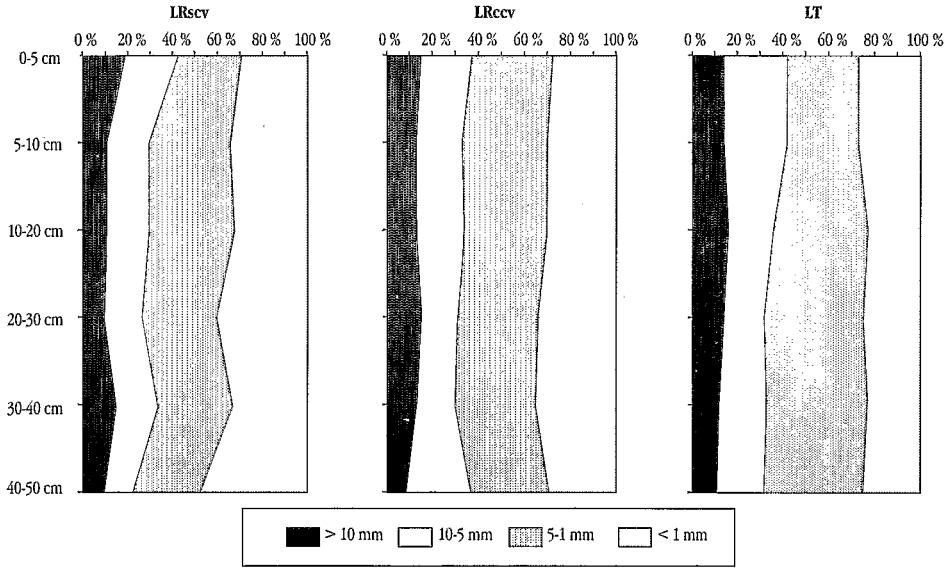


Figura 2 - Distribución del tamaño de agregados con tres diferentes métodos de labranza en un tepetate rehabilitado (Santiago Tlalpan, 1995)

La EA mostró las diferencias más significativas entre los tratamientos (cuadro 3). Además de un aumento general en la estabilidad de los agregados por la profundidad, se observó una alta estabilidad en los primeros 5 cm en el tratamiento LRccv. Obviamente, la cobertura vegetal produce un ambiente óptimo para los microorganismos, que estabilizan la estructura del suelo con sus órganos y exudados. Por cierto, la EA en LT y LRscv aumentó al final de la temporada, pero LRccv mostró la mayor estabilidad. Lamentablemente, el muestreo antes de la temporada se realizó apenas entre 0 a 20 y 20 a 40 cm de profundidad, por lo que no permitió observar las diferencias en la estabilidad de los agregados en la superficie antes de la temporada.

Cuadro 3 - Estabilidad de los agregados* según el método de percolación en tres diferentes métodos de labranza en un tepetate rehabilitado, Santiago Tlalpan, 1995**

*: ml de percolado)
**: expresado en ml de percolado total después de 9 minutos)

	inicio de la temporada[2]	mitad de la temporada	final de la temporada
0 - 5 cm			
LT	n.d.	46 d	81 a
Lrscv	n.d.	50 d	88 a
LRccv	n.d.	164	122 b
5 - 10 cm			
LT	n.d.	80 d	187
Lrscv	n.d.	61 d	83 a
LRccv	n.d.	66 a	97 a
10 - 20 cm			
LT	309	88 d	69a
Lrscv	342	113 c	116 b
LRccv	366	113 c	102 b
20 - 30 cm			
LT	n.d.	129 c	71 a
Lrscv	n.d.	226 b	153
LRccv	n.d.	225 b	289
30 - 40 cm			
LT	282	212 b	77 a
Lrscv	778	389 a	167 b
LRccv	304	211 b	486

Nota: Letras diferentes dentro de una columna indican diferencia significativa P = 5 % (t-test).

1: ¡El muestreo se realizó solamente entre 0 a 20 y 20 a 40 cm de profundidad!

Comparación entre diferentes edades de rehabilitación

Densidad aparente y porosidad

La Da en las parcelas a compararse fue de 1,20 g/cm^3, a excepción de la parcela con 18 años de rehabilitación que presentó una Da de 1,34 g/cm^3 en la parte no trabajada debajo del piso de arado. Este último valor se debe probablemente a la mayor frecuencia de uso de tractores para la ejecución de las labores de cultivo en esta parcela (superior en comparación con la parcela 2 con 19 años de rehabilitación, en la que aún la mayoría de trabajos se realizan con animales). Además, la reducida profundidad actual del horizonte rehabilitado hace a la parcela 1 (30 cm) más propensa a la compactación debida al uso de maquinaria agrícola.

En cuanto a la porosidad, no se observaron diferencias significativas entre las diferentes edades de rehabilitación. Únicamente cabe mencionar que el contenido de poros

gruesos se redujo en las parcelas con mayor edad de rehabilitación. Para la corrección de esta porosidad en función del contenido de fragmentos véase más adelante en DTA.

Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica se redujo y equilibró (reducción de la variación espacial) entre las parcelas con 7 y aquellas con 20 años de rehabilitación. Esto refleja claramente las observaciones sobre la porosidad, de una reducción del contenido de poros gruesos mayor a 120 µm. La conductividad hidráulica en este material se puede fijar en 45 cm/d. La variabilidad entre las mediciones fue mayor en el camellón que en el surco.

Estabilidad de los agregados y distribución de su tamaño

Paralelamente a la determinación de la DTA, se separaron los fragmentos grandes mayores de 2 mm en el horizonte rehabilitado en campo. Este análisis mostró un muy alto contenido de fragmentos grandes. Suponiendo que tienen aún la misma Da que el tepetate inicial, esos fragmentos ocuparon más del 50 % del volumen del horizonte rehabilitado en este sitio. Hay que tomar en cuenta lo anterior para evaluar la porosidad del horizonte: debido al muestreo con cilindros de 100 cm^3 se sobre-representó el material fino del suelo. Para compensar la resultante sobreestimación de los poros del material fino se recomienda la corrección por su contenido volumétrico mediante la siguiente fórmula:

$$P_{real} = P_{mf} * C_{mf} + P_{fr} * C_{fr}$$

en donde:
P = porosidad (% vol.), C = contenido (% vol.), mf = material fino, fr = fragmentos.

La cantidad de estos fragmentos se redujo con la edad de rehabilitación.

La estabilidad de los agregados presentó, contrariamente a lo esperado, una reducción en las parcelas con mayor edad de rehabilitación. La explicación podría estar en la naturaleza del mismo material, que es más endurecido que el de Tlalpan. En la fracción de 1-2 y 2-3 mm se encontró una gran parte de fragmentos casi inalterados, originados en la rehabilitación, es decir en el rompimiento de la matriz endurecida, y no se trata de agregados clásicos formados por la actividad edáfica y microbiológica. Estos fragmentos, expuestos a un régimen hídrico más húmedo del suelo después de la rehabilitación, pierden poco a poco su estabilidad y se transforman primero en material fino y después en nuevos agregados. Este proceso es naturalmente más lento en materiales más endurecidos, por lo que en el sitio de Cuamilpa todavía se enfrenta la primera fase, la de debilitación de los fragmentos. Los fragmentos en las parcelas de mayor edad ya perdieron parte de su estabilidad, pero todavía no están destruidos, mientras que en las parcelas de menor edad están casi inalterados. Esto revela una EA mayor en las parcelas con pocos años de rehabilitación, aunque no es sino el reflejo del endurecimiento del material original. Naturalmente, una EA provocada por fragmentos es menos deseable que una causada por agregados formados biológicamente. Esto indica que el sitio de Cuamilpa, después de 20 años, todavía no ha llegado al estadio estructural que se observó ya en el sitio de Tlalpan después de 6 años. Para la selección de tepetates a rehabilitarse, este aspecto debe jugar un papel importante, ya sea dando preferencia a materiales menos endurecidos para obtener una pronta estabilización estructural, o bien dando un tratamiento especial a materiales más endurecidos, obviamente con un costo mayor de recuperación.

CONCLUSIONES

Después del primer año con diferentes métodos de labranza en un tepetate con 6 años de rehabilitación, no se observaron diferencias significativas en la porosidad y la densidad aparente. La conductividad hidráulica se equilibró en el transcurso de la temporada después de presentar un nivel sumamente alto al inicio (debido a la aradura) de 25 cm/d. La estabilidad de los agregados fue mayor en labranza reducida con cobertura vegetal entre 0 y 5 cm profundidad tanto en la mitad como al final de la temporada de lluvias.

El sitio utilizado para la comparación de la estructura de tepetates rehabilitados con diferentes edades de rehabilitación era un tepetate extremadamente endurecido, por lo que en las parcelas con mayor edad de rehabilitación se detectó todavía un contenido de fragmentos mayores de 2 mm del 50 % (en volumen). Además, se observó una reducción en el contenido de poros gruesos > de 120 µm y una disminución de la estabilidad de los agregados con mayor edad de rehabilitación. Esto último se debe al sucesivo debilitamiento de los fragmentos originados en la matriz endurecida que fue destruida durante la rehabilitación.

De los parámetros estudiados, la estabilidad de los agregados, determinada mediante el método de percolación, resulta ser la más sensible a los cambios estructurales a corto plazo.

Referencias bibliográficas

BAUMANN, J., 1996: *Die Wirkung der Tieflockerung auf Erodierbarkeit und Ertragspotential verhärteter Vulkanascheböden im Staat Tlaxcala/Mexiko*, Boden und Landschaft, Bd. 10, Gießen, 208 p.

BECHER, H.H.; KAINZ, M., 1983: Auswirkungen einer langjährigen Stallmistdüngung auf das Bodengefüge im Lößgebiet bei Straubing, *Zeitschrift für Acker und Pflanzenbau*, 152, p. 152-158.

FREEBAIRN, D.M.; GUPTA, S.C.; RAWLS, W.J., 1991: Influence of Aggregate Size and Microrelief on Development of Surface Crusts, in *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, p. 188-195.

ISSS, 1994: *Transactions of the 15th World Congress of Soil Science, Acapulco, México, July 1994* (Symposium ID-13: Indurated Volcanic Ash Soils, Uses and Management.).

JANEAU, J.-L.; JEROME, G.; MIRANDA M.E., 1992: Evolución estructural de la superficie de suelos con tepetate, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 374-378.

KAY, B.D., 1989: Rates of Change of Soil Structure under Different Cropping Systems, in *Advances in Soil Science*, 12, p. 1-52.

LOZANO, Y.; PLA SENTIS, I., 1994: Calibration of Field Methodology to Evaluate Soil Physical Constraints, in *Transactions of the 15th World Congress of Soil Science. Acapulco, México, July 1994*, Volume 2b (commission: Poster Session), p. 263-264.

PEÑA, D.; ZEBROWSKI, C., 1992: Caracterización física y minerológica de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 156-164.

REYNOLDS, W.D.; ZEBCHUK, W.D.; TOPP, G.C., 1991: Field Measurement of Ksat in a Structured Silty Clay Soil: Comparison of the Guelph Permeameter and Auger Hole Methods, in *Can. J. Soil Sci.*, 71, p. 277-283.

ZEBROWSKI, C.; PRAT, C.; ETCHEVERS, J.; ARIAS, H.; MIRANDA, M. E., 1992: *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, 572 p.

Formación de agregados estables a partir de un duripán del estado de Morelos (México) por parte de especies vegetales perennes en condiciones de invernadero

Alma S. Velásquez R., David Flores R.

Abstract

The differences of water stable aggregates percentages in two levels of duripan fracturation by different perennial plant species were evaluated. The studied plants were Casuarina equisetifolia L., Eucalyptus globulus Labiell, Schinus molle L., Chloris gayana Kunth, Sorghum almum Parodi, *and* Vicia sativa L. *The experiment was done during 6, 12 and 18 months in greenhouse conditions. Results showed that plant species favor the formation of water stable aggregates derived of duripan and contribute to a structuration in the long term.*

Keywords: *México* - Tepetate - *Duripan* - *Aggregate* - *Aggregate Stability* - *Interaction Plant* - Tepetate

INTRODUCCIÓN

El duripán es una capa cementada por sílice, de estructura masiva y casi inerte, que ocasiona numerosos problemas desde el punto de vista agrícola, pecuario y forestal. Este tipo de horizonte es denominado «tepetate» por los campesinos mexicanos. Para incorporar los duripanes a la producción, es importante promover la formación de agregados estables en húmedo (AEH), condición necesaria para lograr la estructuración del suelo y el crecimiento de especies vegetales (Mathur *et al.*, 1989; Flores *et al.*, 1991).

En la susceptibilidad del sustrato a la erosión y la cantidad de poros que persisten en el suelo después de la lluvia y el laboreo, situación esta última que repercute directamente en la distribución del agua y del aire, influyen la distribución y la estabilidad de los agregados. Cuando el material que da origen al suelo se desintegra, el movimiento horizontal de las partículas superficiales puede provocar una obstaculización de los poros. Así, los agregados deben ser estables para mantener las características de los poros aun con los cambios bruscos de humedad y labranza (Utomo y Dexter, 1982).

Los factores que pueden mejorar la estabilidad de los agregados del suelo son aquellos que aumentan su permeabilidad y cohesión y disminuyen la entrada brusca del agua (Reid y Goss, 1981; Dorioz *et al.*, 1993). Aun cuando no existen estudios específicos

sobre estabilidad en tepetates, se ha comprobado que las especies vegetales constituyen uno de los principales factores que favorecen la formación de agregados debido a los efectos físico-químicos del sistema radical en el sustrato y al aporte significativo de materia orgánica que se opera durante su desarrollo (Velásquez *et al.*, 1995).

El objetivo del presente estudio fue evaluar los cambios en las fracciones de agregados estables en húmedo en un duripán del estado de Morelos fragmentado *ex profeso*, al someterlo al efecto de diferentes especies vegetales perennes.

MATERIALES Y MÉTODOS

El duripán empleado en este experimento se recogió en la región sureste del municipio de Tetela del Volcán en el estado de Morelos, México. El material se fragmentó en forma manual y se tamizó, seleccionándose para el estudio un nivel fino y un nivel grueso, el primero constituido por fragmentos menores a 2 mm y el segundo por fragmentos de 2 a 20 mm. El duripán fragmentado se colocó en macetas de plástico sin perforaciones y se establecieron en él tres especies arbóreas —casuarina (Ca), eucalipto (Eu) y pirul (Pi)— y tres herbáceas perennes —pasto Rhodes (Pr), sorgo (Sr) y veza (Ve)—. El material fue tratado con solución nutritiva de Hoagland.

Para evaluar el efecto de los tratamientos se establecieron diferentes controles: un testigo absoluto (TAb) formado solo por el duripán fracturado para evaluar las condiciones originales del material; un testigo sin planta (Ts/p) pero con aporte de agua y solución nutritiva, con el fin de evaluar cambios abióticos. En el caso de las arbóreas se establecieron testigos con las especies indicadas pero sin solución nutritiva (TCa, TEu y TPi), ello para evaluar el efecto de la solución. Los tratamientos se mantuvieron durante 6, 12 y 18 meses en invernadero. El diseño experimental fue un trifactorial con arreglo de los tratamientos completamente al azar. Cada tratamiento se realizó por triplicado. Los factores del modelo fueron especies, nivel de fracturación y etapas, lo que dio como resultado un total de 198 unidades experimentales.

Para evaluar el porcentaje de AEH, se utilizó el método de Kaúrichev (1984), que consiste en pasar 50 g de muestra a través de una columna de tamices, inmersa en agua, con aberturas de 5, 3, 2, 1, 0,5 y 0,25 mm. Los resultados se sometieron a un análisis de varianza y prueba de comparación de medias de Tukey (0,01).

RESULTADOS

La especie vegetal y el nivel inicial de trituración del duripán influyeron significativamente en el porcentaje de AEH de todos los tamaños de fracciones. Sin embargo, el tiempo de permanencia de las especies no incidió en los agregados del intervalo 0,5 a 3,0 mm. La interacción especie-tiempo no influyó en los porcentajes de agregados menores a 0,25 mm y el nivel inicial de fracturación-tiempo no tuvo efecto significativo en la proporción de agregados menores a 0,25 ni en la de aquellos de 3,0 a 5,0 mm. No obstante, la interacción de los tres factores fue altamente significativa en todos los tamaños de agregados.

Nivel de fracturación fina

Las especies arbóreas tuvieron un efecto similar en las fracciones AEH en las tres etapas (6, 12, 18 meses). Como un ejemplo de dicho efecto se presenta el caso del eucalipto (figuras 1 y 2). El porcentaje de AEH menores a 0,25 mm disminuyó significativamente con respecto al TAb pero fue estadísticamente igual al de los Ts/p; los menores porcentajes de

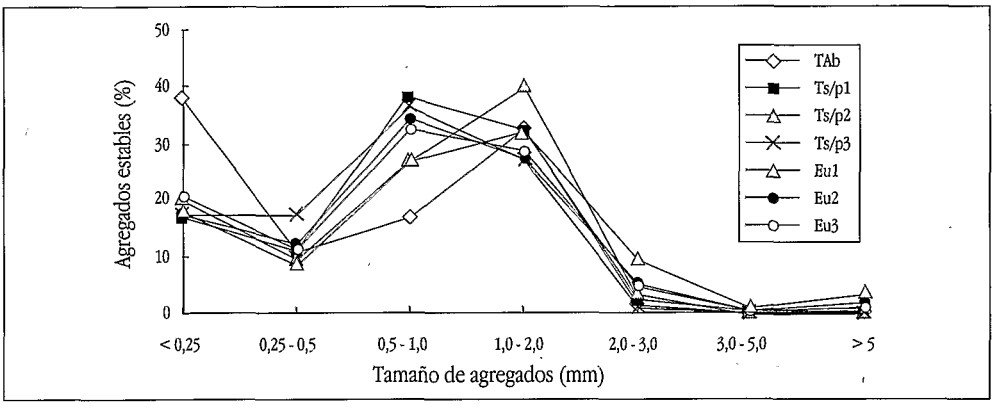


Figura 1 - Efecto del eucalipto y los testigos sin planta en el porcentaje de AEH en el nivel de fracturación fina del duripán, después de 6, 12 y 18 meses de observación

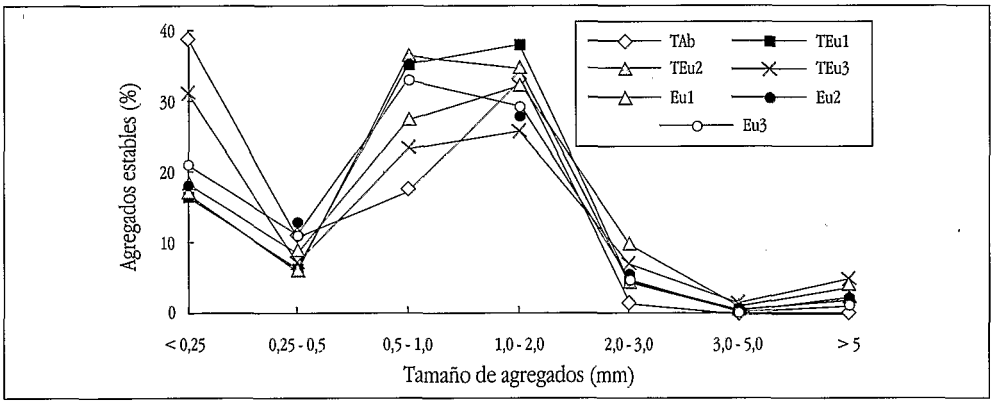


Figura 2 - Efecto del eucalipto con y sin aplicación de solución nutritiva en el porcentaje de AEH en el nivel de fracturación fina del duripán, después de 6, 12 y 18 meses de observación

esta fracción se presentaron en los tratamientos con planta durante las dos primeras etapas, pero se incrementaron en la tercera. En todas las etapas, los tratamientos que no recibieron solución nutritiva presentaron porcentajes mayores de AEH que los que la recibieron. En general, el mayor porcentaje de AEH se registró a los 6 meses y el menor a los 18, aunque las diferencias entre ambos periodos no fueron estadísticamente significativas.

En el nivel de agregados de 0,25 a 1 mm, se presentó un incremento de la estabilidad de los mismos en todos los tratamientos en comparación con el TAb y el Ts/p pero las diferencias no fueron estadísticamente significativas. Los porcentajes de esta fracción se incrementaron al aumentar el tiempo de permanencia de las especies en el duripán. Durante los 12 primeros meses, se presentaron mayores porcentajes de AEH cuando no se aplicó solución, pero esta situación se revirtió a los 18 meses con solución. En la fracción con tamaño de 1 a 2 mm no se presentaron cambios con respecto al TAb. Hubo únicamente

disminución de los porcentajes de la misma durante los 6 primeros meses cuando no se aplicó solución.

En todos los tratamientos, la proporción de agregados mayores a 2 mm fue numéricamente mayor que en el TAb, pero las diferencias entre tratamientos no fueron estadísticamente significativas. Los mayores porcentajes se presentaron durante la primera etapa. Cabe señalar que el material original no contenía agregados de este tamaño puesto que estaba constituido por fragmentos menores a 2 mm, de tal manera que su presencia se debe a los procesos de agregación que se llevaron a cabo en el duripán, por efectos tanto físico-químicos como biológicos, principalmente estos últimos. Los mayores porcentajes de esta fracción se obtuvieron en los tratamientos con influencia de las plantas. La proporción de fragmentos de 3,0 a 5,0 mm no fue alterada por ninguno de los tratamientos ni por el tiempo.

El eucalipto fue la especie arbórea con la que se obtuvieron los mayores porcentajes de AEH, pero las diferencias con respecto a las otras dos especies no fueron significativas.

Las herbáceas presentaron el mismo comportamiento general descrito para las arbóreas (figura 3). La disminución del porcentaje de AEH de la fracción de 0,25 mm con respecto al TAb, fue estadísticamente equivalente entre tratamientos. Los más altos porcentajes de ella se presentaron a los 12 meses. Solo en el caso del sorgo, el mayor porcentaje se presentó en la tercera etapa. Los porcentajes de AEH menores a 0,2 mm de los Ts/p fueron más elevados que los de los tratamientos con plantas durante la primera etapa, pero a los 12 y 18 meses, los resultados se invirtieron.

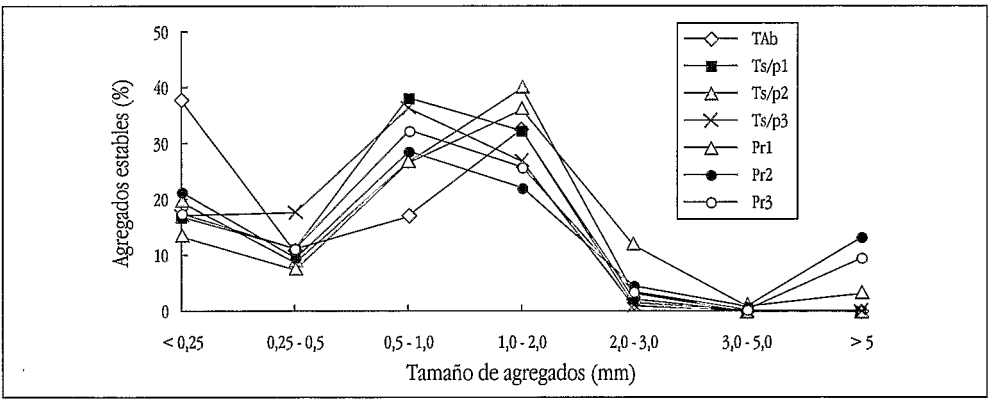


Figura 3 - Efecto del pasto Rhodes y los testigos sin planta en el porcentaje de AEH en el nivel de fracturación fina del duripán, después de 6, 8 y 12 meses de observación

La fracción 0,25 a 2,0 mm presentó un aumento en el porcentaje de AEH con las tres especies pero los Ts/p registraron porcentajes incluso mayores. La proporción de agregados de 1 a 2 mm, aunque varió, no registró cambios significativos con respecto al TAb en ninguno de los tratamientos, a excepción del pasto Rhodes, con el que se obtuvieron los porcentajes más elevados durante la primera etapa y los más bajos en la tercera.

Los mayores porcentajes de agregados de más de 2 mm se obtuvieron con el pasto Rhodes durante la segunda etapa y con sorgo en la tercera. En el tratamiento con veza

no se presentaron diferencias ni entre etapas ni entre tratamientos y casi no hubo AEH superiores a 2 mm. Se observó únicamente un ligero efecto en el nivel de 2 a 3 mm durante los primeros 6 meses. No hubo cambio en los fragmentos de 3 a 5 mm con ninguna de las especies. El pasto Rhodes fue la especie que presentó mayor efecto en la formación de AEH en el duripán.

Nivel de fracturación gruesa

Los tratamientos con especies arbóreas (figuras 4 y 5) presentaron un incremento en el porcentaje de AEH menores a 0,25 mm con respecto al TAb, el mismo que no contenía fragmentos de ese tamaño por estar constituido únicamente de fragmentos de 2 a 20 mm. Los Ts/p no presentaron diferencias significativas con respecto al TAb, ni con los tratamientos, pero en todos los casos, los porcentajes de esta fracción de agregados fueron inferiores. Los tratamientos sin aporte de solución nutritiva tenían mayor proporción de agregados que Ts/p, pero menor que los tratamientos en los que se aplicó solución nutritiva, con excepción del tratamiento pirul sin solución que presentó porcentajes mayores desde la segunda etapa.

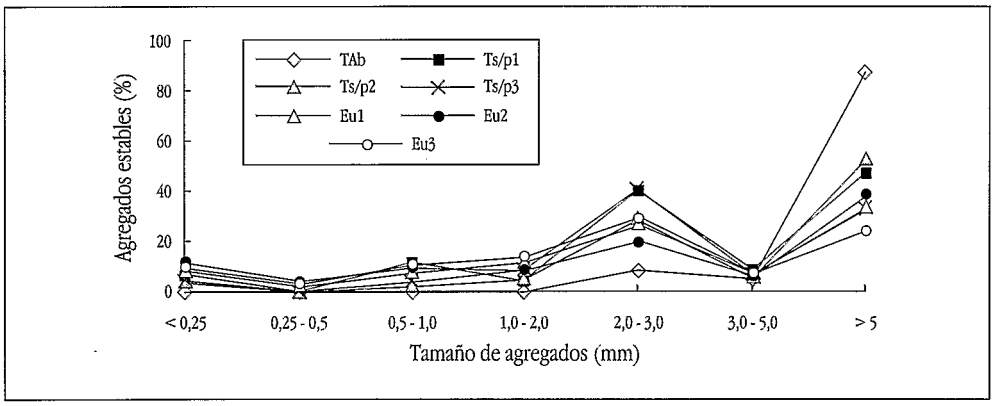


Figura 4 - Efecto del eucalipto y los testigos sin planta en el porcentaje de AEH en el nivel de fracturación gruesa del duripán, después de 6, 8 y 12 meses de observación

En los agregados de 0,25 a 3,0 mm, se observó un incremento en el porcentaje de AEH con respecto al TAb. Todos los tratamientos con y sin solución registraron porcentajes mayores de agregados estables que el Ts/p, desde la primera etapa. En el caso de la casuarina, el efecto fue contrario durante los primeros 12 meses. Al comparar los tratamientos con solución y aquellos en que no se la aplicó, se observó que estos últimos presentaron menor estabilidad. En el tratamiento con pirul sin solución, la proporción de AEH fue mayor que en el tratamiento con solución en la tercera etapa en las fracciones de 0,25 a 2 mm. No se presentó cambio en los fragmentos de 3 a 5 mm con respecto al TAb con ninguno de los tratamientos.

Los agregados de 5 mm disminuyeron con respecto al TAb en todos los tratamientos. Los mayores porcentajes de AEH se presentaron en los Ts/p. Al comparar los tratamientos con solución nutritiva y aquellos en los que no se la aplicó, se observó que estos

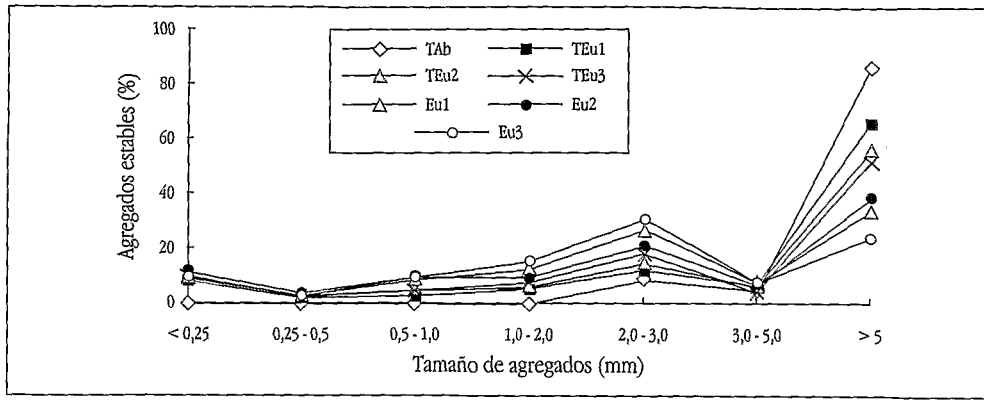


Figura 5 - Efecto del eucalipto con y sin aplicación de solución en el porcentaje de AEH en el nivel de fracturación gruesa del duripán, después de 6, 8 y 12 meses de observación

últimos presentaron porcentajes más altos de agregados o partículas. Los menores porcentajes de estos se obtuvieron en la tercera etapa con casuarina y eucalipto, y en la primera con pirul.

En el nivel de fracturación gruesa (figura 6), los tratamientos con herbáceas al igual que aquellos con arbóreas, mostraron un incremento en los porcentajes de AEH de la fracción menor a 0,25 mm, un aumento de la fracción 0,25 a 3 mm, ningún cambio en las de 3 a 5 mm y una disminución significativa en el de los agregados mayores a 5 mm, con respecto al TAb. En las fracciones menores a 2 mm, los mayores porcentajes de AEH correspondieron a los tratamientos con planta, pero en los tamaños mayores fueron los Ts/p los que presentaron valores superiores. En ninguno de los casos las diferencias fueron estadísticamente significativas, ni entre tratamientos ni entre etapas.

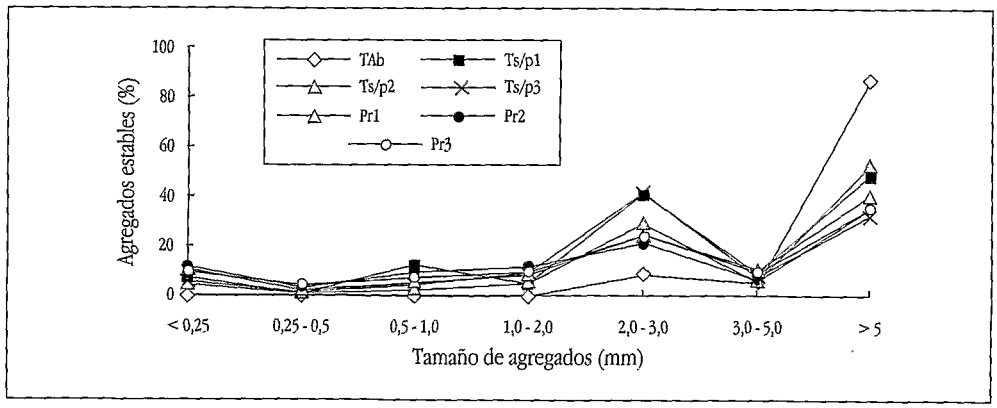


Figura 6 - Efecto del pasto Rhodes y los testigos sin planta en el porcentaje de AEH en el nivel de fracturación grueso del duripán, después de 6, 8 y 12 meses de observación

DISCUSIÓN

El comportamiento del duripán difiere con el descrito en otros trabajos debido a que se trata de una capa fuertemente cementada por sílice, con estructura masiva que le confiere características diferentes a las de un suelo. El material, antes de aplicársele los tratamientos, estaba constituido por fragmentos y no por agregados, de manera que los resultados fueron interpretados en función de tal característica. La disminución de los agregados menores a 0,25 y de 1 a 2 mm en el material fino y de los mayores a 5 mm en el material grueso, con respecto al TAb, pudo deberse a que los fragmentos del duripán, por estar cementados, presentaron mayor estabilidad que en los tratamientos en donde se llevaron a cabo procesos que dieron lugar a la formación de AEH. En el testigo sin planta, la agregación y disgregación fueron resultado, principalmente, de factores abióticos como las fuerzas de cohesión, los ciclos de humedecimiento y secado, los cementantes inorgánicos, entre otros (Utomo y Dexter, 1982; Singer *et al.*, 1992). Sin embargo, predominan los fragmentos, lo que explica los mayores porcentajes de AEH con respecto a los tratamientos en los que existe además un efecto biológico y que, en consecuencia, presentan mayor cantidad de agregados.

Los mayores porcentajes de AEH en los tratamientos con especies arbóreas sin aporte de solución con respecto a los que sí la recibieron, pudieron deberse a una menor cantidad de agregados formados. La solución favoreció el desarrollo y la actividad fisiológica de la planta, con lo que se acentuó la producción de cementantes orgánicos, el aporte de materia orgánica y los efectos de agregación y disgregación mecánica por crecimiento radical y empaquetamiento, de modo que hubo menos agregados en los tratamientos sin solución.

La estabilidad de los agregados fue menor que la de los fragmentos debido a sus características. Los fragmentos se encuentran fuertemente cementados por sílice, lo que los hace resistentes al agua. Los agregados en cambio son partículas o fracciones unidas por fuerzas físico-químicas y cementantes biológicos como los mucílagos, ceras, gomas y resinas secretados por raíces, bacterias y hongos, o bien, resultado de su descomposición, como en el caso de las sustancias húmicas. Consecuentemente, su resistencia es menor ya que se trata de compuestos susceptibles de ser degradados, lavados o descompuestos, sobre todo durante sus primeras etapas de formación (Reid y Goss, 1981; Dorioz *et al.*, 1993; Tisdall, 1994).

De acuerdo a lo anterior, la menor cantidad de AEH del tepetate sometido al efecto de las especies vegetales en comparación con los testigos, no indica un efecto poco favorable de las plantas en el material, sino que reafirma la existencia a largo plazo de procesos de estructuración en el duripán, lo que se confirma con el incremento de los AEH obtenidos en las fracciones de agregados mayores a 0,5 mm (fino) y menores a 5 mm (grueso), con respecto al TAb, particularmente a los 18 meses.

El hecho de que no existiesen cambios en los fragmentos de 3 a 5 mm con ningún tratamiento, es una indicación de que puede tratarse de fragmentos y/o agregados muy estables, lo que coincide con lo observado en otros trabajos (Velásquez *et al.*, 1995) y resulta importante pues es un tamaño de partículas que permitiría un buen intercambio gaseoso, filtración y retención de agua, una menor compactación y recementación por sílice, el establecimiento de la biota edáfica y un buen desarrollo vegetal.

CONCLUSIONES

1. En el nivel de fracturación fino del duripán hubo disminución de los fragmentos menores a 0,25 mm con todas las especies y formación de agregados estables en los niveles superiores.

2. En el nivel de fracturación gruesa, hubo, con todas las especies, una disminución de los fragmentos mayores a 5 mm y una formación de agregados estables en los niveles inferiores.
3. Los fragmentos de 3,0 a 5,0 mm presentaron la mayor estabilidad en los dos niveles de fracturación del duripán.
4. Al aumentar el tiempo de permanencia de las especies en el duripán, se incrementa el porcentaje de agregados estables en los dos niveles de fracturación.
5. En el duripán, los factores bióticos favorecen la formación de agregados estables con mayor intensidad que los abióticos.
6. El eucalipto y el pasto Rhodes fueron las especies con mayor influencia en la formación de agregados estables.

Referencias bibliográficas

DORIOZ, J. M.; ROBERT, M.; CHENU, C., 1993: The Role of Roots, Fungi and Bacteria on Clay Particle Organization. An Experimental Approach, in *Geoderma*, 56, 179-194.

FLORES R., D.; GONZÁLEZ V., A.; ALCALÁ M., J. R.; GAMA C., J. E., 1991: Los tepetates, en *Revista de Geografía*, 3 (4), p. 37-41.

KAURICHEV, S.; N. P., PANOV, M. V.; GRECHIN, I. P., 1984: *Prácticas de Edafología*, Ed. Mir., Moscú.

MATHUR, S. P.; LEVESQUE, M; SANDERSON, R. B., 1989: The Influence of Soil Properties, Total Cooper, Iron, Manganese and Zinc on the Yields of Oats, Carrots, Onions y Lettuce, in *Comm. Plant Soil Anal.*, 20, p. 1.809-1.820.

REID, J. B.; . GOSS, M. J., 1981: Effect of Living Roots of Different Plant Species on the Aggregate Stability of Two Arable Soils, in *Journal of Soil Science*, 32, p. 521-541.

SINGER, M. J.; SOUTHARD, R. J.; WARRINGTON, D. N.; JANITZHKY, P., 1992: Stability of Synthetic Sand-Clay Aggregates after Wetting and Drying Cycles, in *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, p. 1.843-1.848.

TISDALL, J. M., 1994: Possible Role of Soil Microorganisms in Aggregation in Ssoils, in *Plants and Soil*, 159, p. 115-121.

UTOMO, W. H.; DEXTERA, R., 1982: Changes in Soils Aggregate Water Stability Induced by Wetting and Drying Cycles in non Saturated Soil, in *Journal of Soil Science*, 33, p. 623-637.

VELÁSQUEZ R., A. S.; ACEVEDO S., O. A.; FLORES R., D., 1995: Efecto de diferentes cultivos sobre la disgregación y agregación de tepetates del estado de Morelos en condiciones de invernadero, en *Simposio Universitario de Edafología*, C. N. García y R. M. Ramírez G. (editores), Facultad de Ciencias, UNAM, p. 131-132.

Efecto de especies vegetales en la agregación y disgregación en dos tipos de tepetate del estado de México, en condiciones de invernadero

Otilio A. Acevedo S., David Flores R.

Abstract

The response of three plant species and two nutrimental sources in the aggregation of two types of duripans (white and yellow) in two cutting stages was evaluated. Psidium guajava *increased the number of aggregates in the first months of establishment and diminished it when the time was over.* Chloris gayana *favored micro- and macro aggregation in the second stage.* Leucaena esculenta *had a stable behavior in aggregate formation in all treatments.*

Hen manure increased the aggregation in relation to cow manure and the nutritive solution did not directly influence the aggregation-disaggregation processes.

Keywords : Tepetate - *Aggregation - Disaggregation - Organic Matter - Mexico*

INTRODUCCIÓN

La cuenca de México tiene una superficie de 9.600 km^2 y es una de las zonas más pobladas del país, lo que ha ocasionado que las áreas agrícolas se extiendan hacia las laderas. Estas se caracterizan por suelos delgados, cuya capa fértil se pierde con gran facilidad por un mal manejo, aflorando una costra endurecida denominada «tepetate» por los campesinos. Así, tales zonas son abandonadas por su baja productividad y se desarrolla una migración que abre nuevas áreas agrícolas, repitiéndose el proceso anterior.

Actualmente se están llevando a cabo proyectos para la recuperación de las áreas degradadas a fin de incorporarlas nuevamente al proceso productivo tanto forestal y agrícola como pecuario. Hasta la fecha se han obtenido buenos resultados, como lo reportan Camargo *et al.* (1987), Ortíz *et al.*, (1992), Etchevers *et al.*, (1992), Márquez *et al.* (1992) entre otros. Estos concuerdan en que la roturación del tepetate, la rotación de cultivos, el uso de abonos orgánicos y químicos y el empleo de microorganismos, han incrementado la productividad en los tepetates y a la vez han mejorado sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

La agregación del suelo es un fenómeno dinámico que se relaciona con la retención y el movimiento del agua en él, el intercambio gaseoso, las propiedades mecánicas, la buena germinación de las semillas, el desarrollo radical, la compactación y la erosión.

La formación de agregados del suelo depende de la naturaleza y contenido de materia orgánica, del contenido de arena, limos y arcilla, de la naturaleza de los minerales arcillosos, de la población microbiana y su actividad, y en menor grado, de factores abióticos (Dinel *et al.*, 1991).

Bathke *et al.*, (1992) mencionan que las propiedades físicas del suelo pueden ser manipuladas mediante métodos mecánicos, químicos y biológicos a fin de crear un medio adecuado para el crecimiento de las plantas. Aunque las prácticas de modificación de suelos han sido utilizadas por siglos, no se han estudiado suficientemente los efectos específicos de dichas prácticas en las propiedades del suelo y mucho menos en los tepetates.

El objetivo de la presente investigación fue observar el efecto que tienen tres especies vegetales y dos fuentes nutrimentales en la agregación y disgregación de dos tipos de tepetate en condiciones de invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se realizó en condiciones de invernadero. Se utilizaron dos tipos de tepetate, blanco y amarillo, recogidos en el estado de México, en los municipios de Tepotzotlán y Nicolás de Romero, respectivamente. Ambos materiales se fracturaron manualmente y se pasaron a través de una malla de 12 mm reteniéndose en una de 2 mm; el resto se descartó. Los fragmentos obtenidos se colocaron en macetas de plástico sin perforación, con una capacidad de 6 kg. Simultáneamente, se agregó estiércol de bovino y de gallina (gallinaza) en una cantidad de 50 t/ha. Los materiales se analizaron física y químicamente con los métodos propuestos por el Soil Survey Staff (1984). Los óxidos totales se midieron con el procedimiento de Jackson (1970) y los óxidos libres SiO_2, Al_2O_3 y Fe_2O_3, con el de Mehra y Jackson (1960). El análisis mineralógico en la fracción arcilla se realizó por difracción de rayos X.

Las especies vegetales seleccionadas para la investigación fueron pasto Rhodes (*Chloris gayana* Kunth.), huaje rojo (*Leucaena esculenta* M et S ex A. DC. Benth) y guayaba (*Psidium guajava* L. Var. China).

Una vez establecido el experimento, se aplicó solución nutritiva de Hoagland (Renningsfeld *et al.*, 1980) en los tratamientos que así lo requerían, a intervalos de 15 días y durante un año. Entre cada aplicación se agregó agua de acuerdo a las necesidades hídricas de cada especie al igual que en el resto de las macetas.

El experimento se evalúo en dos etapas: la primera, a los 6 meses, y la segunda, a los 12 meses. Después de la cosecha final, se tomó, de cada maceta, una muestra representativa de 200 g del material y se realizó un análisis de agregados mediante la técnica de Sávvinov (citado por Kaúrichev *et al.*, 1980), método en seco, en el que se utiliza una columna de mallas con aperturas de 12, 10, 7, 5, 3, 2, 1, 0,5 y 0,25 mm. Se determinó el porcentaje de agregados obtenidos en cada una de las mallas. En el presente trabajo se presentan únicamente los agregados mayores a 12 mm y menores a 2 mm.

Se empleó un diseño experimental pentafactorial con un arreglo de los tratamientos completamente al azar y tres repeticiones, con un total de 288 unidades experimentales. Los factores estudiados fueron: a) especies vegetales; b) tepetate blanco y amarillo; c) solución nutritiva; d) estiércol de bovino y gallina; e) dos períodos de corte (6 y 12 meses).

Los resultados obtenidos se procesaron estadísticamente utilizando el análisis de varianza pentafactorial para evaluar el efecto de cada uno de los factores. En los casos en que hubo significancia, se realizó la prueba de Tukey (0,01) para determinar las diferencias de las medias entre los tratamientos.

RESULTADOS

Las características químicas y físicas de cada uno de los tepetates fueron las siguientes: en el tepetate blanco (TB), la densidad aparente (DA) fue de 1,17 g/cm^3; la densidad real (DR), de 1,91 g/cm^3; la porosidad total, del 38,7 %; la textura migajón arcilloso; el pH en agua en relación 1 : 2,5, de 9,1 y en fluoruro de sodio 1:50, de 9,5; las bases intercambiables Ca, Mg, Na y K, de 8,0, 8,0, 2,63 y 0,12 meq/100g, respectivamente; la capacidad de intercambio catiónico (CIC), de 50,5 meq/100g; la relación arcilla-CIC, de 0,71; la materia orgánica, del 0,3 %; el N, del 0,03 %; el P, de 0,05 ppm.

Las características del tepetate amarillo (TA) fueron: DA, 2,10 g/cm^3; DR, 2,19 g/cm^3; porosidad, 4,1 %; en los cationes intercambiables predomina el Na Mg; el pH en agua en relación 1 : 2,5 fue de 7,4; la CIC, de 17,3 meq/100g; la materia orgánica, del 0,2 %; el N, del 0,01 %; el P, de 0,05 ppm.

Los óxidos totales fueron:

- para TB: SiO_2 = 83 %, Al_2O_3 = 17,17 %, Fe_2O_3 = 2,85 %;
- para TA: SiO_2 = 60 %, Al_2O_3 = 4,14 % Fe_2O_3 = 1,25 %

Los óxidos libres alcanzaron:

- para TB: SiO_2: = 0,13 %, Al_2O_3 = 0,01 %, Fe_2O_3 = 0,05 %;
- para TA: SiO_2 = 0,14 %, Al_2O_3 = 0,07 %, Fe_2O_3 = 0,77 %.

El análisis mineralógico mostró que en TB había presencia de cristobalita, montmorillonita y material amorfo, y en TA se encuentra haloisita, montmorillonita, cristobalita, plagioclasa y mica. Tales minerales coinciden, en general, con lo reportado por otros autores.

En las figuras 1 y 2 se presenta el porcentaje de agregados mayores a 12 mm en el tepetate blanco y amarillo, respectivamente. Las especies vegetales tienen la capacidad de formar agregados de este tamaño. La acción del pasto Rhodes sobresale significativamente a los 12 meses en el tepetate blanco, cuando se le adicionó estiércol de gallina y solución nutritiva (GS). En el tepetate amarillo, es la guayaba la que incrementa el número de agregados mayores a 12 mm en los primeros 6 meses al aplicar estiércol de gallina y solución nutritiva, decreciendo este porcentaje a los doce meses.

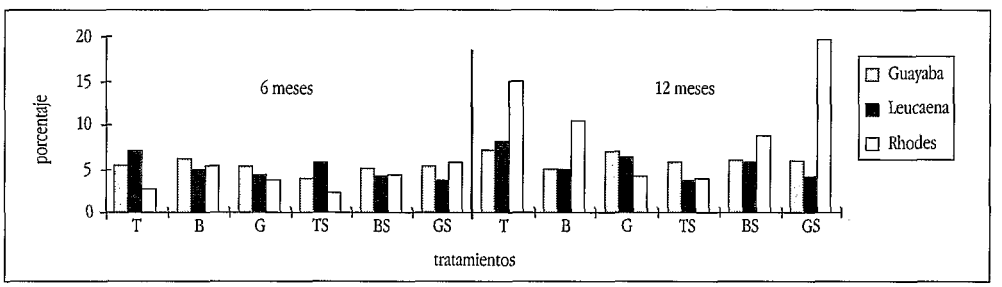


Figura 1 - Agregados mayores a 12 mm (tepetate blanco)

Las figuras 3 y 4 presentan los porcentajes de agregados menores a 0,25 mm. En ambos materiales se observó un incremento de microagregados de este tamaño entre la primera y la segunda etapas. En el tepetate blanco, el pasto Rhodes presentó la mayor capacidad de formación de microagregados cuando se agregó únicamente la solución nutritiva (TS). Le

siguió en importancia el huaje rojo. En la guayaba no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos. En el tepetate amarillo, la guayaba incrementó el porcentaje de microagregados al agregar estiércol de gallina, manteniéndose este incremento en ambas etapas.

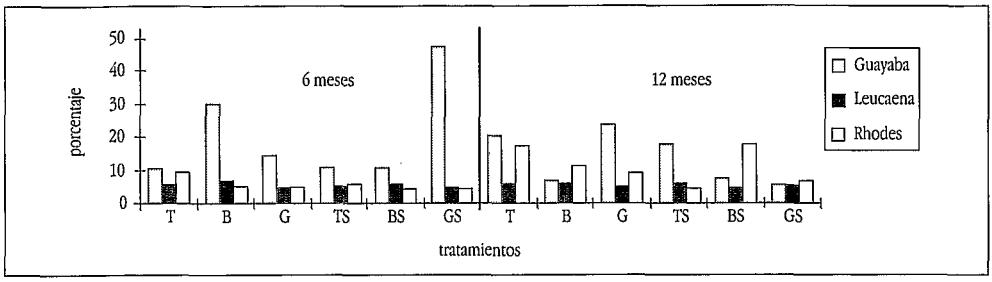


Figura 2 - Agregados mayores a 12 mm (tepetate amarillo)

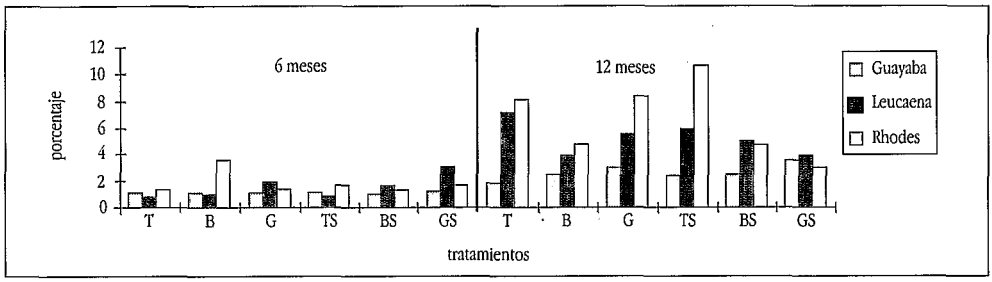


Figura 3 - Agregados menores a 0,25 mm (tepetate blanco)

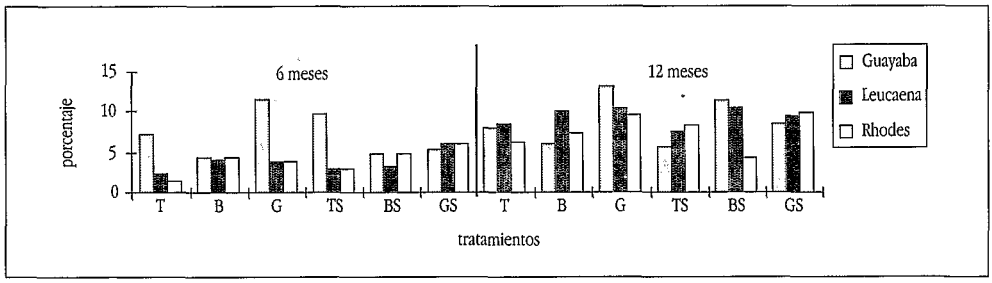


Figura 4 - Agregados menores a 0,25 mm (tepetate amarillo)

En el intervalo 0,25 a 2 mm, se observó un incremento en el porcentaje de agregados de este tamaño en ambos tepetates, entre los 6 y 12 meses, con todas las especies. El pasto Rhodes promovió más agregación (figuras 5 y 6) cuando se agregó estiércol de gallina o solución nutritiva.

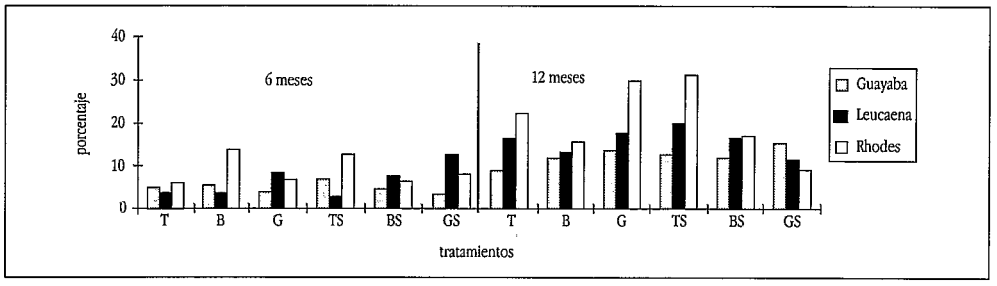


Figura 5 - Agregados de 0,25 a 2 mm (tepetate blanco)

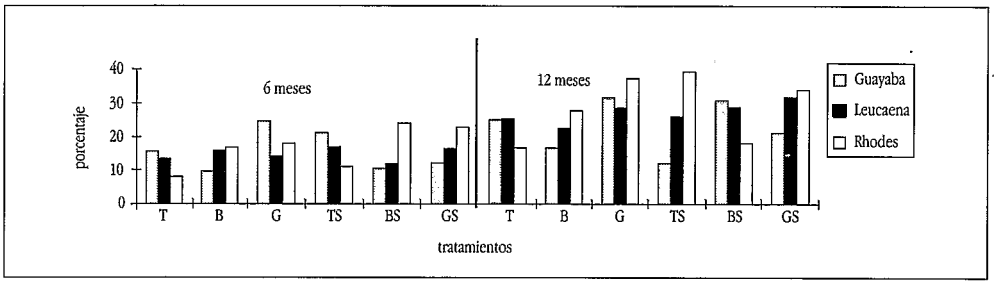


Figura 6 - Agregados de 0,25 a 2 mm (tepetate amarillo)

En el tepetate amarillo, la guayaba tuvo la capacidad de provocar agregación en los primeros seis meses posteriores a la adición de estiércol de gallina (figuras 2, 4 y 6). Los porcentajes de la fracción 0,25 a 2 mm disminuyeron con el paso del tiempo. En el tepetate blanco, el pasto Rhodes fue la especie que promovió en mayor grado la micro y macroagregación en la segunda etapa (figuras 1, 3 y 5).

El huaje rojo presentó un comportamiento estable en la macro y microagregación en los diferentes tratamientos y, en varios casos, el testigo presentó mayores porcentajes de agregados de ese tamaño que cuando se aplicó estiércol y solución nutritiva. Se considera que esta especie es una planta rústica que se establece con facilidad en condiciones adversas de suelo (Cruz *et al.*, 1994).

INTERPRETACIÓN Y CONCLUSIONES

Reid y Goss (1981) observaron que algunas especies vegetales tienen la capacidad de agregar y disgregar partículas del suelo, fenómeno que está asociado a la producción de materiales orgánicos en la rizósfera. Según estos autores, el crecimiento y actividad de las raíces es un factor que controla eficientemente la dirección y magnitud de los cambios en la estabilidad de los agregados en el suelo. En la presente investigación, las tres especies vegetales presentaron la capacidad de agregar y disgregar los fragmentos de ambos tepetates. Al inicio, se contaba con fragmentos de 2 a 12 mm y al finalizar se encontraron agregados mayores a 12 mm y menores a 2 mm.

Estos resultados son consecuencia de los procesos físico-químicos y biológicos que sufren los materiales, procesos tales como la hidrólisis, atracciones electroquímicas, crecimiento

radical, secreción de productos mucilaginosos por parte de las raíces, biota en general y presencia de materia orgánica, entre otros (Dorioz *et al.*, 1993; Perfect *et al.*, 1990).

La guayaba promovió la agregación en el primer semestre, lo que se atribuyó a los mecanismos de aclimatación del sistema radical, a condiciones desfavorables del suelo, a su rusticidad y hábito de crecimiento radical. Asimismo, se considera que es una especie que libera probablemente, a través de la raíz, sustancias orgánicas en mayor cantidad al inicio de su establecimiento, favoreciendo así la agregación (Reid y Goss, 1981).

El pasto Rhodes promovió en ambos tepetates un incremento del porcentaje de agregados directamente proporcional al tiempo. Estos resultados coinciden con los reportados por Perfect *et al.* (1990), quienes mencionan que la cantidad de agregados aumenta exponencialmente con el tiempo al emplear forrajes.

La influencia de las especies vegetales en la agregación y disgregación de los tepetates puede considerarse como una función de la actividad de su sistema radical (densidad y grosor de la raíz, nivel de proliferación radical), de la densidad y continuidad de la superficie cubierta, así como del tipo y contenido de materia orgánica y de biota del suelo. La materia orgánica, además de ser la principal fuente de nutrimento para las plantas, influye en la estructuración del tepetate a través de sus efectos en los procesos de agregación.

En el presente estudio, el estiércol de gallina favoreció una mayor agregación que el estiércol de bovino, en ambos tipos de tepetate. Este comportamiento se atribuyó a que el estiércol de gallina tenía una mayor cantidad de elementos, entre los cuales el Ca y otros cationes bivalentes actúan como puente de unión entre las moléculas minerales y orgánicas, incrementando así la formación de complejos organo-minerales que dan como resultado una mayor agregación.

El efecto positivo de la solución nutritiva se explicaría porque esta proporciona nutrimentos a las especies vegetales, lo que favorece su desarrollo y con ello la interacción con el tepetate, sin promover necesariamente la formación de agregados.

Los cambios en la agregación y la disgregación fueron mayores en el tepetate amarillo que en el blanco. El primero es más susceptible a la alteración por procesos físico-químicos y biológicos, lo que se explica por tratarse de un material menos duro. En contraste, el tepetate blanco es producto de manifestaciones volcánicas más recientes y se considera que no ha estado expuesto a fuertes procesos de alteración. Sus características están estrechamente relacionadas con los factores climáticos actuales (Flores *et al.*, 1995).

CONCLUSIONES

- Las tres especies vegetales juegan un papel predominante en la agregación y disgregación de ambos tepetates.
- Los agregados menores a 2 mm son el resultado de las fracciones residuales de los fragmentos mayores y/o su reorganización.
- La planta de guayaba se caracteriza por promover la agregación en las primeras etapas.
- El pasto Rhodes es la especie que contribuye en mayor medida en los procesos de agregación y disgregación en los dos tepetates.
- El huaje rojo presenta un ligero efecto en la agregación y disgregación en ambos tepetates.
- El estiércol de gallina promueve una mayor agregación en relación al de bovino.
- No se constata un efecto directo de la solución nutritiva en los procesos de agregación -disgregación.
- El tepetate amarillo es más susceptible a los procesos de agregación y disgregación.

Referencias bibliográficas

BATHKE, G. R.; CASSEL, D. K.; AERGROVE, W. L.; PORTER, P. M., 1992: Modification of Soil Physical Propierties and Root Growth Response, in *Soil Science*, 154, p. 316-329.

CAMARGO, R. E.; ACOSTA, I. G., 1987: Roturación y trituración de tepetate en el valle del Mezquital, su efecto en la agricultura bajo condiciones de riego, in *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*, J. F. Ruiz F. (editor), Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México, p. 143-155.

CRUZ C., R.; FLORES R., D.; SÁNCHEZ C., S., 1993: Forage Production with Non-Conventional Species in Shallow, Stony Soils. Effect of Fertilization and Cutting on Yield and Raw Protein Content of Three Leguminous Species, in *An. Esc. Nac. Cienc. Biol.*, México, 38, p. 17-36.

DINEL, H.; MEHUYS, G. R.; LEVESQUE, M., 1991: Influence of Humic and Fabrics Materials on the Aggegation and Aggregate Stability of a Lacustrine Silty Clay, in *Soil Science*, 151, p. 146-158.

DORIOZ, J. M.; ROBERT, M.; CHENU, C., 1993: The Role of Roots, Fungi and Bacteria on Clay Particle Organization. An Experimental Approach, in *Geoderma*, 56, 179-194.

ETCHEVERS, J.; CRUZ, J.; MARES J.; ZEBROWSKI, C., 1992: Fertilidad de los tepetates. I. Fertilidad actual y potencial de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada (México), en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 379-384

FLORES R., D.; ALCALA M., J. R.; GONZALEZ V., A.; GAMA C., J. E., 1995: Duripans in Subtropical and Temperate Subhumid Climate in the Transmexican Volcanic Belt, in *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13, p. 228-239.

JACKSON, M. L., 1970: *Análisis químico de suelos*, segunda edición, Omega, Barcelona, España, 662 p.

KAURICHEV, I. S.; PANOV, N. P.; STRATONOVICH, M. U.; GRECHIN, I.P., 1980: *Prácticas de Edafología*, Mir, Moscú, Rusia.

MÁRQUEZ R., A.; ZEBROWSKI, C.; NAVARRO, H., 1992: Alternativas agronómicas para la recuperación de tepetates, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 465-473.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L., 1960: Iron Oxide Removal from Soil and Clays by a Dithionite-Citrate System Buffered with Sodium Bicarbonate, in *Clays and Clay Minerals*, Monograph 5, Earth Science Series, p. 317-327.

ORTIZ S., M.; ANAYA, M., 1992: Aspectos sociales y económicos relacionados con tepetates recuperados, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 293-301.

PERFECT, E.; KEY, B. D., 1990: Relations between Agregate Stability and Organic Components for a Silt Loom Soil, in *Canadian Journal of Soil Science*, 70, 4, 731-735.

REID, J. B.; GOSS, M. J., 1981: Effect of Living Roots of Different Plant Species on the Aggregate Stability of Two Arable Soils, in *Journal of Soil Science*, 32, 521-541.

RENNINGSFELD, F.; KURZMANN, P., 1983: Cultivos hidropónicos y en turba, en *Mundi-Prensa*, México, p. 49-57.

SOIL SURVEY STAFF, 1984: *Procedures for Collecting Soil Samples and Methods of Analysis for Soil Survey*, Report Number 1, Soil Survey Investigations, Washington, D.C..

Diagnóstico del contenido de elementos en dos cangahuales de la provincia de Pichincha

Gem B. Cisneros S., Jorge A. Flor I., Germán Trujillo

Abstract

An investigation about the lack of nutrients in cangahua *soils was carried out in order to correct any deficiency with appropiate fertilisers. The following macro and micro-elements were tested: N, P, K, S, Cu, Mn, Zn and Fe. The «lacking element» technique was used, with Ray grass* (Lolium multiflorum *var. Maraton) as the test plant.*

The results (by height and weight of the plants) showed three things : a) a strong deficiency in cangahua *soil of N and P; b) a decrease in Ray grass yields after the second cutting, which could be due to an imbalance between Ca, Mg and K; c) no connection between growth rates and micro-element deficiencies.*

These soils need fertilising with high levels of nitrogen and phosphorus, and moderate to low levels of potassium.

Keywords: Cangahua - *Fertilization - Chemical Deficiency*

INTRODUCCIÓN

Para evaluar la capacidad productiva de un suelo, se utilizan numerosos métodos. Durante muchos años, los análisis físicos y químicos, así como los métodos fisiológico-químicos, han sido los más importantes para el estudio de la fertilidad. Simultáneamente, han surgido los métodos biológicos, difundiéndose ampliamente el uso de macetas con pequeños volúmenes de suelo y plantas indicadoras, bajo condiciones de invernadero, las que permiten ampliar los conocimientos sobre la variabilidad del suelo como factor del crecimiento de las plantas.

En la prueba biológica, la planta actúa como agente extractor de sustancias nutritivas. El bajo nivel de elementos esenciales en el suelo se traduce en deficiencias que se manifiestan cualitativamente en el ritmo de crecimiento de la planta y en el peso seco de la misma al momento de la cosecha. A menudo, los síntomas visibles que presentan las plantas por efecto de las insuficiencia de elementos nutritivos son bastante conspicuos como para permitir apreciar las diferencias a que dan lugar los diferentes tratamientos.

Teniendo en mente lo anterior, se llevó a cabo un ensayo biológico con dos tipos de suelos cangahuosos representativos de las zonas de Tumbaco y Cayambe. Esta investigación es parte del proyecto «Recuperación de suelos endurecidos (cangahua)» auspiciado por la Unión Europea.

OBJETIVOS

General

Determinar qué elemento o elementos son insuficientes en dos suelos de cangahua de las parroquias de Tumbaco y Cangahua (Cayambe).

Específicos

1. Comparar los resultados obtenidos en el ensayo biológico con los resultados del análisis químico;
2. con base en los resultados obtenidos, recomendar una fórmula adecuada de fertilización para corregir la insuficiencia de elementos nutritivos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características del ensayo

El trabajo se realizó en Quito, en un invernadero perteneciente a la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Central del Ecuador, ubicado a 2.820 m.s.n.m.

Unidad experimental

La unidad de observación (parcela) estaba constituida por una maceta con 10 plantas. Como macetas se usaron tarros plásticos con capacidad para 2 kg de tierra. A fin de facilitar el drenaje, se realizaron 9 perforaciones repartidas uniformemente en la base de las macetas que medían 12 cm de altura y 17 cm de diámetro.

Planta indicadora

Como planta indicadora se utilizó *ray grass* (*Lolium multiflorum* Var. Maraton), por ser una planta que responde con relativa prontitud a la insuficiencia de macro y microelementos. Además, tratándose de un pasto, se pudieron realizar varios cortes para la evaluación y fue fácil determinar su producción (rendimiento en peso seco).

Soluciones nutritivas, dosificación y aplicación

En la preparación de las soluciones nutritivas que se aplicaron a los suelos, se utilizaron compuestos químicamente puros (cuadro 1) que, por el tipo de experimentación y los tratamientos planteados, se aplicaron en dosis diferentes, dependiendo del elemento que había que eliminar en determinado tratamiento (combinación de elementos nutritivos).

Compuesto utilizado	Elemento que aporta
Nitrato de Potasio	Nitrógeno y Potasio
Ácido Nítrico	Nitrógeno
Ácido Fosfórico	Fósforo
Sulfato de Magnesio	Azufre y Magnesio
Sulfato de Potasio	Azufre y Potadio
Metalosato de Hierro	Hierro (asimilable)
Metalosato de Magnesio	Magnesio
Metalosato de Zinc	Zinc
Metalosato de Cobre	Cobre

Cuadro 1
Compuestos utilizados en la preparación de las soluciones nutritivas

Las aplicaciones se iniciaron tres semanas después del brote, con el objeto de que la plántula consuma la energía aportada por la semilla. Se realizaron 12 aplicaciones de solución nutritiva, una por semana, hasta llegar al último corte.

Las soluciones se prepararon cuidadosamente y se colocaron en recipientes plásticos bien tapados para evitar la contaminación.

Tipo de suelo

En el centro–norte de la región interandina, entre los 2.500 y 2.800 m.s.n.m., en las vertientes internas de la cordillera Oriental, por efecto de la incesante actividad erosiva, van apareciendo cada vez más las tierras cangahuosas. Se tomaron dos muestras de esos suelos en Tumbaco y Cangahua.

Las muestras de suelo se recogieron siguiendo la técnica aconsejada por Hardy, a una profundidad de 0 a 30 cm.. De cada localidad se recolectaron 25 submuestras de 4 kg cada una, las mismas que fueron secadas al aire y bajo sombra, desmenuzadas con rodillo, mezcladas, homogeneizadas y luego pasadas por un tamiz con aberturas de 2 mm de diámetro.

Para el llenado de las macetas, se utilizó previamente papel filtro (16 cm de diámetro) que se colocó en el fondo de las mismas; posteriormente se procedió al llenado, colocando 2 kg de tierra en cada maceta. En el invernadero, las macetas se depositaron sobre platillos plásticos. Las soluciones nutritivas y el agua fueron colocadas en los platillos, para que el suelo las absorbiera por capilaridad.

La capacidad de campo de cada tipo de suelo fue de 750 ml en el caso de Tumbaco y 650 ml en Cangahua.

Plan del experimento

Se utilizaron 11 combinaciones de elementos nutritivos (tratamientos), a saber:

1.	Testigo absoluto	T0
2.	Testigo con N	T1 (solo N)
3.	P, K, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn	T2 (completo)
4.	P, K, Mg, S, Fe, Cu, Zn	T3 (sin Mn)
5.	P, K, Mg, S, Fe, Cu, Mn	T4 (sin Zn)
6.	P, K, Mg, S, Cu, Zn, Mn	T5 (sin Fe)
7.	P, K, Mg, S, Fe, Zn, Mn	T6 (sin Cu)
8.	P, K, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn	T7 (sin S)
9.	P, K, S, Fe, Cu, Zn, Mn	T8 (sin Mg)
10.	P, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn	T9 (sin K)
11.	K, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn	T10 (sin P)

A todos los tratamientos con excepción del T0, se añadió una dosis de nitrógeno, pues la cangahua carece de este elemento.

Características del experimento:

- diseño experimental: completamente al azar
- número de observaciones: 4
- unidad experimental: 10 plantas de *ray grass* por maceta
- factor de estudio: fertilización de cangahuales
- número de macetas experimentales: 88

Conducción del experimento y recolección de información

Siembra

Se sembró 0,1 g de semilla (30 granos) de *ray grass* en cada maceta. Cuando las plantas tenían 15 días de edad, se procedió al raleo, dejando en cada maceta solo 10 plantas.

Cuidados

Entre los cuidados aplicados durante el periodo de cultivo, cabe mencionar, en primer término, el riego diario con agua destilada, con el fin de mantener una humedad del suelo cercana a la capacidad de campo.

Todas las macetas se mantuvieron libres de malas hierbas a fin de evitar competencia con las plantas indicadoras. Por último, se hicieron anotaciones sobre los síntomas foliares de deficiencia que presentaban las plantas.

Cosecha y mediciones

Las plantas de *ray grass* sufrieron tres cortes: el primero a los 45 días, y los dos siguientes a intervalos de 35 días. Se tomaron los siguientes datos:

a. antes de cada corte, la altura de las diez plantas de cada maceta, obteniéndose un promedio por maceta;
b. una sola vez, después del primer corte, el macollamiento, obteniéndose igualmente un promedio por maceta;
c. en tres oportunidades, realizando el corte en la base de las plantas, a 2 cm del suelo, el peso fresco de la parte aérea, obteniéndose el peso promedio de las 10 plantas por maceta;
d. en tres oportunidades, como en el caso anterior, el peso seco de la parte aérea, para lo cual se secó la materia fresca de las 10 plantas de cada maceta en una estufa a 60 °C, durante 72 horas y posteriormente se pesó, obténiéndose el correspondiente promedio.

Los pesos y datos de altura obtenidos, fueron luego analizados estadísticamente para su interpretación. Se aplicó el concepto de la producción relativa ideada por Jenny.

Análisis de suelos

Se realizaron análisis físicos y químicos de los suelos de Cayambe (Cangahua) y Tumbaco. Se utilizaron los métodos de análisis del Laboratorio de Suelos del MAG. Las determinaciones químicas y su interpretación se refieren a pH, N total, materia orgánica, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn. Las determinaciones físicas se relacionaron con la clase textural.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De los análisis estadísticos y las pruebas de significación realizados para cada variable estudiada, se pudo inferir lo siguiente:

Número de hojas y macollos por planta (cuadros 2, 3, 4 y 5)

Para estas variables, no se observaron marcadas diferencias entre los distintos tratamientos en ninguno de los dos suelos. Seguramente esto se debió a que los datos fueron tomados al inicio de la investigación y por una sola vez. Sin embargo, hubo diferencias en el número de hojas y macollos entre los tratamientos testigo y solo con Nitrógeno, al compararlos con los datos obtenidos en los demás tratamientos. En efecto, los menores

Fuentes de variación	G. L.	Cuadros medios	
		S. de Cangahua	S. de Tumbaco
Total	43		
Repeticiones	3	4,46 **	8,50 **
Tratamientos	10	5,27 **	13,02 **
T0 vs. resto	1	0,22 **	0,35 **
T1 vs. resto	1	0,18 **	0,30 **
T2 vs. resto	1	0,01 ns	0,00 ns
T3, 4, 5, 6 vs. T7, 8 ,9, 10	1	0,54 **	0,66 **
T7, 8 va. T9, 10	1	0,31 ns	0,66 *
T3, 4 vs. T5, 6	1	0,28 ns	0,04 *
T3 vs. T4	1	0,09 ns	0,06 ns
T5 vs. T6	1	0,54 ns	0,24 ns
T7 vs. T8	1	0,09 ns	0,06 ns
T9 vs. T10	1	0,80 *	0,69 **
Error	30	0,91	0,60
Media General		7,36	7,89
Coef. V. (%)		12,99	9,84

Cuadro 2 - ADEVA para número de hojas en cultivo de *ray grass*

Codificación	Tratamientos	Promedios	
		S. de Cangahua	S. de Tumbaco
T0	testigo	5,15 c	4,40 b
T1	solo N	5,98 bc	5,55 b
T2	completo	7,68 ab	8,55 a
T3	sin Mn	8,68 a	9,10 a
T4	sin Zn	8,50 a	9,23 a
T5	sin Fe	7,50 abc	9,00 a
T6	sin Cu	8,58 a	9,48 a
T7	sin S	7,45 abc	8,84 a
T8	sin Mg	7,63 ab	8,60 a
T9	sin K	7,73 ab	8,90 a
T10	sin P	6,13 bc	5,53 b

Cuadro 3 - Promedios y prueba de Tukey al 15 % para número de hojas en cultivo de *ray grass*

Fuentes de variación	G. L.	Cuadros medios	
		S. de Cangahua	S. de Tumbaco
Total	43		
Repeticiones	3	3,88 ns	7,04 **
Tratamientos	10	11,39 **	10,88 **
T0 vs. resto	1	0,43 ns	0,39 **
T1 vs. resto	1	0,25 ns	0,27 **
T2 vs. resto	1	0,03 ns	0,06 ns
T3, 4, 5, 6 vs. T7, 8 ,9, 10	1	0,01 ns	0,10 ns
T7, 8 va. T9, 10	1	0,49 ns	0,61 **
T3, 4 vs. T5, 6	1	0,23 ns	0,04 ns
T3 vs. T4	1	0,14 ns	0,19 ns
T5 vs. T6	1	0,34 ns	0,21 ns
T7 vs. T8	1	0,43 ns	0,44 ns
T9 vs. T10	1	0,75 ns	0,96 **
Error	30	0,76	0,62
Media general		5,95	5,85
Coef. V. (%)		14,68	13,45

Cuadro 4 - ADEVA para macollamiento, en cultivo de *ray grass*

Codificación	Tratamientos	Promedios	
		S. de Cangahua	S. de Tumbaco
T0	testigo	1,68 c	2,00 d
T1	solo N	4,18 b	3,78 cd
T2	completo	6,83 a	6,95 a
T3	sin Mn	6,53 a	6,13 ab
T4	sin Zn	6,25 ab	6,50 ab
T5	sin Fe	6,50 a	6,18 ab
T6	sin Cu	7,18 a	6,60 ab
T7	sin S	6,65 a	6,73 ab
T8	sin Mg	7,50 a	7,60 a
T9	sin K	6,85 a	6,90 ab
T10	sin P	5,35 ab	4,98 bc

Cuadro 5 - Promedios y prueba de Tukey al 5 % para macollamiento en cultivo de *ray grass*

valores se obtuvieron en T0 (Testigo) y T1 (solo con N) y los más elevados en T8 (sin Mg), T9 (sin K) y T2 (completo). En el resto de tratamientos, los valores obtenidos son muy similares para los dos suelos.

Altura de planta (cuadros 6 y 7)

Por los resultados obtenidos para esta variable, en ambos suelos, se dedujo que el tratamiento T10 (sin P) presentó una altura de planta muy reducida, similar a

Fuentes de variación	G. L.	Suelo Cangahua			Suelo Tumbaco		
		1er corte	2° corte	3er corte	1er corte	2° corte	3er corte
Total	43						
Repeticiones	3	5,13 *	18,08 ns	10,82 ns	11,68 **	13,67 *	7,27 ns
Tratamiento	10	10,13 **	193,34 **	189,76 **	25,49 **	206,86 **	219,88 **
T0 vs. resto	1	0,34 **	1,51 **	1,08 **	0,54 **	1,44 **	1,19 **
T1 vs. resto	1	0,17 *	1,40 **	1,74 **	0,29 **	1,60 **	1,79 **
T2 vs. resto	1	0,03 ns	0,34 *	0,12 ns	0,05 ns	0,00 ns	0,09 ns
T3, 4, 5 ,6 vs. T7, 8, 9, 10	1	0,16 ns	0,27 ns	1,36 **	0,77 **	0,81 *	1,64 **
T7, 8 vs. T9, 10	1	0,50 ns	2,10 **	2,63 **	1,12 **	2,21 **	3,43 **
T3, 4 vs T5, 6	1	0,13 ns	0,94 ns	0,05 ns	0,21 ns	0,10 ns	0,18 ns
T3 vs. T4	1	0,25 ns	0,65 ns	0,48 ns	0,20 ns	0,00 ns	0,48 ns
T5 vs. T6	1	0,18 ns	1,65 ns	2,00 *	0,11 ns	0,33 ns	0,36 ns
T7 vs. T8	1	0,50 ns	1,60 ns	0,96 ns	0,64 ns	1,69 *	0,78 ns
T9 vs. T10	1	2,04 **	2,60 *	3,10 **	2,51 **	3,76 **	4,19 **
Error	30	1,73	7,88	7,67	1,48	4,14	6,48
Media G. (cm)		17,31	27,85	24,58	18,42	27,80	23,55
Coef. V. (%)		7,59	10,08	11,26	6,61	7,32	10,81

Cuadro 6
ADEVA para altura de planta en cultivo de *ray grass*

Cuadro 7
Promedios y prueba de Tukey al 5 % para altura de planta en cultivo de *ray grass*

Codificación	Tratamientos	Promedios (cm)					
		Suelo de Cangahua			Suelo de Tumbaco		
		1er corte	2° corte	3er corte	1er corte	2° corte	3er corte
T0	testigo	13,95 c	12,73 c	13,75 cd	12,99 d	13,40 c	11,63 bc
T1	solo N	16,13 abc	16,75 c	10,00 d	16,34 bc	14,85 c	8,68 c
T2	completo	18,02 abc	33,50 a	26,48 ab	19,63 a	30,83 a	27,25 a
T3	sin Mn	17,83 ab	30,40 ab	29,40 a	19,99 a	31,75 a	28,38 a
T4	sin Zn	18,32 ab	29,10 ab	28,45 a	19,58 a	31,75 a	27,42 a
T5	sin Fe	18,00 ab	29,98 ab	26,83 ab	20,30 a	31,23 a	27,90 a
T6	sin Cu	17,64 ab	33,28 a	30,85 a	20,08 a	31,88 a	28,63 a
T7	sin S	17,62 ab	33,85 a	29,75 a	20,20 a	33,92 a	29,00 a
T8	sin Mg	18,63 a	30,65 ab	27,83 a	18,93 ab	30,55 a	27,45 a
T9	sin K	19,16 a	30,65 ab	26,63 ab	19,85 a	31,57 a	25,55 a
T10	sin P	15,09 bc	25,45 b	20,42 bc	14,83 cd	24,05 b	17,17 b

las obtenidas en los tratamientos T0 (testigo) y T1 (solo con N), tendencia que se mantuvo en los tres cortes. Estas respuestas evidenciaron la insuficiencia del elemento P en estos suelos cangahuosos, confirmándose los resultados de los análisis de los suelos. Los tratamientos carentes de los microelementos Mn, Zn, Fe y Cu produjeron alturas de planta muy semejantes a las obtenidas en el tratamiento T2 (completo). Cosa parecida ocurrió con los tratamientos carentes de los macroelementos S, Mg y K.

Peso fresco y seco de las plantas de ray grass (cuadros 8, 9, 10 y 11)

Con base en el análisis de los resultados obtenidos en los dos suelos, se pudo establecer que en el primer corte, en los tratamientos T0 (testigo), T1 (solo con N) y T10 (sin P), se produjeron los más bajos rendimientos en masa verde y seca. En los demás tratamientos se obtuvieron valores de rendimiento cercanos la media. Esta tendencia se mantuvo en el segundo y tercer cortes, siendo más acentuada en los suelos de la zona de Cangahua.

De acuerdo a los diagramas de fertilidad, los tratamientos T8 (sin Mg) y T9 (sin K), presentaron un comportamiento decreciente, en ambos suelos, a partir del segundo

Fuentes de variación	Tratamientos	Promedios (g)					
		Suelo de Cangahua			Suelo de Tumbaco		
		1er corte	2° corte	3er corte	1er corte	2° corte	3er corte
Total	43						
Repeticiones	3	144,08 **	385,7 ns	230,9 ns	264,08 **	155,6 ns	446,3 ns
Tratamientos	10	495,68 **	3.046,9 **	5.664,1 **	856,20 **	3.291,0 **	4.858,8 **
T0 vs. resto	1	2,31 **	4,9 **	6,4 **	2,78 **	5,3 **	5,9 **
T1 vs. resto	1	1,86 **	5,3 **	7,3 **	2,83 **	5,8 **	6,7 **
T2 vs. resto	1	0,15 ns	2,2 **	2,9 **	0,25 ns	0,7 ns	0,2 ns
T3, 4, 5, 6 vs. T7, 8, 9, 10	1	0,18 ns	7,4 **	13,3 **	2,55 *	6,8 **	7,7 **
T7, 8 vs. T9, 10	1	5,05 **	11,8 **	17,6 **	4,65 **	14,9 **	21,7 **
T3, 4 vs. T5, 6	1	0,85 ns	8,8 *	13,5 **	0,61 ns	3,6 ns	1,7 ns
T3 vs. T4	1	1,02 ns	1,8 ns	3,7 **	0,34 ns	2,9 ns	0,2 ns
T5 vs. T6	1	2,73 ns	3,7 ns	10,8 ns	1,57 ns	2,0 ns	1,5 ns
T7 vs. T8	1	3,71 ns	9,7 ns	14,3 *	4,44 ns	14,1 **	27,4 **
T9 vs. T10	1	9,73 **	18,0 **	12,2 **	13,83 **	13,9 **	14,2 *
Error	30	29,48	210,6	197,8 *	44,35	126,4	227,0
Media G. (g)		25,85	50,43	67,05	31,50	54,84	61,09
Coef V. (%)		19,65	18,59	16,98	18,85	16,67	19,98

Cuadro 8 - ADEVA para peso fresco en cultivo de *ray grass*

Codificación	Tratamientos	Promedios (g)					
		Suelo de Cangahua			Suelo de Tumbaco		
		1er corte	2° corte	3er corte	1er corte	2° corte	3er corte
T0	testigo	2,71 c	1,65 c	3,6 e	3,71 b	1,91 d	2,24 d
T1	solo N	11,46 c	7,95 c	7,6 e	8,83 b	8,24 d	6,49 d
T2	*completo*	28,81 ab	77,90 a	103,2 a	39,14 a	71,59 ab	75,19 b
T3	sin Mn	30,15 a	76,40 a	108,3 a	38,45 a	78,49 ab	83,11 ab
T4	sin Zn	28,11 ab	72,74 a	101,0 ab	39,13 a	72,64 ab	82,72 ab
T5	sin Fe	28,11 ab	53,30 ab	66,9 bcd	38,44 a	66,46 ab	80,99 ab
T6	sin Cu	33,56 a	60,53 a	88,5 abc	42,58 a	70,38 ab	78,04 ab
T7	sin S	31,70 a	72,54 a	96,6 ab	34,51 a	87,36 a	114,80 a
T8	sin Mg	39,11 a	53,06 ab	67,9 bcd	43,39 a	59,23 b	60,15 bc
T9	sin K	35,03 a	57,26 a	59,1 cd	43,49 a	57,36 bc	58,28 bc
T10	sin P	15,57 bc	21,23 bc	34,8 de	15,83 b	29,58 cd	29,98 cd

Cuadro 9
Promedios y prueba de Tukey al 5 % para peso fresco en cultivo de *ray grass*

corte (rendimiento de masa verde y seca). Seguramente esa respuesta se debe a un desequilibrio entre los cationes básicos Ca, Mg, K. Así, el desequilibrio entre Ca y Mg en los suelos acentuó la deficiencia del Mg. Cuando la relación Ca/Mg es muy alta, las plantas absorben menos Mg. De la misma manera, si el valor de la relación Ca + Mg/K es muy elevado, y K existe en cantidad relativamente inferior como lo indica el análisis de suelos, es factible que su ausencia en la solución nutritiva aplicada haya determinado un desequilibrio y en consecuencia, la absorción con mayor intensidad de los iones antagónicos Ca o Mg abundantes, específicamente el Ca en los suelos volcánicos endurecidos.

Las respuestas en peso de masa verde y seca de la planta indicadora en los tratamientos en los que hubo carencia de un micro-elemento, fueron muy similares a las que se obtuvieron con el tratamiento T2 (completo), lo que indica que la ausencia o presencia de los microelementos no incidió significativamente en el rendimiento de masa verde o seca de la planta indicadora.

Fuentes de variación	Tratamientos	Promedios (g)					
		Suelo de Cangahua			Suelo de Tumbaco		
		1er corte	2º corte	3er corte	1er corte	2º corte	3er corte
Total	43						
Repeticiones	3	2,60 **	15,01 ns	0,79 ns	1,58 ns	6,13 ns	9,18 ns
Tratamientos	10	10,13 **	82,10 **	126,95 **	18,94 **	89,79 **	123,21 **
T0 vs. resto	1	0,33 **	0,85 **	1,01 **	0,42 **	0,90 **	1,01 **
T1 vs. resto	1	0,29 **	0,93 **	1,17 **	0,42 **	1,00 **	1,16 **
T2 vs. resto	1	0,02 ns	0,12 ns	0,35 **	0,02 ns	0,12 ns	0,05 ns
T3, 4, 5, 6 vs. T7, 8, 9, 10	1	0,11 ns	0,78 ns	1,11 **	0,17 ns	0,59 ns	0,75 ns
T7, 8 vs. T9, 10	1	0,67 **	2,51 **	2,60 **	0,65 **	2,36 **	3,04 **
T3, 4 vs. T5, 6	1	0,11 ns	0,81 ns	2,11 **	0,03 ns	0,69 ns	0,60 ns
T3 vs. T4	1	0,02 ns	0,47 ns	0,98 ns	0,25 ns	0,50 ns	0,74 ns
T5 vs. T6	1	0,33 ns	0,75 ns	1,84 *	0,03 ns	0,10 ns	0,00 ns
T7 vs. T8	1	0,24 ns	0,09 ns	1,55 *	0,66 *	2,09 **	3,21 **
T9 vs. T10	1	1,33 **	2,53 **	1,69 *	2,06 **	2,20 **	2,28 *
Error	30	0,53	6,54	4,21	0,64	3,85	7,14
Media G. (g)		3,62	8,6	10,53	4,74	9,22	10,26
Coef V. (%)		0,53	18,78	19,49	16,93	19,86	20,04

Cuadro 10 - ADEVA para peso seco en cultivo de *ray grass*

Codificación	Tratamientos	Promedios (g)					
		Suelo de Cangahua			Suelo de Tumbaco		
		1er corte	2º corte	3er corte	1er corte	2º corte	3er corte
T0	testigo	0,35 d	0,11 c	0,5 e	0,51 c	0,26 d	0,15 d
T1	solo N	1,30 cd	1,08 c	1,0 e	1,35 bc	1,16 cd	0,86 d
T2	completo	4,09 ab	11,32 a	15,5 a	5,78 a	12,07 a	12,82 abc
T3	sin Mn	4,01 ab	12,32 a	16,6 a	5,45 a	12,78 a	14,46 ab
T4	sin Zn	4,05 ab	11,38 a	14,6 a	5,95 a	11,77 a	12,98 ab
T5	sin Fe	3,93 ab	9,49 ab	9,5 cd	5,74 a	10,79 a	12,52 abc
T6	sin Cu	4,59 a	10,99 a	13,2 abc	5,80 a	10,99 a	12,53 abc
T7	sin S	4,79 a	12,09 a	15,4 ab	5,38 a	14,85 a	17,89 a
T8	sin Mg	5,28 a	11,90 a	12,3 abc	6,70 a	10,68 ab	11,46 abc
T9	sin K	5,03 a	9,51 ab	10,3 bcd	6,80 a	10,24 ab	10,88 bc
T10	sin P	2,36 bc	9,45 bc	7,0 d	2,68 b	5,84 bc	6,31 cd

Cuadro 11
Promedios y prueba de Tukey al 5 % para peso seco en cultivo de *ray grass*

CONCLUSIONES

1. Los suelos cangahuosos de la zonas de Tumbaco y Cayambe se comportaron en forma similar. De acuerdo a la prueba biológica, no se observaron mayores diferencias en su capacidad productiva.
2. Tanto los suelos de Cangahua (Cayambe) como los de Tumbaco presentaron contenidos insuficientes de Nitrógeno y Fósforo.
3. Parece no existir una buena relación entre los iones Ca, Mg y K, en los suelos de Cangahua y Tumbaco, pues los rendimientos decrecientes (en peso seco de *ray grass*), indican un probable desbalance entre esos elementos.
4. Los suelos de Cangahua y Tumbaco presentan una suficiencia del elemento S, pues las respuestas del *ray grass*, en todas las variables estudiadas, fueron positivas y en algunos casos superiores a las del tratamiento completo (T2).
5. En ninguno de los suelos estudiados fue clara la acción de los microelementos, cuya insuficiencia no incidió en el rendimiento en masa verde y seca del *ray grass*. Los

valores promedio obtenidos fueron muy similares a los correspondientes al tratamiento completo (T2).

6. El *ray grass* se comportó como una eficiente planta indicadora para evaluar la fertilidad de los suelos cangahuosos.
7. En general, los resultados del análisis químico de ambos suelos coincidieron con los de la prueba biológica, especialmente en cuanto a los macroelementos N y P.

RECOMENDACIONES

1. Realizar en Cangahua y Tumbaco experimentaciones complementarias con diferentes dosis de los elementos detectados como insuficientes.
2. En este tipo de suelos, donde los valores del elemento Ca son medios, es de suma importancia investigar la incidencia de las relaciones Ca/Mg, Ca/K, (Ca + Mg)/K y Mg/K.
3. De acuerdo a la prueba biológica, en estos suelos deberán aplicarse fórmulas de fertilización con N, P y K, utilizando niveles altos de los dos primeros elementos y medios a bajos del tercero.
4. Como a lo largo de la investigación no hubo una clara incidencia de los microelementos, su uso en este tipo de suelos no es indispensable.

Referencias bibliográficas

ALLEN, S. S.; TERMAN, G. L.; CLEMENTS, L. B., 1976: *Greenhouse > Techniques for Soil Plant–Fertilizer Research*, National Fertilizer Development Center, Tennesse Valley Authority, Muscle Shoals, Alabama.

ARIAS, H., 1992: Rehabilitación de tepetates: una alternativa para la producción agropecuaria y forestal, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 309-317.

ARAOS, F., 1967: Estudio de deficiencias nutritivas en muestras superficiales de suelos de Ñuble, en *Agricultura Técnica* (Chile), 27(1), p. 15-20.

CUSTODE, E.; DE NONI, G.; TRUJILLO, G.; VIENNOT, M., 1992: La cangahua en el Ecuador: caracterización morfoedafológica y comportamiento frente a la erosión, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 332-346 .

DE NONI, G.; VIENNOT, M., 1987: Los estudios MAG-ORSTOM, un paso hacia la conservación de los suelos en la Sierra ecuatoriana, en *Memorias de la Conferencia de los usos sostenibles de tierras en laderas, Quito, mayo 13-15 de 1987*, MAG, Quito, p. 20-22.

JENNY, H. *et al.*: Estudio sobe la fertilidad de ocho suelos colombianos, Federación Nacional de Cafeteros, Chinchiná, Colombia, en *Boletín Técnico*, 1(9), p. 1-16.

MARTINI, J., 1970: Caracterización del estado nutricional de los principales andosoles de Costa Rica, mediante la técnica del elemento faltante en el invernadero, en *Turrialba*, 20, p. 71-84.

PARRA, H. J., 1952: Fertilidad en la serie de suelos de Chinchiná, en *Boletín informativo*, Centro Nacional de Investigación de Café, Chinchiná, Colombia, 3(27), p. 30-38.

Nutrient Supply of Reclamated Indurated Volcanic Ash Soils and Evaluation of Productivity with the QUEFTS-Model

Jürgen BAUMANN, Gerd WERNER

Abstract

Nutrient supply of 25 reclamated tepetates *and two Chromic Cambisols in the Central Mexican Highlands was investigated and maize yield potential (productivity) was calculated with the QUEFTS-model. The nutrient supply for Ca, Mg and K is high, whereas P, N and organic C amounts low to very low. After 7 to 10 years of cultivation the available P-amounts indicated a medium level of P-supply, whereas N-supply is still very low. The theoretical maize-yields evaluated with the QUEFTS-model ranged from 986 kg/ha to 3,144 kg/ha. Furthermore the soils were characterised by the Fertility Capability Classification (FCC-) System. Considering that soil productivity depends also largely on water supply to the crops, pore size distributions were evaluated.*

Keywords: *Macro Nutrients - Plant Available P-amounts - P-adsoption - QUEFTS-Model - FCC-System*

INTRODUCTION

In view of the need to extend arable land in the near future rehabilitation of degraded lands in the tropics is an important task. In the state of Tlaxcala, Central Mexican Highlands, more than 15 % of the surface is covered by indurated volcanic ash soils. Soils developed in Toba-sediments are often characterized by pedogenetic silica-acid enrichment in the subsoil. The formation of so called *tepetates* result from the exposure of the silica-rich subhorizon at the surface after erosion of the topsoil. (After erosion of the topsoil the exposed subsoil harden irreversible and form so called *tepetates*.) For about 20 years the government of Tlaxcala is reclamating *tepetates* by deep-loosening under a land reclamation program. The program is restricted only to mechanical measures. The deep loosened sites are left immediatly for cultivation to the small farmers without further recommendations for an adequate management of these labile soils. Under traditional management maize yields are very low within the first years of agricultural use. At some fields corn yields are below 1 t/ha. The aim of this study was to evaluate fertility status of reclamated *tepetates*.

SITE DESCRIPTION

The state of Tlaxcala (3,914 km^2) is situated in the eastern section of the Central Mexican Highland. The southern area of the state forms part of the valley of Puebla-Tlaxcala. It is separated from the valley of Mexico by the Sierra Nevada. The northern boundary of the valley is marked by the blocks of Tlaxcala and Huamantla which cross the state in west-east direction and where the studied sites are located. The blocks reaches hight of about 2,550 - 2,700 m a.s.l. They form the center of the state. All sites where investigations were conducted are located in this area. The climate is characterized by a summer rainy season extending from May to October. The average annual rainfall is about 600-700 mm. With a mean annual temperature of 15 - 17 °C and 5 - 6 humid month the climate is semiarid (Lauer & Stiehl, 1973).

MATERIALS AND METHODS

For chemical analysis twenty five reclamated *tepetates* and two Chromic Cambisols were examined. The number of years of cultivation ranged from 0 (recently deep loosened) up 10 years. The following chemical soil analysis were undertaken:

- pH-values were measured potentiometrically using a glass electrode in deionised H_2O and 1 M KCl-suspension. The proportion soil/solution was 1:2,5 (Schichtling & Blume, 1966).
- Exchangeable cations were extracted by percolation with 1 N NH_4-acetate (pH = 7,0) and measured by AAS. Soil samples of 2,5 g were placed in percolation tubes. After a contact time of 2 hours with NH_4-acetate the samples were percolated with 100 ml of extracting solution. The percolation time was 4,5 hours.
- Total carbon was determined by burning with oxygen and measuring the CO_2 conductometrically with the Wösthof gas analyser. Organic carbon has been evaluated by subtracting the carbon encountered within the carbonates from total carbon.
- Carbonates were determined by measuring CO_2-volume after destroying with HCl in the Scheibler apparatus (Schichtling & Blume, 1966).
- Total nitrogen was determined according the Kjeldahl method (Reeuwijk, 1986).
- Plant available phosphorus was determined by the Olsen-Method ($NaHCO_3$-extractable P) — Olsen *et al.*, 1954; Houba *et al.*, 1989).
- Phosphorus adsorption was determined according to Blakemoore (Blakemoore, 1981; Mizota & Reeuwijk, 1989; Reeuwijk, 1986).
- Nutrient reserves were estimated by a 1 M HCl-extract according to Knickmann (1955), modified by Moll (1965). A 5g soil sample was heated with a temperature 90 °C for three hours. K, Ca, Mg and Na were measured by AAS. Phosphorus was measured colorimetrically by Vanadat-Molybdat-method.
- Pore size distribution was determined for thirteen soil profiles. From each horizon 6-8 volumetric core samples of 100 cm^3 were taken. After saturation the samples were dehydrated by excess pressure in membran pressure pots. The samples were drained subsequently with pressure of 25 cm, 60 cm, 100 cm, 300 cm and 1,000 cm water column. For evaluation of the pore volume at 15,000 cm water column disturbed air dried and rewatered samples were used (Hartge & Horn, 1989).

RESULTS AND DISCUSSION

The results of chemical analysis are given in table 1 and 2. The pH-values showed a slightly acidic to slightly alcalic soil reaction. These are favourable conditions for the cultivation of most agriculture crops. Apparently the soil-pH decreases through the years

	Years	H_2O	Exchangeable Cations meq/100g soil					P -Olsen mg/kg	Ct (%)	Nt (%)	$CaCO_3$ (%)
			Ca	Mg	K	Na	total				
TR1	0	8.0	11.8	9.1	1.4	0.7	22.9	0.7	0.153	0.021	1.1
TR2	0	8.0	11.5	9.8	1.8	0.6	23.7	0.6	0.121	0.020	0.9
TR3	0	8.2	11.6	9.3	1.7	0.8	23.4	0.9	0.102	0.014	1.4
TR4	0	7.9	9.0	7.3	1.4	0.7	18.3	0.7	0.137	0.018	1.7
TR5	0	7.2	8.2	7.2	2.7	0.9	18.8	1.5	0.189	0.016	1.6
TR6	1	8.0	8.6	5.7	2.0	0.3	16.1	1.1	0.195	0.015	1.6
TR7	2	8.0	12.7	9.5	2.9	0.6	25.7	2.9	0.195	0.017	1.5
TR8	4	7.7	13.4	8.6	2.2	0.3	26.5	5.3	0.549	0.066	1.2
TR9	4	5.7	5.4	3.7	0.5	0.1	9.7	5.7	0.937	0.078	1.0
TR10	4	7.5	7.4	6.5	1.2	0.3	15.3	1.3	0.160	0.015	1.6
TR11	4	7.8	10.1	8.8	2.4	0.4	21.8	8.5	0.332	0.027	1.1
TR12	4	7.9	8.6	7.7	1.0	0.7	18.1	2.0	0.197	0.043	1.6
TR13	7	7.1	9.1	6.7	1.8	0.2	17.8	5.0	0.752	0.128	1.2
TR14	7	7.5	9.4	7.8	0.8	0.3	18.3	2.6	0.394	0.048	1.3
TR15	7	6.5	7.1	7.2	1.0	0.4	15.8	3.3	0.482	0.048	1.4
TR16	7	6.5	6.1	6.0	0.7	0.4	13.2	7.7	0.810	0.074	1.9
TR17	7	6.3	6.3	3.5	0.6	0.2	10.6	4.5	0.941	0.086	1.4
TR18	7	6.7	4.6	3.4	0.9	0.3	9.2	5.5	0.405	0.039	1.2
TR19	7	6.9	5.9	3.6	1.2	0.2	10.8	6.8	0.297	0.029	1.6
TR20	7	7.2	9.0	7.4	0.7	0.6	17.7	1.9	0.337	0.038	1.3
TR21	7	6.9	8.8	4.4	1.5	0.4	15.2	10.5	0.257	0.023	1.4
TR22	10	6.2	6.3	4.5	0.8	0.2	11.8	7.0	0.788	0.066	1.3
TR23	10	7.6	9.4	4.5	2.7	0.2	16.7	8.7	0.513	0.051	1.4
TR24	10	7.1	8.8	5.3	2.9	0.4	17.4	8.5	0.605	0.047	1.1
TR25	10	6.4	6.1	6.2	0.8	0.4	13.1	8.8	0.478	0.048	
CAM		6.1	4.6	2.9	0.5	0.1	8.2	4.0	0.689	0.071	
CAM		6.0	5.2	3.7	0.5	0.3	9.7	3.5	1.089	0.079	

Table 1: pH-values, exchangeable cations, P-Olsen, organic carbon, total nitrogen

Table 2
P-adsorption, HCl-extractable nutrient reserves, $CaCO_3$

	P-adsorption %	HCl-extractable nutrient reserves mg/100g soil			
		P	K	Mg	Ca
TR1-TR25 ($\bar{x}$)	11.0	17	186	305	357
range	*7 - 20*	*11 - 27*	*100 - 304*	*140 - 484*	*166 - 577*
CAM1	8.1	16	80	110	166
CAM2	8.9	9	68	111	176

of cultivation. The total sum of exchangeable cations showed a strong correlation with pH-values (r = 0.843***). The soils contain medium to high amounts of exchangeable cations. So they are well supplied with Ca, Mg and K. Above that they have high to very high reserve amounts (HCl-extractable) of these nutrients. Problematic is the very low nitrogen and phosphorous content. The mean N and P amounts of recently reclamated *tepetates* are only 540 kg N/ha (0.018 %, soil depth: 0-30 cm, bulk density: 1.2) and

2.1 kg/ha (0.7 mg/kg) available P (P-Olsen) respectively. Therefore, mineral N and P fertilizer and/or organic manure applications are necessary. Through the years of cultivation the amounts of soil nitrogen and available phosphorous have increased. After 7-10 years of cultivation the mean level of nitrogen reaches 1,600 kg/ha, which is still very low. However, there is a great variation of N-status (690 kg/ha - 3,840 kg/ha) between the individual fields. It can be concluded that management varies strongly.

In comparison to N-status the availble phosphorous amounts after 7-10 years of cultivation indicate a medium level of P-supply. The mean values for P-Olsen were 15.9 kg/ha (5.3 mg/kg) and 24.9 kg/ha (8.3 mg/kg), respectively. The results are in the same range as those obtained by Etchevers *et al.* (1991).

Because of the very low P-adsorption between 7 and 20 % (mean value 11 %) of the *tepetates* improvement of P-status can easily be reached by application of soluble mineral fertilizers. Investigations of P-supply for different soils in the state of Tlaxcala from Cruz *et al.* (1991, 1992) showed that 73 % of the soils contained high to very high (P-Olsen > 12 mg/kg resp. > 24 mg/kg) available phosphorus amounts. Comparable investigations from Gonzales (1975) fifteen years ago showed a reversed situation. Fifty percent of the examined soils contained less than 5 mg/kg of P-Olsen. The improvement of P-status can be explained by increasing amounts of P-fertilizer application within the last twenty years (Cruz *et al.*, 1992).

The theoretical maize yield potential was estimated with the QUEFTS-model (Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils; Janssen *et al.*, 1986, 1990; Smaling, 1993).

The model was developed by the Department of Soil Science and Plant Nutrition of the Wageningen Agriculture University in the Netherlands. The empirical background consists of more than 150 field trials with maize in different agroecological zones in Kenya and Surinam. Smaling (1993) stated that the QUEFTS-model can be integrated in land use planning and rural development programs in tropical countries to provide rapidly basical informations for agronomy planers and policy decision makers. In contrast, fertilizer trials often are time and cost consuming. Furthermore they needs a well institutional infrastructure.

Because of the partly empirical character of the model, the system is only applicable to soils that have a pH (H_2O) in the range 4.5-7.0 and values for organic carbon, P-Olsen and exchangeable potassium below 70 g/kg, 30 mg/kg and 30 mmol/kg, respectively. The results are presented in table 3.

Table 3
Maize yield potential (kg/ha) after QUEFTS-model

	maize yield kg/ha	pH (H_2O)	C_{org} g/kg	P-Olsen mg/kg	K_{sorb} mmol/kg
TR18	986	6.7	2.5	5.5	9.1
TR19	995	6.9	2.0	6.8	11.7
TR15	1,304	6.5	3.3	3.3	10.2
TR25	1,394	6.4	3.5	8.8	8.3
TR22	2,586	6.2	6.3	7.0	7.6
TR17	2,720	6.3	7.2	4.5	5.6
TR16	2,770	6.5	6.5	7.7	7.2
TR9	2,989	5.7	8.2	5.7	4.6
CAM1	1,917	6.1	5.3	4.0	5.1
CAM2	3,144	6.0	9.5	3.5	4.8

The official annual yield evaluations conducted by the Agricultural Department in the state of Tlaxcala resulted in average maize yields for rainfed conditions between 1,300 and 2,100 kg/ha for the period from 1985 to 1991. The mean yield for the seven year period was 1,800 kg/ha/a. Analysing the results from table 3 it is obvious that primarily insufficient N and organic matter contents limited the actual productivity of reclamated *tepetates*. Maintaneance and improvement of soil productivity and yield increase in semiarid regions requires additional inputs of organic substances (Turenne, 1989; Moll, 1980). A lasting elevation of humus level seems to be possible by continous application of manure or compost (Jones, 1971 cit. in Müller-Sämann & Kotschi, 1994; Pipchot, 1983 cit. in Turenne, 1989). Good results are obtained by combined applications of mineral and organic fertilizers (Mokwunye, 1980). Márquez *et al.* (1992) showed that additional application of 40 t/ha of organic manure increased crop yield significantly in comparison to fields with only mineral fertilization.

The yields calculated with the QUEFTS-model only refer to soils with no severe limitations others like short supplies of N, P and K. If there are great discrepancies between calculated and measured yields, Janssen *et al.* (1990) suggested the application of the «Fertility Capability Classification System» described by Sánchez *et al.* (1982*) to obtain further information of other yield limitation factors like insufficient water capacity or root penetration restrictions. The FCC-system consists of three categorical levels. The first level ('Type') considers and classifies the texture of the topsoil (0-20 cm). The second level ('Substrata type') is only be used if the texture of the topsoil differs clearly from the texture of the subsoil or if a hardened layer appears within the first 50 cm of the soil profile. The soil properties of the first two levels are marked with capital letters. On the third level 15 productivity limiting soil properties, so called 'modifiers' like a low cation exchange capacity (e), high P-fixation by free iron oxides (i) or aluminium toxicity (a) are installed. The reclamated *tepetates* can be characterized by the following FCC-unit:

L"L d (b)

This classification is based on the following soil properties:

L" a loamy topsoil with aggregates > 2 mm of more than 35 %
L a hardened or compacted subsoil within the first 50 cm of the soil profile
d ustic soil moisture regime
(b) alcaline soil pH-reaction [pH(H_2O) > 7.2] of the recently reclamated sites

It can be suggested that under the given climatic and soil physical conditions the supply of soil water to the plants could be a serious crop yield limitation factor. The modifier «b» leads to the conclusion that the availabilitiy of certain micronutrients like zinc could be restricted.

The chromic Cambisols are classified with the FCC-unit:

S'L d

according to the following soil properties:

S' the topsoil is a sandy loam with aggregates > 2 mm between 15 % and 35 %
L loamy subsoil
d ustic soil moisture regime

The sandy topsoil overlaying the loamy subsoil is a positive fact under the conditions of a ustic soil moisture regime, because the capillary conductivity is reduced. This minimizes unproductive water losses by evaporation. In comparison to the reclamated *tepetates* the infiltration capacity of the Cambisols is higher in order to their more sandy topsoil. The FCC-system assumes that the fertility of the soil is primarily determined by the properties of the topsoil.

Soil productivity depends largely on water supply and soil availble water capacity. In semiarid regions mostly climatic constraints like an extreme variability of rainfall (both within seasons and between years), high energy of erosive storms and high evapotranspiration rates limit crop production. Periods of excesses or deficits of available soil water during the growing season often reduce crop yields. To minimize negative effects for plant growth, sufficient storage capacity for plant available water is needed. The mechanical loosening primarily eliminates the physical resistance for root penetrating and provides new pore space for root growth. The effect on pore size distribution was primarily an increase of about 15-20 % of the volume of large pores (> 30 µm), whereas the volume of medium and fine pores slightly decreased. The reclaimated *tepetates* (as TR10, table 4) are characterized by a favourable field capacity between 14 and 15 % (pore volume between pF 4.2 and pF 2.0). But because of the low average loosening depth of about 45 cm the total available water capacity is only 65 to 90 mm. Investigations from Sivakumar *et al.* (1987) on Indian Alfisols showed that the risk of yield depression caused by short drought periods within the rainy season were strongly correlated with soil depth and total water storage capacity. Virmani *et al.* (1980) reported from investigations in semiarid regions of India which showed that the lenght of effective plant growing periods could be extented from 105 days up to 133 days if water storage capacity increased from 50 mm up to 150 mm. Therefore, for further reclamation measures it is strongly recommended to increase the average loosening depth.

Horizon	soil depth	Dr	Db	Pore size distribution in %				TPV
				fine µm	medium µm	large µm	total	
				< 0.2	0.2 - 10	10 - 30		
AT1	0 - 17	2.69	1.20	21.3	13.7	4.9	20.3	55.3
AT2	17 - 35	2.67	1.26	22.1	11.7	5.1	18.8	52.7
AT3	35 - 48	2.67	1.18	19.1	12.2	4.1	24.5	55.7
CMx	> 48	2.67	1.42	28.0	9.5	1.9	9.3	46.8

Table 4 - Pore size distribution of TR10

CONCLUSIONS

A suitable use of reclamated *tepetates* requires the development of adequate land management systems. A guideline therefore may be the World Bank Technical Paper 221 (Srivastava, 1993).

The reclamated *tepetates* offer several advantages for agricultural crop cultivation. They have medium to high amounts of exchangeable cations, favourable soil-pH and very

low P-adsorption rates. At the same time they have various disadvantages like very low N and P contents recently after loosening. Here, a lasting increase of humus content and nitrogen supply must be a major goal. Although they have a medium to high field capacity the plant available water content is limited by a low medium loosening depth.

The following measures are advisable:

- loosening depth should be extended to about 70 cm (100-140 mm field capacity);
- legumes should be integrated in the crop production system;
- organic manures like animal waste or compost should be used to increase humus content and to improve soil physical conditions like soil structure and infiltration.

Also very important is a long term advice for the small farmers about appropiate cropping systems, erosion control measures and fertilization. Otherwise, economical investment will never be amortised.

Modells like QUEFTS and the FCC-system could be integrated in land use planning programs like simple tools which can easily provide basic informations on fertility and soil related restrictions on productivity.

References

CRUZ, L.; ETCHEVERS, J.; RODRÍGUEZ, J., 1991: Situación del fósforo en los suelos de Tlaxcala, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, 204-209.

CRUZ, L.; ETCHEVERS, J.; RODRÍGUEZ, J.; GALVIS, A.; LÓPEZ, R.M., 1992: Levantamiento nutrimental de los suelos de Tlaxcala, en *Agrociencia*, 3, p. 157-162.

ETCHEVERS, J.; ZEBROWSKI, C.; HIDALGO, C.; QUANTIN, P., 1992: Fertilidad de los tepetates. II Situación del fósforo y del potasio en tepetates de México y Tlaxcala, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), orstom-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 385-391.

GONZALES, D. R., 1975: *Predicción de la respuesta del maíz a la fertilicación fosfatada en el estado de Tlaxcala, basada en la disponibilidad de fósforo del suelo y otras variables del sitio*, Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

HARTGE, K.H.; HORN, R., 1989: *Die physikalische Untersuchung von Böden*, Stuttgart, 175 p.

HOUBA, V. J. G.; LEE (VAN DER), J. J.; NOVOZAMSKY, I.; WALINGA, I., 1989: *Soil and Plant Analysis, a Series of Syllabi, Part 5: Soil Analysis Procedures*, Department of Soil Science and Plant Nutrition, Wageningen Agricultural University, Wageningen, Niederlande, 89 p.

JANSSEN, B. H.; GUIKING, F. C. T.; EIJK (VAN DER), D.; SMALING, E.M.A.; REULER (VAN), *H., 1986*: A New Approach to Evaluate the Chemical Fertility of Tropical Soils, in *Transactions of the 13th Congress ISSS*, Hamburg, Vol. III, p. 791-792.

JANSSEN, B.H.; GUIKING, F.C.T.; EIJK (VAN DER), D.; SMALING, E. M. A.; WOLF, J.; REULER (VAN), H., 1990: A System for Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils (QUEFTS), in *Geoderma*, 46, p. 299-318.

KNICKMANN, E., 1955: *Die Untersuchung von Böden*, Methodenbuch Bd. 2, Neumann-Verlag, Radebeul und Berlin.

LAUER, W.; STIEHL, E., 1973: Hygrothermische Klimatypen im Raum Puebla-Tlaxcala (Mexiko), in *Erdkunde*, 27, p. 230-234.

MÁRQUEZ R., A.; ZEBROWSKI, C.; NAVARRO, H., 1992: Alternativas agronómicas para la recuperación de tepetates, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), orstom-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 465 - 473.

MIZOTA, C.; REEUWIJK, L.P., 1989: *Clay Mineralogy and Chemistry of Soils Formed in Volcanic Material in diverse Climatic Regions*, ISRIC, Soil Monograph 2, Wageningen, Niederlande.

MOKWUNYE, U., 1980: Interactions between Farmyard Manure and Fertilizers in Savanna Soils, in *FAO Soils Bulletin*, 43, p. 192-200.

MOLL, W., 1980: Der Verwitterungszustand des Bodens in den Tropen als begrenzender Faktor der Nutzung. Giessener Beitr. Entwicklungsf., in *Reihe I*, 6, p. 87-97.

REEUWIJK (VAN), L.P. (EDITOR), 1986: *Procedures for Soil Analysis*, ISRIC Technical Paper No. 9, Wageningen, Niederlande.

SIVAKUMAR, M. V. K.; SINGH, P.; WILLIAMS, J. H., 1987: Agroclimatic Aspects in Planning for Improved Productivity in Alfisols, in *Alfisols in the Semi-Arid Tropics, Proc. Consultants Workshop State of the Art and Manag. Altern. Optim. Prod. SAT Alf., 1-3 Dec. 1983*, ICRISAT, p. 15-30.

SMALING, E. M. A., 1993: *The soil Nutrient Balance: An Indicator of Sustainable Agriculture in Sub-Saharan Africa*, The Fertilizer Society, Paper read at the International Conference in Cambridge on 8-9 december 1993.

SRIVASTAVA, J. P.; TAMBOLI, P. M.; ENGLISH, J. C.; LAL, R.; STEWART, B. A., 1993: *Conserving Soil Moisture and Fertility in the Warm Seasonally Dry Tropics*, World Bank Technical Paper Number 221, Washington, D.C.

TURENNE, J.F., 1989: Soil Organic Matter and Soil Fertility in Tropical and Sub-Tropical Environments, in *Soils and their management. A Sino-european Perspective*, E. Maltby and T. Wollerson (editors), Elsevier, London and New York.

VIRMANI, S. M.; SIVAKUMAR, M. V. K; REDDY, S. J., 1980: Climatological Features of the SAT in Relation to the Farming System Program, in *Proc. Intern. Workshop Agroclimatological Research Needs of the Semi-Arid Tropics*, 22-24 Nov. 1978, ICRISAT, Hyderabad, A.P., India. p. 5-16.

Levantamiento nutrimental de los tepetates de México y Tlaxcala

Jorge D. Etchevers B., Hortensia Brito

Abstract

The chemical characteristics of materials locally known in Mexico as tepetates *have not been studied in detail. A soil nutritional survey was conducted to determine the frecuency distribution of the classes in which the values of these characteristics are grouped. Two of the most conspicuous areas exhibiting* tepetates *in Mexico Central Highlands, the northwest and northeast slopes of the Sierra Nevada in the States of Mexico and Tlaxcala, respectively, were considered in the present study. Only exposed* tepetates *susceptible of being ameliorated in the future were selected for sampling. A total of 101 samples (0 to 20 cm) of exposed non-cultivated* tepetates *were collected and analized for chemical variables related to soil fertility by conventional laboratory methods. In addition, six samples from ameloriated and cultivated tepetates terraces were also considered in this study.*

Moderately alkaline pH values were a common feature in most of the tepetates. *High pH values were attributed to the presence of moderate free calcium carbonate in these materials and were responsible of very low levels of DTPA extractable micronutrients.* Tepetates *had very low quantities of available Olsen-P but high concentrations of exchangeable bases.* Tepetates *of the type t2 and t3, classified as* tepetates *with* $CaCO_3$, *presented sustantially more extractable calcium than those without* $CaCO_3$, *although differences in the content of this material were not significant between both types. The calcium to magnesium ratio (1.6) was narrower than in normal soil. High levels of magnesium, particularly in the northwest slope, are related to the abundance of serpentine reported for* tepetates. *The exchangable potassium was well above the requirements of crops that potentially can be grown in the ameloriated* tepetates. *All exposed* tepetates *presented extremely low levels of organic matter and total nitrogen. Low levels of organic nitrogen are responsible for the scarce nitrogen supply capacity reported for these materials. Low organic matter, nitrogen, and phosphorus levels, as well as scarce availability of micronutrients must be remediated in the* tepetates *of the* Sierra Nevada *of Mexico if adequate plant growing conditions are to be attained after physical ammeloriation.*

Keywords: *Indurated Volcanic Soils - Soil Fertility - Chemical Characteristics - Nutrient Availability*

INTRODUCCIÓN

La distribución de las clases de frecuencia en que se ubican los índices de fertilidad del suelo y ciertas características químicas ligadas a esta última, no han sido establecidas con anterioridad en los tepetates de los estados de México y Tlaxcala. Ello dificulta la toma de decisiones para el manejo de los problemas nutrimentales que deben ser resueltos prioritariamente cuando estos materiales son habilitados e incorporados a la produccion agrícola. Los tepetates son materiales volcánicos endurecidos cuya problemática ha sido planteada por numerosos autores (Quantin, 1994; Quantin *et al.*, 1993).

Como se sabe, en ausencia de condiciones nutrimentales óptimas de cada elemento, opera la ley del mínimo (Tisdale *et al.*, 1985). Dicha ley y la lógica biológica señalan que los problemas de mayor gravedad y elevada frecuencia deben recibir atención preferencial, pues de no ser así, es imposible que los cultivos alcancen los rendimientos que el entorno físico (clima y otras condiciones de suelo) permiten.

La información necesaria para la toma de decisiones relacionadas con el mejoramiento del ambiente nutrimental en los tepetates no siempre está disponible, pero es posible generarla a través de un enfoque llamado levantamiento nutrimental de los suelos. Esta técnica es una herramienta de diagnóstico que consiste en recoger, de manera aleatoria o dirigida, muestras de suelo o de material vegetal en las diferentes unidades edáficas, agrosistemas, etc. identificables en una zona dada, procesarlas y analizarlas por métodos convencionales, para establecer finalmente la frecuencia con que se presentan las distintas clases de fertilidad (Etchevers *et al.*, 1986). Los límites de estas clases pueden decidirse arbitrariamente con base en la experiencia empírica o, si los procedimientos químicos utilizados en los análisis han sido previamente calibrados, es posible emplear los límites de clases así establecidos. Las clases deben cubrir todo el ámbito de variación del parámetro.

Del análisis de la frecuencia con que se manifiestan las clases de fertilidad es posible deducir los problemas nutrimentales y su magnitud, lo que permite diseñar las acciones más adecuadas para resolverlos.

Trabajos preliminares realizados con muestras de tepetates seleccionados, recogidas en un número reducido de sitios de la zona, indican que estos materiales cuentan con una baja cantidad de nitrógeno y fósforo disponibles, y que, además, cuando el pH es alcalino, presentan ciertas dificultades para abastecer adecuadamente de micronutrientes a las plantas (Cajuste y Cruz, 1987; Etchevers *et al.*, 1992; Etchevers y Ferrara-Cerrato, 1994; Ruiz, 1987). La escasa disponibilidad nutrimental es una situación que debe ser corregida cuando se aspira a obtener rendimientos cercanos a los máximos posibles que puede generar un agro-ecosistema.

El objetivo del presente estudio fue hacer un levantamiento nutrimental de los tepetates susceptibles de rehabilitación e incorporación a la producción silvoagropecuaria en los estados de México y Tlaxcala (México).

MATERIALES Y MÉTODOS

Las dos zonas con tepetates de interés para este estudio, se encuentran ubicadas: una en la vertiente noroccidental y, la otra, en la vertiente nororiental de la Sierra Nevada (entre 19° 15' y 19° 42' de latitud norte y 98° y 99° de longitud oeste), en los estados de México y Tlaxcala, respectivamente. La primera fue estudiada extensivamente por Peña y Zebrowski (citados por Quantin *et al.*, 1992) desde el punto de vista de su morfopedología, y la segunda por Werner (1988). Se trata de materiales desarrollados a partir de tobas volcánicas de más de 10.000 años de edad (Miehlich, 1991). La superficie de tepetates potencialmente aflorables

en ambas zonas es de aproximadamente 125.000 y 200.000 ha respectivamente. En la actualidad solo una parte de los tepetates están aflorados debido a procesos de erosión natural o inducida por el hombre. Los tepetates se ubican entre los 2.300 y los 2.900 m.s.n.m.. El clima de la zona de estudio es templado semi-seco, con una precipitación media anual de aproximadamente 700 mm, concentrada en los meses de verano, que es la época de cultivo.

En el sector noroccidental de la Sierra Nevada, en el estado de México, Peña y Zebrowski (1992) identificaron siete tipos de tepetates: brechas sedimentarias sin $CaCO_3$, tepetates del tipo t2 y t3 con y sin $CaCO_3$, tepetates ti (o no clasificables en los grupos anteriores) con $CaCO_3$ y terrazas agrícolas de tepetates recuperados. Por su parte, Werner (1988) identificó en la parte nororiental de dicha sierra, en el estado de Tlaxcala, los siguientes tipos de tepetates: D1 o tepetate gris claro, D2 o tepetate café-amarillo, D3 o tepetate café claro y D5 o tepetate gris. La clasificación anterior no es universalmente aceptada, pero los mapas de Werner (1988) fueron elaborados y los suelos muestrados en función de ella. Las características morfológicas de los tepetates han sido descritas por los autores recién mencionados y algunos rasgos químicos y biológicos por Etchevers *et al.* (1992) y Etchevers y Ferrara-Cerrato (1994). Las propiedades mineralógicas y micromorfológicas han sido estudiadas por Hidalgo (1995), Hessman (1992) y Alfaro *et al.* (1992).

Arbitrariamente, se decidió que se recogerían 70 muestras de la zona noroccidental y 31 de la zona nororiental, las cuales se distribuyeron proporcionalmente de acuerdo a la incidencia de la superficie de cada clase de tepetate representado en la superficie total de los tepetates del área. Como esta información no estaba totalmente disponible en la forma requerida, fue necesario, en primer término, reconstruir el mapa de los tepetates del estado de México. En los mapas de tepetates de México y Tlaxcala se identificó la ubicación geográfica exacta de los distintos tipos de estos materiales, y se procedió, utilizando un planímetro, a medir su superficie y a elaborar los mapas respectivos a escala 1:50.000. En el cuadro 1 se muestra la superficie de cada clase, el porcentaje relativo de su superficie y el número de muestras recogidas en cada caso.

Para la selección de las áreas específicas de muestreo, se colocó una cuadrícula de 5 x 5 cm sobre el mapa (a escala de 1:50 000 en el caso del estado de México y de 1:100.000 en el caso del estado de Tlaxcala) equivalente a 25 y 100 ha respectivamente, y con la ayuda de una serie de pares de números generados al azar, se procedió a ubicar las 101 áreas de muestreo. Cabe destacar que para la medición sólo se consideraron unidades de tepetates que estaban cartografiadas como unidades puras, es decir que no presentaban mezclas de los mismos. En cada área se seleccionó, a juicio del investigador, un punto de muestreo en una zona representativa de la misma, y se procedió a tomar de 10 a 15 submuestras para formar una muestra compuesta. La profundidad de muestreo fue de 0 a 20 cm. El material muestreado correspondió, excepto en las terrazas agrícolas, a sistemas naturales expuestos a la superficie (no enterrados) y no rehabilitados previamente para uso agrícola, que mostraban diversos grados de erosión, pendiente y vegetación natural.

El material recogido se secó al aire y a la sombra, se tamizó a través de una malla de 2 mm y luego se analizó para determinar el pH, la conductividad eléctrica (CE), la concentración de $CaCO_3$, la materia orgánica, el nitrógeno orgánico, el fósforo extraíble Olsen, las bases intercambiables y los micronutrientes. Los procedimientos analíticos utilizados fueron los rutinarios empleados en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos del Colegio de Postgraduados (Etchevers, 1988).

Los resultados de los análisis químicos fueron empleados para establecer las frecuencias con que se presentan las distintas clases de fertilidad en los tepetates de la zona

Cuadro 1
Superficie, porcentaje relativo de cada clase de tepetate y número de muestras recogidas por clase para el levantamiento nutrimental de los tepetates de la vertiente occidental en la parte norte de la Sierra Nevada (México y Tlaxcala)

Tipo de tepetate	Superficie (ha)	Porcentaje relativo (%)	Número de muestras (%)
Estado de México			
brecha	100	0,80	1
t2 con $CaCO_3$	2.608	20,94	14
t2 sin$CaCO_3$	2.430	19,51	14
t3 con $CaCO_3$	2.986	23,98	17
t3 sin $CaCO_3$	1.883	15,12	10
ti con $CaCO_3$	2.445	19,63	14
total tepetates aflorados	12.452	100,00	70
Tepetates recuperados (terrenos agrícolas)	1.230		6
Estado de Tlaxcala			
D1 gris claro	7.830	13,34	5
D2 café-amarillo	35.980	61,31	19
D3 café-claro	12.320	20,99	6
D4 gris	2.560	4,36	1
Total	58.690	100,00	31

noroccidental (estado de México) y nororiental (estado de Tlaxcala) de la Sierra Nevada. Los límites de las clases se establecieron arbitrariamente, pero apegándose a estándares referidos en la literatura (cuadro 2).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estado de México

Alrededor del 10 % de la falda noroccidental de la Sierra Nevada, que tiene una superficie del orden de 125.000 ha, corresponde a tepetates aflorados o en proceso de afloración. Esta zona se ubica en la porción norte del estado de México, entre los 2.300 y los 2.900 m.s.n.m. Además de los tepetates aflorados existen tepetates enterrados y, aproximadamente, entre 1.000 y 2.000 ha de terrazas cultivadas, construidas en tepetates rehabilitados.

En el cuadro 3 se presentan las medias, las desviaciones estándar y los rangos de las principales características químicas asociadas a la fertilidad de suelo para los tepetates de México.

Antes de comenzar el análisis de los resultados del cuadro 3 correspondiente a las características químicas de los tepetates el estado de México, es importante señalar que la nomenclatura adoptada en este trabajo, esto es, tepetates con y sin $CaCO_3$ que es la empleada por Peña y Zebrowski (1992), no parece reflejar la situación real respecto a la presencia de este mineral en los materiales en estudio, ya que todas las muestras analizadas, sin distinción de su clasificación, presentaron cantidades apreciables del mismo, aunque los t2 y t3 con $CaCO_3$ registraron porcentajes promedio ligeramente superiores a los llamados tepetates sin $CaCO_3$ (5,8 % frente a 4,8% repectivamente). Los tepetates con mayor concentración promedio de este mineral (7,1 %) resultaron ser los ti, es decir aquellos que

Cuadro 2
Límites arbitrarios de las clases de fertilidad empleados para establecer las correspondientes frecuencias

Características	Clase			
	1	2	3	4
pH	< 6,6	6,6 - 7,3	7,4 - 8,5	> 8,5
M.O. %	< 0,60	0,60 - 1,20	1,21 - 1,80	1,81 - 2,40
$CaCO_3$ %	> 3	3 - 6	6 - 9	< 9
K	< 0,2	0,2 - 0,3	0,3 - 0,6	0,6 - 1,3
Ca	< 2	2 - 5	5 - 10	> 10
Mg	< 0,5	0,5 - 1,3	1,3 - 3,0	> 3,0
Na	< 0,2	0,2 - 0,4	0,4 - 0,6	> 0,6
Fe	0 - 2	2 - 5	5 -10	> 10
Cu	< 0,5	0,5 - 1,0	1,0 - 1,5	> 1,5
Zn	< 0,5	0,5 - 1,0	1,0 - 1,5	> 1,5
Mn	> 2	2 - 5	5 - 10	10 - 20

P1	pH	CE	CC2	MO	N	K	Ca	Mg	Na	P	Fe	Cu	Zn	Mn
		(dSm-1)		(%)				(cMkg-1)				(ppm)		
t2 con $CaCO_3$														
X	7,8	0,21	5,8	0,49	0,04	1,2	19,6	10,8	1,0	1,0	4,0	0,6	0,5	8,0
S	2,1	0,22	2,5	0,19	0,01	0,5	11,9	4,0	0,8	0,8	0,8	0,2	0,3	4,7
R	1,2	0,33	6,0	0,66	0,03	1,2	34,5	11,4	2,7	2,7	5,4	0,6	1,0	14,0
t2 sin $CaCO_3$														
X	7,6	0,20	5,2	0,43	0,03	0,8	13,1	10,6	1,4	1,4	7,0	0,6	1,0	8,0
S	2,0	0,14	1,5	0,15	0,01	0,8	4,6	3,6	0,8	0,8	5,0	0,3	0,4	4,5
R	1,4	0,32	3,0	0,27	0,03	1,3	11,1	10,1	1,8	1,8	15,2	0,6	1,4	10,4
t3 con $CaCO_3$														
X	8,0	0,20	5,8	0,41	0,03	1,0	24,0	12,3	1,1	1,1	4,0	0,6	0,5	4,0
S	1,9	0,17	2,4	0,16	0,01	0,7	14,2	4,5	0,7	0,7	2,7	0,3	0,3	1,5
R	1,8	0,32	6,1	0,47	0,02	1,6	42,8	15,0	2,5	2,5	11,3	0,6	0,8	3,8
t3 sin $CaCO_3$														
X	7,7	0,16	4,3	0,50	0,03	0,7	13,2	9,1	1,2	1,2	6,0	0,6	1,0	10,0
S	2,3	0,07	1,6	0,21	0,01	0,6	4,6	3,2	0,7	0,7	2,1	0,2	0,3	4,3
R	1,2	0,86	2,4	0,66	0,02	1,2	8,05	5,5	1,6	1,6	3,8	0,4	0,8	9,0
ti con $CaCO_3$														
X	8,1	0,13	7,1	0,41	0,04	1,2	33,3	11,2	0,8	0,8	3,0	0,6	0,5	5,0
S	2,1	0,04	2,6	0,14	0,01	0,6	19,2	3,5	0,4	0,4	1,9	0,2	0,2	3,5
R	1,2	0,06	7,6	0,26	0,02	1,6	29,8	7,6	1,2	1,2	3,8	0,4	0,4	13,8
Brecha														
X	8,0	0,08	3,9	0,37	0,04	1,3	12,1	10,1	1,4	1,4	4,8	0,8	0,6	6,0

1: Parámetros: X = media; S = desviación estándar; R = rango
2: carbonato de calcio

Cuadro 3 - Medias, desviaciones estándar y rangos de las principales características químicas asociadas con la fertilidad en tepetates aflorados en la vertiente occidental de la parte norte de la Sierra Nevada, en el estado de México

no pudieron ser clasificados en los grupos t2 o t3 durante el levantamiento. La dispersión de los valores de $CaCO_3$ alrededor de la media fue mucho mayor en el caso de los tepetates llamados con $CaCO_3$ que en los sin este mineral (2,5 frente a 1,6 %).

La presencia de $CaCO_3$ en los tepetates se reflejó claramente en los valores de pH. Las muestras de tepetates t2, t3 y ti con $CaCO_3$ registraron un pH promedio de 8,0, mientras que los t2 y t3 sin ese mineral alcanzaron un pH de 7,6. En términos generales, la desviación estándar del pH no varió mucho en los diferentes tipos de tepetates, siendo de aproximadamente 2.

El $CaCO_3$ y el pH influyeron marcadamente en el calcio y el magnesio extraíbles en acetato de amonio 1N pH 7. Dichos valores no pueden ser considerados como correspondientes a formas intercambiables de estos elementos, puesto que la presencia de carbonatos libres en los tepetates indica que parte de lo extraído provino de estos últimos. La concentración media de calcio extraíble en los tepetates t2, t3 y ti con $CaCO_3$ fue sustancialmente superior que en los tepetates t2 y t3 sin carbonato (25,6 frente a 13,1 $cMkg^{-1}$). La diferencia entre ambos grupos de materiales en el caso del magnesio fue insignificante (11,4 frente a 9,1 $cMkg^{-1}$) y no hubo diferencia en el caso del potasio extraíble. La media de potasio intercambiable de todos los tipos de tepetates fue de 1,1 $cMkg^{-1}$. Las cantidades de cationes extraíbles son suficientes para sostener la producción de cultivos en todos estos suelos. El sodio extraíble es, en promedio, ligeramente superior a 1 $cMkg^{-1}$, pero se estima que no ofrece ningún peligro dados los elevados niveles de calcio y magnesio presentes en dichos materiales. La relación calcio/magnesio (promedio de 1,88) es relativamente estrecha, en tanto que la relación calcio/potasio se considera muy amplia. La corrección de estas relaciones se juzga difícil en estos suelos, pero ellas no deberían plantear mayores dificultades para alcanzar los niveles modestos de producción que marca el potencial de esta zona.

La presencia de carbonatos libres y los pH alcalinos de los tepetates afectaron la disponibilidad de los micronutrientes, particularmente la de hierro, cinc y manganeso en los tepetates t2, t3 y ti con $CaCO_3$. Los promedios de hierro, manganeso, cinc y cobre extraíbles en DTPA en los tepetates con y sin $CaCO_3$. fueron de 3,7 y 6,5, 5,7 y 9, 0,5 y 1,0, 0,6 y 0,6 ppm respectivamente, valores considerados bajos e insuficientes para alcanzar rendimientos económicamente aceptables. En consecuencia, el control del suministro de micronutrientes se considera una práctica agronómica que debe recibir especial atención en la eventualidad de incorporar estos tepetates a la producción. Los niveles de cobre presentados en este trabajo se consideran sobrestimados, debido a limitaciones del procedimiento experimental y se intuye que son bastante menores en la realidad.

Los porcentajes de materia orgánica y nitrógeno observados en los tepetates expuestos, no cultivados, se consideran muy bajos. Vienen a confirmar observaciones previas realizadas en sitios específicos o empleando un número limitado de muestras (Etchevers *et al.*, 1992). Esta situación debe considerarse como la limitante máxima en los planes de incorporación de los tepetates a la producción agrícola, puesto que la materia orgánica es la responsable de proveer la fuente de carbono para la biomasa microbiana del suelo, componente esencial en los procesos de la vida del mismo, además de ser una fuente de nutrimentos para las plantas y de moléculas orgánicas residuales que desempeñan un papel importante en la estructuración de los componentes del suelo. Dichas moléculas son el producto residual de la actividad metabólica de los microorganismos. López (1995) midió el carbono y nitrógeno asociados a la biomasa microbiana en tepetates y los comparó con los valores observados en suelos agrícolas con distinto potencial productivo, encontrando una relación directa y lineal entre ambos factores. La necesidad de incrementar los niveles de actividad de los microorganismos en los tepetates ha sido señalada por Álvarez (1992), Etchevers y Ferrara-Cerrato (1994) y Gutiérrez (1994).

En las figuras 1, 2 y 3 se presenta la distribución frecuencial de las diferentes clases de valores en que arbitrariamente se dividió cada una de las variables químicas asociadas a la fertilidad de los tepetates. En términos generales, se observa que el mayor número de valores de pH se concentró en las clases alcalinas (superiores a pH 7,4). Esta situación es responsable de la elevada frecuencia de valores bajos de todos los micronutrientes. Los porcentajes de materia orgánica se ubicaron preferentemente en las clases con valores bajos de este parámetro, lo que significa que los tepetates son muy pobres en componentes orgánicos residuales (la gran mayoría con porcentajes menores al 0,6 %). Los porcentajes de $CaCO_3$ fueron superiores a 10, valores considerados elevados. Las concentraciones de calcio y magnesio extraíbles se ubicaron en las clases elevadas de estos elementos (> 10 y > 3 $cMkg^{-1}$ respectivamente), al igual que la de potasio intercambiable, aunque la distribución de este elemento fue un tanto más amplia, ya que abarcó las tres clases superiores. De cualquier modo, la situación del potasio intercambiable no debe ser motivo de preocupación en estos tepetates, ya que existe en cantidades suficientes para abastecer a los cultivos que en ellos se establezcan. Las concentraciones de micronutrimentos fueron muy bajas, debido a que, como ya se indicó, los valores de pH y de $CaCO_3$ son elevados.

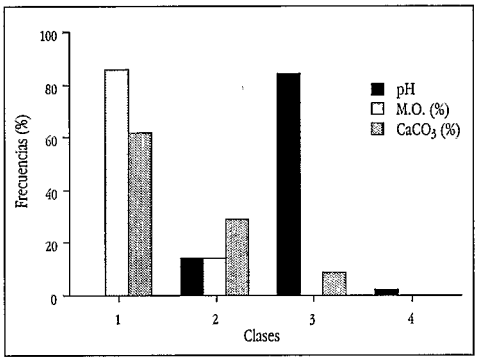


Figura 1 - Clases de pH, materia orgánica y carbonatos de calcio en tepetates del estado de México

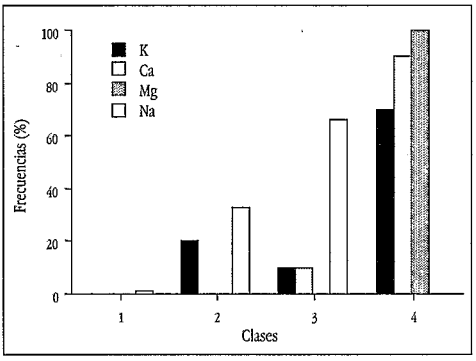
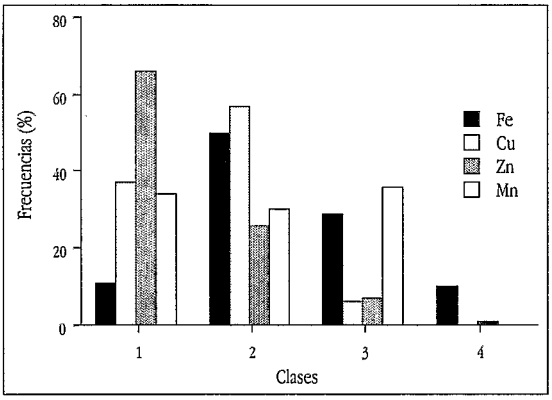


Figura 2 - Clases de bases intercambiables en tepetates del estado de México

Figura 3 - Clases de micronutrientes en tepetates del estado de México



En el cuadro 4 se presentan los resultados de los análisis practicados en las muestras de tepetates recuperados y dedicados a la producción agrícola en el estado de México.

Años[1]	pH	CE (dSm-1)	Ca[2] (%)	MO (%)	N (%)	K (cMkg-1)	Ca (cMkg-1)	Mg (cMkg-1)	Na	P (ppm)	Fe (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Mn (ppm)
1	7,6	0,16	3,6	1,6	0,07	1,3	6,9	5,8	0,16	8	8	1,0	0,5	12
5	8,3	0,46	5,2	1,1	0,19	1,2	23	8,0	0,86	10	6	0,6	1,3	8
16	7,8	0,26	7,1	2,7	0,1	1,4	27,7	8,2	0,58	9	8	1,0	0,5	8
16	6,8	0,11	4,0	2,3	0,18	1,1	14,6	7,7	0,31	12	9	1,6	0,8	26
21	6,5	0,05	4,4	1,8	0,07	0,8	4,9	6,3	0,34	7	7	0,6	0,5	13
46	6,1	0,08	6,7	2,0	0,11	1,0	6,9	5,8	0,4	4	9	1,0	0,8	32
X	7,2	0,14	5,1	1,9	0,11	1,2	10,8	7,0	0,49	9	8	1,0	0,7	10
S	0,9	0,15	2,2	0,6	0,05	0,2	9,5	1,1	0,21	3	1	0,4	0,3	13
R	2,2	0,41	3,7	1,6	0,12	0,6	22,8	2,4	0,55	8	3	1,0	0,8	24

1: años de cultivo; 2: carbonato de calcio

Cuadro 4 - Algunas características químicas de tepetates recuperados e incorporados a la producción agrícola en la vertiente occidental de la parte norte de la Sierra Nevada, en el estado de México

La fertilidad de los tepetates recuperados y cultivados difiere de la de los tepetates aflorantes no cultivados en varios aspectos. Primeramente, se observa, en términos generales, un descenso del pH a medida que aumenta el número de años de cultivo, probablemente por la pérdida de bases debido al proceso extractivo que realizan las plantas y por el fenómeno erosivo a que están sujetas estas terrazas. En segundo lugar, la adición de materia orgánica que generalmente realizan los productores y los residuos de las raíces de los cultivos que establecen, se refleja en un aumento moderado de la materia orgánica y el nitrógeno total. El tercer cambio sustancial se observa en la concentración de fósforo disponible, la cual aumenta como consecuencia de la fertilización fosfatada y del efecto residual de la misma. También se observó una ligera tendencia del potasio intercambiable a disminuir con los años de cultivo. El resto de los elementos analizados no experimentó cambios de mayor trascendencia. Como conclusión se puede señalar que los tepetates recuperados y cultivados, evolucionan, desde un punto de vista nutrimental hacia suelos normales a medida que aumentan los años de explotación.

Estado de Tlaxcala

Los tepetates en Tlaxcala constituyen aproximadamente el 50 % de los suelos del estado, es decir, cerca de 200.000 ha y se encuentran principalmente enterrados, la mayoría a menos de 50 cm, con muchas posibilidades de aflorar, de continuar el proceso erosivo con las tasas actuales. La superficie de tepetates puros medida en el mapa propuesto por Werner (1988) fue cercana a las 60.000 ha, pero esta cifra es dinámica.

En el cuadro 5 se presentan los resultados analíticos de los análisis practicados en las muestras superficiales (0 a 20 cm) de los tepetates expuestos del estado de Tlaxcala. Estos presentaron, en general, las mismas características químicas que los del estado de México. La única diferencia que vale la pena destacar es que las concentraciones promedio de calcio y magnesio extraíbles en acetato de amonio tienden a ser ligeramente inferiores, pero aquellas de potasio ligeramente superiores.

P[1]	pH	CE (dSm-1)	Ca[2] (%)	MO (%)	N (%)	K (%)	Ca	Mg (cMkg-1)	Na (ppm)	P (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Mn (ppm)
D1 Gris claro													
X	7,3	0,12	5,9	0,5	0,03	1,9	11,0	11,4	0,97	3,0	0,7	0,4	3,3
S	0,3	0,14	0,43	0,3	0,01	0,4	3,9	0,9	0,11	0,4	0,2	0,0	4,1
R	0,7	0,35	1,1	0,5	0,03	1,0	9,5	2,3	0,24	1	0,3	0,0	9,0
D2 Café amarillo													
X	7,0	0,1	5,7	0,5	0,03	1,5	8,0	7,8	0,77	5,0	0,7	0,4	7,8
S	0,7	0,15	0,9	0,5	0,02	0,5	3,8	4,1	0,45	3,2	0,2	0,3	7,2
R	2,5	0,53	4,2	2,1	0,06	2,2	11,0	17,8	1,74	14	0,9	1,6	26,6
D3 Café claro													
X	8,1	0,17	5,6	0,5	0,02	1,8	8,2	7,4	0,72	3,0	0,6	0,4	2,8
S	0,6	0,27	0,5	0,14	0,01	0,4	5,5	4,6	0,98	2,7	0,2	0,1	5,5
R	1,5	0,67	1,5	0,4	0,03	0,8	15,0	12,8	2,61	7,0	0,3	0,2	14,8
D4 Gris													
X	7,6	0,08	5,8	0,5	0,04	1,9	12,0	10,1	0,55	4,0	0,4	0,4	1,0

1: Parámetros: X = Media; S = desviación estándar; R = rango
2: carbonato de calcio

Cuadro 5 - Medias, desviaciones estándar y rangos de las principales características químicas asociadas con la fertilidad de los tepetates del estado de Tlaxcala

En las figuras 4, 5 y 6 se presenta la distribución frecuencial de las diferentes clases de valores en que arbitrariamente se dividió cada una de las variables químicas asociadas a la fertilidad de los tepetates de este estado.

En términos generales, se observa que el mayor número de valores de pH se concentró en las clases alcalinas (superiores a pH 7,4). Se supone que esta situación, al igual que en el estado de México, es la responsable de la elevada frecuencia de valores bajos de todos los micronutrientes. Los porcentajes de materia orgánica se ubicaron en las clases con valores bajos de este parámetro. Estos resultados reafirman que los tepetates son muy pobres en componentes orgánicos residuales (la gran mayoría con porcentajes

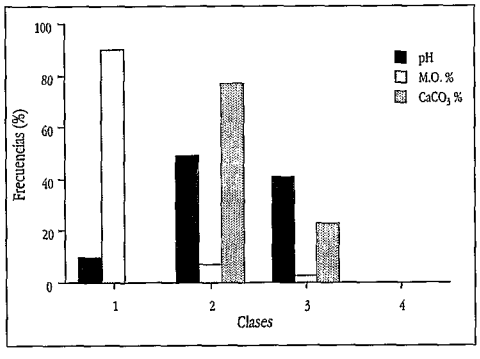


Figura 4 - Clases de pH, materia orgánica y carbonatos de calcio en tepetates del estado de Tlaxcala

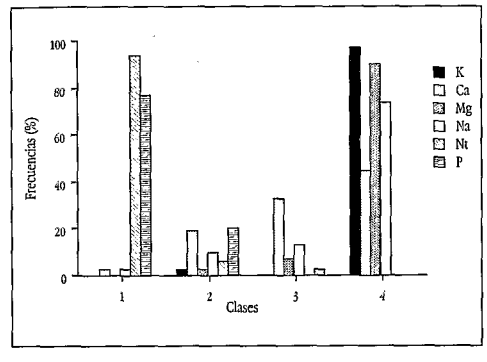


Figura 5 - Clases de macronutrientes en tepetates del estado de Tlaxcala

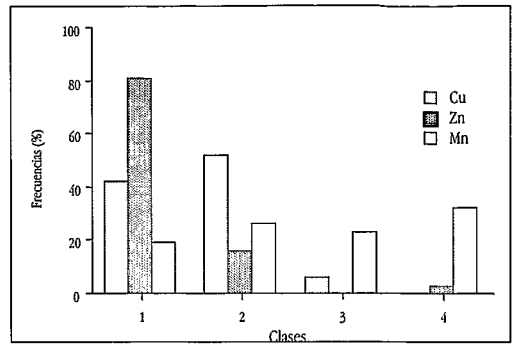


Figura 6 - Clases de micronutrientes en tepetates del estado de Tlaxcala

menores al 0,5%). Los porcentajes $CaCO_3$ fueron superiores al 10 %, valores considerados elevados. Las concentraciones de calcio y magnesio extraíbles en acetato de amonio se ubicaron en las clases elevadas de estos elementos (> 10 y > 3 $cMkg^{-1}$ respectivamente), pero fueron ligeramente inferiores a las observadas en el estado de México. En contraste, el potasio intercambiable fue, en general, ligeramente más elevado y se concentró principalmente solo en la clase alta. Este elemento no debe ser motivo de preocupación en estos tepetates, ya que existe en cantidades suficientes para abastecer a los cultivos que en ellos se establezcan. Las concentraciones de micronutrimentos fueron muy bajas, debido a que, como ya se indicó, los valores de pH y de $CaCO_3$ fueron elevados.

CONCLUSIONES

De los resultados presentados se deduce que el control de deficiencias de nitrógeno y fósforo es una de las principales actividades a desarrollarse durante el proceso de la habilitación de los suelos volcánicos endurecidos de los estados de México y Tlaxcala. Los niveles de estos elementos en su forma disponible en el suelo son insuficientes para producir cualquier tipo de cultivo. Parte importante de la situación anterior se deriva de la limitada presencia de materia orgánica en los tepetates expuestos de estas zonas. Este aspecto requiere especial atención porque no es posible pensar en mejorar las condiciones para la producción agrícola sin incrementar los porcentajes de materia orgánica, la misma que, además de proveer los nutrientes en déficit y otros esenciales, contribuye significativamente a mejorar algunas propiedades físicas del suelo relacionadas con su productividad. La situación de los micronutrimentos también debe ser abordada con especial énfasis, ya que en muchos tepetates, debido a su condición de pH ligeramente alcalino motivado por la presencia de carbonato de calcio libre, se presentan concentraciones de los mismos consideradas bajas, es decir inadecuadas para el crecimiento de los cultivos agrícolas de la zona. Consecuentemente, otra actividad que se debe desarrollar para mantener una fertilidad adecuada en los tepetates es el control y mejoramiento de la situación micronutrimental. Los resultados anteriores vienen a confirmar la información generada por la observación de un número limitado de casos por autores como Etchevers *et al.* (1992), Etchevers y Ferrera-Cerrato (1994) y los reportes publicados por Ruiz (1987), proporcionando información valiosa para establecer las prioridades de atención en el estudio de los diferentes problemas nutrimentales.

Referencias bibliográficas

ALFARO, G.; OLESCHKO, K.; MEZA, M., 1992: Rasgos micromorfológicos de los tepetates de Hueypoxtla (estado de México), en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 253-257

ÁLVAREZ S., J. D., 1992: *Manejo agroecológico y actividad microbiana en la recuperación de tepetates*, Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, 123 p.

CAJUSTE, L. J.; CRUZ, J., 1987: Evaluación de los micronutrientes en maíz criollo (*Zea mays*) en suelos con influencia de tepetate calcáreo, en *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*, J. F. Ruiz F. (editor), Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México, p. 95-104.

ETCHEVERS B., J. D., 1988: Análisis químico de suelos y plantas, Notas de clases, Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

ETCHEVERS B., J. D.; CRUZ, J.; MARES J.; ZEBROWSKI, C., 1992. Fertilidad de los tepetates. I. Fertilidad actual y potencial de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada (México), en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 379-384

ETCHEVERS B., J. D.; FERRRERA-CERRATO, R., 1994: Fertilidad de los suelos volcánicos endurecidos: características químicas y microbiológicas de los tepetates en México, en *Transactions of the 15th World Congress of Soil Science*, Acapulco, México, Vol. 6a, p. 571-591.

ETCHEVERS B., J. D.; TRINIDAD, A.; GUERRERO, S.; PÉREZ, A.; GARCÍA, D.; MORFÍN, G., 1985: Levantamiento nutricional del maíz en la Sierra Tarasca de Michoacán, en *Agrociencia*, 60, México, p. 145-154.

GUTIÉRREZ, O. A., 1994: *Los microorganismos como un indicador en la recuperación de tepetates en el estado de Tlaxcala*, Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, 117 p.

HEßMANN, R., 1992: Micromorphological Investigations on «Tepetates» Formation in the «Toba» Formation-Sediments of the State of Tlaxcala (México), en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 145-155.

HIDALGO, C., 1995: Étude d'horizons indurés à comportement de fragipan, appelés «tepetates», dans les sols volcaniques de la vallée de Mexico, Thèse de Doctorat en Pédologie, Université Henri Poincaré, U.F.R. Sciences & Techniques de la Matière et des Procédés, Nancy, France, 215 p.

LÓPEZ, U., 1995: *El C, N y P de la biomasa microbiana en suelos con diversos manejos*, Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, 158 p.

MIEHLICH, G., 1991: *Chronosequences of Volcanic Ash Soils*, Hamburger Bodenkundl. Arbeiten, 15, 207 p.

QUANTIN, P., ARIAS H. M.; ETCHEVERS B., J. D.; FERRERA-CERRATO, R.; OLESCHKO, K.; NAVARRO, H.; WERNER, G.; ZEBROWSKI, C., 1993: *Terra*, Vol. 11 (número especial: Tepetates de México, caracterización y habilitación para la agricultura), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, 72 p.

QUANTIN, P., 1994: Intoduction to the knowlwdge and management of indurated volcanic soil horizons, in *Transactions of the 15th World Congress of Soil Science*, Acapulco, México, Vol. 6a, p. 436-444.

RUIZ, J. F. (editor), 1987: *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*, Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos, Chapingo, México, 221 p.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D., 1985: *Soil Fertility and Fertilizers*, 4th edition, MacMillan Publishing Co., New York, 754 p.

WERNER, G., 1988: *Los suelos en el estado de Tlaxcala, altiplano central mexicano*, Gobierno del estado de Tlaxcala-Universidad Autónoma de Tlaxcala, Tlaxcala, México.

Dinámica de la materia orgánica y el N en tepetates habilitados para la producción agrícola

Jorge D. Etchevers B., María Antonia Pérez, Hermilio Navarro G.

Abstract

Nitrogen is the most limiting factor for plant growth in ameliorated tepetates. *Due to their particular soil physical characteristics,* tepetates *are sparsely vegetated in their natural conditions which explains the low levels of soil organic reserves they exhibit. Traditional production systems implemented by local farmers in Mexico do not promote the accumulation of organic reserves in the soil. In addition to naturally low biomass production due to scarce and irregular rainfall and physical and chemical constraints, farmers harvest most of the aerial residues of the crop, leaving only a small portion of stacks and roots in the field. The objective of the present work was to evaluate the amount of residue left in the field by farmers working these ameliorated* tepetates.

Maize average yield was estimated on 1,300 kg/ha (3,000 kg/ha of above ground biomass) under local production conditions. Average root and stalk residues were 290 and 440 kg/ha which represent a nitrogen input of 2 and 4 by of N, respectively. These figures are considered as extremely low inputs. The maize traditional production system implemented by farmers in rehabilitated tepetates *of the state of Mexico is not helpful in the restoration of organic nitrogen pools in the soils.*

Keywords: *Indurated Volcanic Soils - Mexico - Tlaxcala - Nitrogen Mineralization - Residue Decomposition*

INTRODUCCIÓN

La escasez de tierras de cultivo y el acelerado crecimiento de la población hacen necesario considerar la recuperación de la mayor cantidad de suelos degradados que han llegado a esta condición ya sea por razones naturales o por acción del hombre. Entre los suelos degradados que ocupan una superficie importante en el estado de México, se encuentran los tepetates (Zebrowski, 1992). La incorporación de estos materiales a la producción permitiría ampliar la frontera agrícola, contibuyendo así a disminuir la presión social por suelos de cultivo y a aumentar la producción de alimentos para la población, particularmente la que habita las zonas de suelos degradados, caracterizada por sus bajos ingresos (Navarro *et al.*, 1995).

Los tepetates se localizan generalmente en regiones de clima subhúmedo donde las estaciones son bien marcadas (Zebrowski, 1992). Dubrœucq *et al.* (1989) plantean que existe una estrecha relación entre las zonas climáticas y la distribución de los tepetates.

Entre los principales problemas para la rehabilitación de estos substratos se encuentran algunas de sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Ellos se caracterizan por un contenido casi nulo de algunos nutrimentos, principalmente nitrógeno y fósforo (Etchevers *et al.*, 1992; Etchevers y Ferrera-Cerrato, 1994) y por su limitada capacidad de almacenamiento de agua, no porque carezcan de porosidad, sino porque sus poros son sumamente pequeños y discontinuos.

Para su explotación agrícola, es necesario roturarlos a fin de mejorar sus características físicas y elevar su capacidad de suministro de nutrimentos, principalmente nitrógeno y fósforo, mediante la aplicación de fertilizantes químicos inorgánicos o de materia orgánica.

Dada la importancia del nitrógeno para la nutrición de los cultivos, es necesario estudiar su dinámica, esto es, conocer y cuantificar los reservorios naturales de ese elemento en el substrato natural y los flujos y tasas de los procesos que se llevan a cabo al adicionar cualquier tipo de materia orgánica, ya sea en forma de residuos de cultivos o bien mediante estiércoles, así como medir el efecto del manejo agronómico de estos materiales (profundidad de incorporación, cantidad, etc).

Los aspectos anteriormente indicados son de gran importancia para lograr un manejo sustentable del sistema fertilidad del suelo. En el caso del nitrógeno, ello significa que la cantidad de fertilizante que se agregue al suelo debe ser la necesaria para satisfacer la demanda de este nutrimento generada por el cultivo, sin afectar el equilibrio ecológico con sobredosis de materiales nitrogenados. Estas últimas provocan gastos innecesarios y contaminan el entorno, ya que el nitrógeno que se pierde desde el suelo por erosión o lixiviación tiene como destino final los cuerpos naturales de agua, y aquel que se desnitrifica contribuye a la formación de óxidos de nitrógeno que escapan hacia la atmósfera. Sin embargo, la adición de nitrógeno en cantidades menores a las requeridas por los cultivos trae como consecuencia restricciones en la función de producción, lo cual se refleja en la obtención de rendimientos menores a los posibles y por lo tanto en una disminución en los ingresos de los productores. De ahí la necesidad de mantener un equilibrio entre la demanda del cultivo y el suministro por parte del suelo.

Los autores del presente trabajo desconocen de algún estudio de la dinámica del nitrógeno en los tepetates, por lo que se propusieron estudiar algunos detalles de este proceso. Esta investigación es parte de un proyecto de mayor alcance, cuyo objetivo general es analizar varios aspectos de la dinámica del nitrógeno en los tepetates. En este trabajo se presentan las situaciones de las entradas de nitrógeno por concepto de los residuos del cultivo del año anterior, la descomposición de ellos bajo condiciones de campo y el nitrógeno mineralizable *in vitro* y en campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio se ubica en la parte media de la ladera noroccidental de la Sierra Nevada, en el estado de México, entre los 98° 45' y 98° 50' de longitud oeste y los 19° 27' y 19° 32' de latitud norte, en las cercanías de las siguientes comunidades: San Miguel Tlaixpan, San Pablo Ixayoc y Tequesquinahuac, a una altura que va de 2.300 a 2.900 m.s.n.m. La precipitación en la zona es de aproximadamente 700 mm y se concentra principalmente entre junio y septiembre. La temperatura media durante la estación de crecimiento es de 16° C.

La agricultura que se practica en los tepetates del área de estudio es agricultura de temporal (pluvial), siendo los principales cultivos maíz, frijol, cebada, haba, algunas especies ornamentales (agapando, crisantemo, azucena, cempoalxuchitl, etc.) o bien frutales como ciruela, durazno, tejocote, manzana, etc. Estos últimos representan una proporción limitada de la superficie cultivada.

En el cuadro 1 se presenta la ubicación de los sitios experimentales, los años de cultivo y el cultivo establecido en los mismos.

Cuadro 1 - Ubicación, edad y cultivo de las parcelas de agricultores en los ejidos de estudio

Productor	Edad del tepetate (años)	Cultivo actual	Comunidad
HNT1-0	0	trigo	San Miguel Tlaixpán
HNT4-0	0	trigo	San Miguel Tlaixpán
CPT4-3	3	maíz	San Miguel Tlaixpán
CPT6-3	3	maíz	San Miguel Tlaixpán
RFT2-5	5	maíz-haba	Tequexquinahuac
CL-10	10	frijol	Tequexquinahuac
ER-10	10	agapando	San Pablo Ixayoc
RF-10	10	maíz-haba	Tequexquinahuac
RS-16	16	maíz	San Pablo Ixayoc
LS-16	16	maíz	San Pablo Ixayoc
AP-16	16	maíz	San Pablo Ixayoc
ER-21	21	maíz	San Pablo Ixayoc
RF-22	22	maíz-haba	Tequexquinahuac
IG-35	35	maíz	San Pablo Ixayoc
SG-46	46	maíz	San Pablo Ixayoc
CS-60	60	maíz	San Pablo Ixayoc

Durante el ciclo 1995, se eligieron en cada uno de los sitios indicados en el cuadro 1, tres áreas de muestreo de 3 m de largo por 0,8 m de ancho. En estas parcelas, las plantas estuvieron sometidas a competencia total. A la cosecha, se midieron en ellas algunos componentes del rendimiento: número de matas por hectárea, número de plantas por hectárea, número de mazorcas por hectárea, peso de las mismas, biomasa aérea y rendimiento de grano y paja. En trigo se seleccionaron 10 parcelas de muestreo de 50 por 40 cm cada una, que constituyeron un área de muestreo de 2 m^2. Al igual que para el maíz se determinaron las componentes principales del rendimiento: número de tallos, número de espigas, peso de grano, materia seca total. En una de estas subparcelas se procedió a recoger, después de la cosecha, tres monolitos de aproximadamente 20 x 20 x 25 cm. En el caso del maíz, el monolito central contenía los tocones y las raíces de una «mata» de maíz, es decir los residuos de los tallos de varias plantas sembradas al mismo tiempo, que el productor deja después de la cosecha. En las muestras de suelo también se encontraban las raíces de las malezas que en algún momento se desarrollaron en esta superficie, así como residuos del cultivo anterior, que fueron incorporados al suelo. Los

tocones, una vez separados de la raíz al nivel de la superficie del suelo y secados a 70 °C, se utilizaron para estimar los residuos de la parte aérea que el productor dejó en el campo. Los monolitos fueron colocados en remojo en agua por 24 horas y mediante un suave chorro se procedió a separar el suelo de los residuos orgánicos (Boehm, 1979). Los residuos orgánicos frescos en el suelo y los tocones fueron considerados como los aportes más significativos al sistema nitrógeno.

Al finalizar el ciclo 1995, se realizó un segundo muestreo de suelo en los sitios seleccionados con el propósito de cuantificar los reservorios de nitrógeno, su tamaño y sus tasas de mineralización. Se tomaron de 0 a 20 submuestras a una profundidad de 20 cm, para conformar una muestra compuesta por sitio, cada una de las cuales se secó en charola de aluminio a temperatura ambiente. Posteriormente, el suelo se tamizó a través de una malla # 20.

Las constantes de mineralización se determinaron mediante la metodología de Stanford y Smith (1972), que consiste en incubar aeróbicamente muestras de suelo a capacidad de campo y 35 °C, lo que permite la estimación del nitrógeno potencialmente mineralizable y la constante de mineralización (k). El procedimiento original se modificó en los siguientes aspectos: en lugar de usar los embudos de incubación descritos por los autores, se utilizaron jeringas de 60 c.c. en cuyo fondo se colocó 1 g de lana de vidrio, posteriormente 10 g de arena de río lavada y tamizada con malla # 30, una mezcla de 15 g de suelo tamizado a través de malla # 20 con 15 gramos de arena de río lavada y tamizada también con malla # 20. Sobre esta capa se agregaron 10 g de arena tamizada con malla # 20 y por último 1 g de lana de vidrio para cubrir el suelo. Las extracciones se realizaron con un aparato tipo Centurión empleando dos ciclos continuos de extracción, de 50 ml cada uno, a una velocidad de 1 ciclo/hora.

Antes de iniciar la incubación se realizó un lavado de todo el material colocado en las jeringas, con el propósito de lixiviar los nitratos y el amonio que pudiera contener. Este lavado se realizó con 100 ml de una solución de $CaCl_2$ 0,01 M.

La mezcla de las jeringas se llevó a capacidad de campo y se pesó, colocándola luego a incubar a 35 °C durante 17 semanas. La humedad se mantuvo a capacidad de campo mediante un método gravimétrico, adicionando agua cada tercer día.

Las extracciones del nitrógeno mineralizado se realizaron al cumplirse 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 14 y 17 semanas de incubación. Para ello se adicionaron primeramente 35 ml de la solución extractora de $CaCl_2$ 0,01 M ya que la jeringa no podía contener un volumen mayor, y se inició el ciclo de extracción. Posteriormente, en cuanto existió espacio en la jeringa que contenía la muestra, se agregaron los 15 ml restantes del primer ciclo. Se repitió el procedimiento en un segundo ciclo para completar los 100 ml correspondientes a la extracción. Se cuidó de que no se generase vacío entre una aplicación y otra. El lixiviado de la jeringa se recogió en frascos.

Al finalizar cada extracción, se agregaron 25 ml de la solución nutritiva libre de nitrógeno, recomendada por Standford y Smith (1972) y constituida por los siguientes componentes: 0,002 M de $CaSO_4$ H_2O; 0,002 M de $MgSO_4$; 0,005 M de $Ca(H_2PO_4)$ $2H_2O$ y 0,0025 M de K_2SO_4. La solución fue preparada el mismo día de la extracción y su propósito fue restituir las substancias nutritivas perdidas en el proceso de lavado. El exceso de esta solución fue extraído con el aparato descrito. En algunas ocasiones, fue necesario extraer manualmente el remanente de la solución en la jeringa, halando el émbolo de esta. La muestras se ajustaron a capacidad de campo con agua después de cada extracción.

Para la cuantificación del nitrógeno inórganico mineralizado, que se extrajo mediante el lavado, se utilizó el método del arrastre de vapor descrito por Bremner (1965),

con óxido de Mg y aleación de Devarda. El amonio destilado se recogió en una mezcla de ácido bórico más indicadores. La valoración se hizo por titulación con H_2SO_4 y se calculó la concentración de nitrógeno nítrico y amoniacal.

Con los resultados de nitrógeno mineralizado acumulado (ppm) durante el tiempo de incubación (semanas) se estimó el nitrógeno potencialmente mineralizable, correspondiente a los reservorios de lábil, y el estabilizado. Se supuso que el primero correspondió al nitrógeno mineralizado acumulado en las 5 primeras semanas de incubación y el segundo al nitrógeno mineralizado de la semana 6 a la 17.

Para la evaluación de la pérdida de peso de los residuos en el campo y la tasa de mineralización de los residuos, se recogieron residuos aéreos y de raíces de la cosecha anterior que habían quedado en el campo. La metodología empleada para esta fase fue la propuesta por Westermann y Crothers (1980) que consiste en exponer las muestras de residuos, colocadas en bolsas de malla plástica, a la acción de los agentes mineralizantes. Parte de las bolsas fue enterrada y otra se colocó en la superficie, con el propósito de diferenciar las velocidades de descomposición de los residuos de raíces y los aéreos. La pérdida de peso de las bolsas se determinó mensualmente.

Para la medición de la mineralización de los residuos de raíces se emplearon bolsas de malla de 10 x 15 cm en las que se colocaron 10 g de raíces recogidas en el campo al finalizar la temporada anterior. Se empleó una malla # 40. La profundidad promedio de colocación de las bolsas en el campo fue de 18 cm. En cada unidad experimental se establecieron 4 repeticiones y en cada una de ellas se colocaron 4 pequeñas bolsas.

Bolsas de mayor tamaño (20 x 30 cm) confeccionadas con la misma malla que las anteriores fueron llenadas con 30 g de residuos aéreos (tocones de maíz), cortados en pequeños fragmentos de aproximadamente 5 cm, para simular el efecto de la mesofauna. Se las colocó en el campo, en la superficie del suelo, sobre la hilera de siembra, al mismo tiempo que las bolsas más pequeñas. Se puso una por repetición a un lado de donde fueron enterradas las bolsas chicas. Aquellas que se depositaron en la superficie fueron fijadas al suelo con una estaca, sosteniéndose los bordes con alambre.

En ambos casos se cuidó de que la distribución de los residuos fuese uniforme dentro de la bolsa. La colocación de las bolsas en campo se realizó en el momento de la siembra.

La medición de las bolsas se realizó mensualmente. Para cada lectura, se retiró una de las bolsas enterradas. Primero se registró su peso en húmedo y posteriormente fueron depositadas en charolas de aluminio y secadas al horno a 70 °C por 24 horas, para determinar el porcentaje de humedad. Fueron limpiadas con un cepillo para eliminar los residuos de suelo adheridos a la superficie y se extrajeron los residuos, que fueron depositados en una charola de aluminio para evaluar su limpieza. Si estaban limpios, lo que dependió de la humedad del suelo, se pesaron directamente evaluando la pérdida de peso con relación a los 10 g colocados inicialmente. Si no era el caso, se los limpió cuidadosamente con un cepillo, sin que se perdieran partículas de material. Cuando se desprendieron algunas porciones del material, fue necesario recuperarlas con agua y pasarlas por un tamiz de malla fina (# 60) y volver a secarlas a la estufa, para finalmente cuantificar la pérdida de peso.

En el caso de las bolsas grandes, las colocadas sobre la superficie, el procedimiento fue ligeramente distinto. Se tomó una muestra pequeña del material residual de la bolsa. Se registró el peso antes y después de tomar la muestra. Al igual que en las bolsas pequeñass, los residuos se pesaron en húmedo y seco para determinar el porcentaje de humedad y posteriormente se limpiaron minuciosamente para evaluar la pérdida de peso. En el cuarto muestreo se evaluó el material restante.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimientos, cantidad de residuos y aporte de nitrógeno

En el cuadro 2 se presentan los rendimientos de materia seca de la parte aérea, la paja, el grano y la raíz, así como la cantidad de residuos de cosecha (tocones de tallo) y los residuos frescos incorporados al suelo (raíces del cultivo más raíces de malezas y otros) en los sitios experimentales cultivados con maíz, sistema que fue estudiado más detalladamente. La cantidad de raíces se estimó en un 15 % de la biomasa aérea.

Los residuos de cosecha en el sistema tradicional de cultivo de maíz en la zona, es decir, las entradas naturales de nitrógeno orgánico al suelo, están constituidos por: a) los restos de los tallos (tocones) que deja el productor después de cosechar y retirar la paja del sembradío; b) las raíces del maíz y las malezas que crecen durante la estación; c) los restos de tejidos del cultivo del año anterior incorporados al suelo pero que no han sufrido un proceso de descomposición.

La cantidad de residuos se relaciona directamente con la capacidad del agro-ecosistema de fijar carbono y acumular materia seca, por lo que a continuación se hace un análisis de esta situación. En el caso del maíz, en los 10 sitios cosechados, la producción media de materia seca de la parte aérea fue de 2.940 kg/ha. Este valor es inferior a la producción máxima posible de biomasa aérea estimada para el agro-ecosistema estudiado. Esta aseveración se fundamenta en el hecho de que los agro-ecosistemas tienen una producción máxima posible, la misma que es determinada por factores inmodificables de la producción y se calcula considerando cierta probabilidad de ocurrencia de ese factor, normalmente del 70 al 80 % (Galvis *et al.*, 1993; Rodríguez, 1993).

El comportamiento de un cultivo, en cuanto a su eficiencia de desempeño en una situación cualquiera, puede ser juzgado por el valor de su índice de cosecha (IC). El IC para las variedades criollas de maíz del altiplano mexicano es 0,39 (Obrador, 1994). Solo dos sitios experimentales (ER y CS) se acercaron a ese valor. En ellos, la producción promedio de materia seca de la parte aérea fue de aproximadamente 3.500 kg/ha, considerada inferior al rendimiento máximo posible para el agro-ecosistema en estudio. Rendimientos de biomasa de cerca de 9.000 toneladas han sido obtenidos en condiciones experimentales en la zona, con trigo del primer año.

La producción de maíz (grano) en los dos sitios mencionados fue la mayor (promedio: 1.290 kg/ha). El promedio de rendimiento de los 8 sitios restantes fue de 735 kg/ha, o 57 % del máximo alcanzado en esa temporada en una parcela experimental controlada. La comparación entre la producción de biomasa aérea y el rendimiento de grano en estos dos grupos de sitios, indica que el bajo rendimiento de este último no se debió a un sistema fotosintetizador limitado. La explicación de este comportamiento puede encontrarse en un probable déficit hídrico temporal, en un período de altas temperaturas durante etapas críticas de floración y llenado de grano o en un déficit de fósforo disponible en el suelo.

La pluviometría registrada en 2 de los sitios experimentales (HN y CP) fue de 734 mm durante 1995, de los cuales aproximadamente 300 mm cayeron durante el período crítico de crecimiento del maíz (50 y 30 días antes y después de la antesis, respectivamente), a principios de septiembre. De acuerdo con las funciones empíricas generadas por Galvis (1990) para suelos delgados del altiplano mexicano, por cada milímetro de agua caída en este período se podrían producir 10 kg de maíz, lo cual significa un potencial de producción de 3.000 kg/ha de grano. Esta deducción indica que en los

Sitio[1]	Cultivo	Rendimiento						Concentración de N		Aportes de N				N mineralizado en un año[4] (kg/ha)	IC[5]
		Parte aérea	Paja	Grano	Raíz del cultivo[2]	Restos de tallos	Raíz de malezas	Raíces	Restos tallos	Raíces del cultivo	Restos de tallos	Raíces de malezas[3]	Aporte de N total		
		(kg/ha)						(%)		(kg/ha)					
HNT1-0	trigo	1.262	1.029	233	423	348	2.395	1,50	0,51	6,34	1,74	36	44	15	0,18
HNT4-0	trigo	9.480	6.221	3.258	527	523	2.984	1,80	0,58	9,44	3,03	53	66	23	0,34
CPT4-3	maíz	3.554	2.706	848	533	293	1.522	1,77	0,58	9,43	1,70	27	38	13	0,31
CPT6-3	maíz	3.148	2.434	714	472	218	2.796	1,61	0,72	7,59	1,56	45	54	19	0,23
RFT2-5	maíz	2.549	1.702	847	382	371	1.166	1,65	0,68	6,30	2,52	19	28	10	0,33
AP-16	maíz	2.618	1.841	777	393	145	3.030	2,25	0,58	8,84	0,80	68	78	27	0,30
LS-16	maíz	2.771	2.136	635	416	163	1.498	1,54	0,62	6,40	1,00	23	30	10	0,23
ER-21	maíz	3.624	2.314	1.310	544	759	936	1,29	0,83	7,01	6,29	12	25	9	0,36
IG-35	maíz	2.725	1.995	730	409	358	1.062	1,64	0,81	6,70	0,43	17	24	8	0,27
SG-46	maíz	3.021	2.167	854	453	421	1.272	2,03	0,64	9,19	0,22	26	35	12	0,28
CS-60	maíz	3.327	2.058	1.269	499	623	1.100	1,48	1,01	7,38	6,29	16	30	10	0,39

1: El último número en la clave de los sitios corresponde a los años transcurridos desde su rehabilitación.
2: Valor inferido: biomasa radical = 0,15 biomasa aérea
3: Para hacer el cálculo, se utilizó un contenido de N igual al contenido de las raíces del cultivo.
4: Se consideró que el 35 % de N residual se mineralizó durante el primer año después de que fueron dejados los residuos en el suelo. Los sitios RF-10, RS-165 y RF-22 no se cosecharon por diversos motivos el daño causado por heladas o animales. En los sitios RF-10 y RS-16 se cuantificaron los residuos de las raíces (cultivo más malezas) en el suelo (2.222 y 1.659 kg/ha respectivamente).
5: Índice de Cosecha

Cuadro 2 - Materia seca de la parte aérea, paja, grano, raíz y raíces de malezas en maíz y trigo, en tepetates con edad creciente de rehabilitación para la producción agrícola, en la ladera occidental de la Sierra Nevada, México

tepetates existen factores limitantes distintos de la disponibilidad de agua de lluvia, probablemente ligados a la distribución o la capacidad de almacenamiento de la misma, o nutrimentales, lo que habría que analizar con más detenimiento.

La entrada de nitrógeno al suelo en el sistema de producción de maíz practicado localmente, por concepto de los residuos de la parte aérea, está determinada por el peso seco de los tocones de los tallos, que quedan en el campo. Este último depende de la cantidad de tallos (tocón) de aproximadamente 10-15 cm de altura que deja el agricultor. El peso promedio de estos materiales en el presente experimento fue de 290 kg/ha, lo que representa un ingreso al suelo de aproximadamente 2 kg/ha de nitrógeno, considerando que aquellos contienen un 0,7 % de nitrógeno (Rodríguez, 1993). Se destaca el hecho de que los sembradíos con un IC cercano al ideal aportaron más del doble de residuos (690 kg/ha) y por ende de nitrógeno, que aquellos con un IC promedio cercano a 0,25.

La cantidad de raíces de maíz que se incorporaron al suelo dependió de la biomasa aérea. Mientras mayor es la biomasa aérea, mayor es la cantidad de raíces producida. En el presente caso, se estimó que, bajo condiciones ideales, pueden ingresar al suelo por este concepto más de 500 kg/ha de raíces. El promedio de los 10 sitios cosechados fue de 440 kg/ha. Aun cuando no se ha medido todavía el porcentaje real de nitrógeno en este material, se puede inferir, con base en información de la literatura (Rodríguez, 1993), que el aporte medio de nitrógeno al suelo debido a las raíces sería de 5,0 kg/ha, considerando que estas contienen aproximadamente un 0,9 % de nitrógeno. Es interesante destacar que en los residuos aislados del suelo hay un aporte considerable de otras fuentes orgánicas, presumiblemente raíces de malezas, que también contribuyeron a entradas de nitrógeno y que resultaron más importantes que las del cultivo. En promedio, se tuvo un aporte global de residuos en el suelo cercano a los 2.000 kg/ha. El aporte de nitrógeno de esta fracción no ha sido evaluado aún, pero podría pensarse que es similar al de las raíces.

Si consideramos que la demanda de nitrógeno de un cultivo de maíz con un rendimiento de 1,3 toneladas de grano es de 33 kg/ha, los aportes de este elemento por parte de un cultivo anterior de maíz con un rendimiento de 3.500 kg/ha solo alcanza a 6 kg/ha, o 18 % de la demanda, por lo que es preciso complementar el suministro nativo del suelo con aplicaciones de fertilizante nitrogenado.

Nitrógeno mineralizable (reservorio lábil y estabilizado)

En la figura 1 se presentan las curvas de mineralización de todos los sitios estudiados, los mismos que corresponden a tepetates recuperados por periodos que van de 0 a 60 años. El tepetate que presentó la menor mineralización de nitrógeno fue el recogido en el sitio HNT1-0 que había sido habilitado hacía poco y no había recibido tratamiento alguno con materia orgánica. En contraste, el mismo sitio, pero con una adición de 20 toneladas de materia orgánica, presentó un comportamiento intermedio en cuanto a su capacidad de mineralización. Los anteriores resultados muestran que una práctica agronómica aconsejable para aumentar la disponibilidad de nitrógeno inorgánico en los tepetates recién recuperados es la adición de estiércol. El sitio que mostró la máxima capacidad de suministro de nitrógeno inorgánico fue el CL-10, que ha sido manejado de una manera peculiar en cuanto a la adición de residuos orgánicos de toda naturaleza, lo cual reafirma que la única manera de establecer, a corto plazo, un reservorio orgánico es mediante el manejo adecuado de los residuos, tanto los de cosecha, como los externos al sitio de cultivo y que se generan en la finca o son traídos a ella.

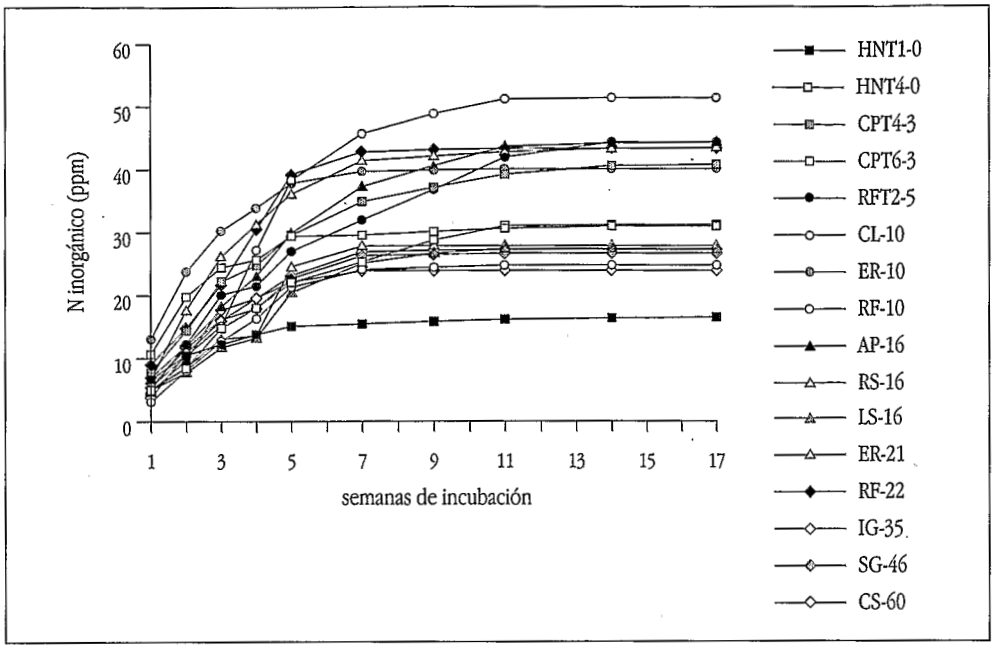


Figura 1 - Nitrógeno mineralizado total durante 17 semanas de incubación, en tepetates de la ladera noroccidental de la Sierra Nevada (estado de México), cultivados durante diferente número de años
(número final de la clave de identificación)

Es importante destacar el hecho de que, contrariamente a la hipótesis planteada, la mineralización de nitrógeno orgánico y por ende la capacidad de suministro de nitrógeno inorgánico, no están relacionadas con los años de cultivo de un tepetate. Por el contrario, sitios con escasos años de recuperación y explotación agrícola, como el CPT4-3, pueden alcanzar elevadas producciones de nitrógeno inorgánico a corto plazo cuando los residuos son mantenidos en el campo y se agrega estiércol a las parcelas.

En el cuadro 3 se presenta una estimación de los aportes de nitrógeno que provendrían de los reservorios lábil y estabilizado de este elemento. Para ello se consideró que el nitrógeno mineralizado en las primeras cinco semanas vendría del reservorio lábil y el restante del estabilizado. Se tomó esta decisión en función del cambio de pendiente que experimenta la curva de nitrógeno mineralizado acumulado. Si la suposición anterior es cierta, sería posible afirmar que, en el caso de los tepetates recuperados, el reservorio lábil es el más importante para el abastecimiento de nitrógeno mineralizado al suelo. El aporte de nitrógeno del reservorio orgánico estabilizado de este nutrimento fue relativamente reducido.

Mineralización de los residuos en el campo

En la figura 2 se presenta la curva de mineralización de los residuos de raíces en el suelo, la misma que fue generada a partir de la pérdida de peso de las pequeñas bolsas de malla enterradas en él. Como se puede apreciar, la pérdida de peso de las raíces

Cuadro 3
Tamaño de los reservorios de nitrógeno lábil y estabilizado

Identificación	NL	NE	NT
	(ppm)		
HNT4-0	29,37	1,55	30,92
NHT1-0	15,12	1,36	16,48
CPT4-3	29,55	11,15	40,7
CPT6-3	22,03	9,12	32,95
RFT2-5	26,97	17,83	44,97
CL-10	38,3	13,05	51,35
ER-10	37,79	2,23	40,02
RF-10	21,3	3,09	24,73
AP-16	29,88	14,42	44,3
RS-16	36,06	7,39	43,45
LS-16	20,44	6,88	27,32
ER-21	24,55	3,26	27,81
RF-22	39,16	4,12	43,28
IG-35	22,16	1,72	23,88
SG-46	22,67	3,95	26,62
CS-60	23,02	4,12	27,14

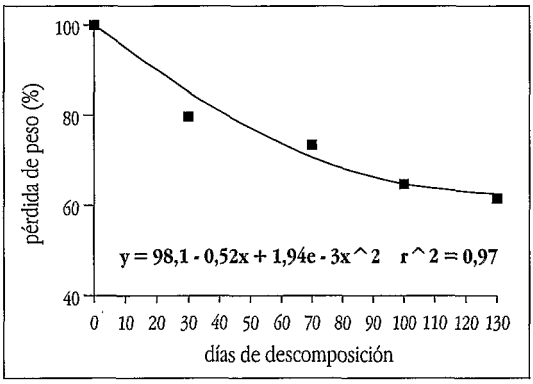


Figura 2
Pérdida de peso de los residuos incorporados al suelo en siete tepetates de la *ladera noroccidental de la Sierra Nevada*, cultivados durante diferente numéro de años
(número final de la clave de identificación)

residuales del cultivo anterior, controlada durante el periodo de crecimiento del cultivo del maíz del año siguiente, esto es, durante el período en que el suelo se mantuvo con una humedad suficiente para el crecimiento de las plantas, alcanzó aproximadamente un 40 %. Esta cifra coincide con la reportada por otros estudios de residuos orgánicos en el suelo. Se puede suponer, partiendo de estos valores, que un 40 % del nitrógeno incorporado a través de raíces se tornó disponible o se mineralizó el primer año.

En la evaluación de la pérdida de peso de los residuos de la parte aérea del cultivo anterior de maíz, que fueron recogidos y depositados en la superficie de los tepetates recuperados, no se pudo determinar la dinámica de la pérdida de peso, ya que hubo problemas en la separación del suelo que se adhirió a los residuos, pero fue posible medir la pérdida de peso total de los residuos al final de los 130 días del experimento. Con los

datos obtenidos se hizo un ejercicio para simular dicha dinámica y los resultados se presentan en la figura 3. En ella se destaca que los residuos colocados sobre la superficie presentaron pérdidas de peso del orden del 8 al 30 %. Los mayores valores se relacionaron con sitios tratados con materia orgánica, o con mayor cobertura vegetal, ya sea debido a malezas o al cultivo.

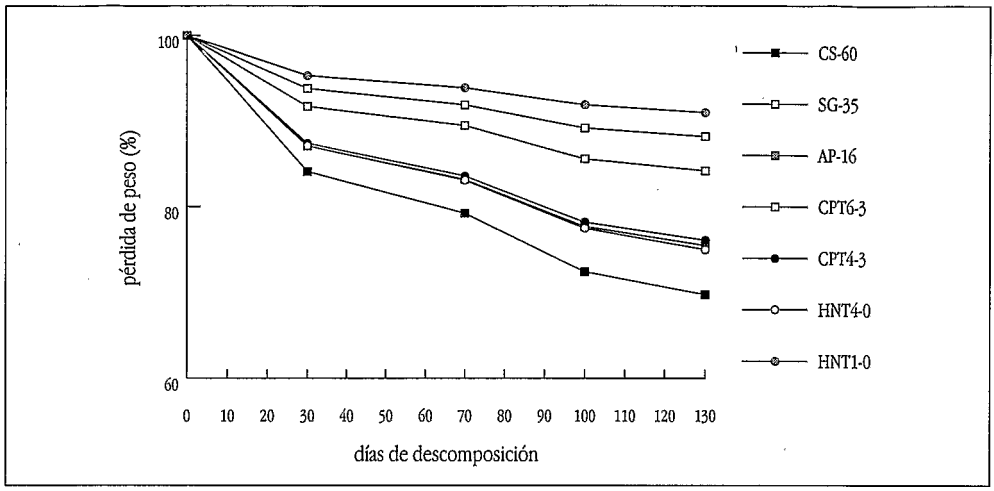


Figura 3 - Pérdida de peso de los residuos depositados en la superficie del suelo en siete tepetates de la ladera occidental de la Sierra Nevada, cultivados durante diferente número de años
(número final de la clave de identificación)

CONCLUSIONES

La entrada de nitrógeno al suelo en el sistema local de producción de maíz y trigo por aporte de residuos del cultivo anterior está determinada por la cantidad de residuos que se incorporan (tocones y raíces) después de cada ciclo, la cual es, a su vez, función de la biomasa producida y del manejo agronómico dado a las parcelas.

Los datos de mineralización de los residuos de cosecha, medida a través de la pérdida de peso en campo, mostraron que los residuos incorporados al suelo se descomponen en mayor proporción (40 %) que los residuos colocados sobre la superficie (8 a 30 %).

La mineralización en laboratorio mostró que la cantidad de nitrógeno orgánico mineralizado y por ende la capacidad de suministro de nitrógeno inorgánico del sistema, no se relacionó con los años de cultivo de los tepetates, pero sí con el manejo de los residuos y la incorporación de materia orgánica.

Referencias bibliográficas

BOEHM, W., 1979: *Methods of Studying Roots Systems*, Springer-Verlag, New York, 188 p.

BREMNER, J. M., 1965: Inorganic Nitrogen in Methods of Soil Analysis, in *Agronomy*, 9, C. A. Black (editor), Part 2, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, p. 1.179-1.237.

DUBRŒUCQ, D.; QUANTIN, P.; ZEBROWSKI, C., 1989: Los tepetates de origen volcánico en México. Esquema preliminar de clasificación, en *Terra*, Vol. 7 (1), p. 3-12.

ETCHEVERS, J.; CRUZ, J.; MARES J.; ZEBROWSKI, C., 1992. Fertilidad de los tepetates. I. Fertilidad actual y potencial de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada (México), en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 379-384

ETCHEVERS B., J. D.; FERRRERA-CERRATO, R., 1994: Fertilidad de los suelos volcánicos endurecidos: características químicas y microbiológicas de los tepetates en México, en *Transactions of the 15th World Congress of Soil Science*, Acapulco, México, Vol. 6a, p. 571-591.

ETCHEVERS B., J. D.; TRINIDAD, A.; GUERRERO, S.; PÉREZ, A.; GARCÍA, D.; MORFÍN, G., 1985: Levantamiento nutricional del maíz en la Sierra Tarasca de Michòacán, en *Agrociencia*, 60, México, p. 145-154.

GALVIS, A., ETCHEVERS B., J. D.; RODRÍGUEZ, J., 1993: Estimación de rendimientos máximos alcanzables de maíz en aréas de temporal del estado de Tlaxcala, en *Terra*, Vol. 11 (número especial: Tepetates de México, caracterización y habilitación para la agricultura), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 226-234

NAVARRO, H.; ZEBROWSKI, C.; PÉREZ, M. A., 1995: Productivité agricole et conditions socio-économiques de la production dans la région de Hueyotlipan (Tlaxcala, México), en *Terra*, Vol. 12, en prensa.

OBRADOR, J. J., 1994: *Validación de parámetros de planta y clima que se utilizan en un modelo simplificado destinado a determinar dosis de fertilización de N, P y K para maíz*, Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, 120 p.

RODRÍGUEZ, J., 1993: *La fertilización de los cultivos. Un método racional*, Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 337 p.

STANFORD, G.; SMITH, S. J., 1972: Nitrogen Mineralization Potential of Soil, in *Soil Science Society of America*, 36, p. 465-472.

WESTERMAN, D. T.; CROTHERS, S. E., 1980: Measuring Soil Nitrogen Mineralization under Field Condition, in *Agronomy Journal*, 72, p. 1.009-1.012.

ZEBROWSKI, C. 1992: Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 15-23.

Uso de la materia orgánica en la recuperación de tepetates y su influencia en los microorganismos

Ronald Ferrera-Cerrato, Andrés Ortiz,
Julián Delgadillo, Salustio Santamaría

Abstract

Research conducted on tepetates *in the* Área de Microbiología de Suelos del Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas *(Mexico) is summarized in the present paper. Arbuscular mycorrhiza symbiosis and nitrogen fixing bacteria (free living and symbiotic with legumes) and their role in the rehabilitation of soil fertility and* tepetate *native microbiota and its behaviour under various management systems and microorganisms with specific activity on organic manure degradation are included.*

Keywords: *Bioremediation - Bacteria - Fungi - Mycorrhiza - Nitrogen Fixation*

INTRODUCCIÓN

El manejo inadecuado de los suelos agrícolas que a través del tiempo han perdido la capa arable, ha dado como resultado suelos marginados con afloramiento de tepetate y al mismo tiempo ha alterado la microflora y la microfauna, originándose lo que se conoce como erosión biológica. En México existen gran cantidad de zonas con este problema, por lo que es importante frenar tal deterioro y paralelamente buscar soluciones que permitan recuperar estos suelos tepetatosos. Existen opciones como la roturación de ese material endurecido, la formación de terrazas, la incorporación de materia orgánica y la inoculación de microorganismos benéficos, así como también el establecimiento de cultivos que permitan aumentar rápidamente el contenido de materia orgánica (a través de su incorporación como abono verde o la formación de una cobertura), la rotación de cultivos, etc., ya que de esta manera se incrementa la población microbiana que juega un papel importante en la disponibilidad de nutrimentos para las plantas.

En este trabajo se presentan resultados prometedores, obtenidos por diferentes autores que han trabajado en la recuperación de los tepetates, con la inoculación de microorganismos simbiontes como son bacterias del género *Rhizobium* y hongos micorrízicos, la incorporación de estiércol, la utilización de vermicomposta, el manejo de asociación de cultivos e incluso el uso de *Azolla* como abono verde. También se presenta la cuantificación de algunos grupos microbianos, lo que da una idea de la actividad microbiana en el suelo, como reflejo de la fertilidad del mismo.

USO DE MICROORGANISMOS SIMBIÓTICOS EN LA RECUPERACIÓN DE SUELOS TEPETATOSOS

El papel de la simbiosis micorrízica

Las micorrizas son asociaciones entre hongos y las raíces de las plantas. Parte del micelio fúngico se encuentra dentro del tejido radical de la planta hospedante y parte está en contacto con el suelo que rodea a la raíz, y regularmente se difunde en él (figura 1).

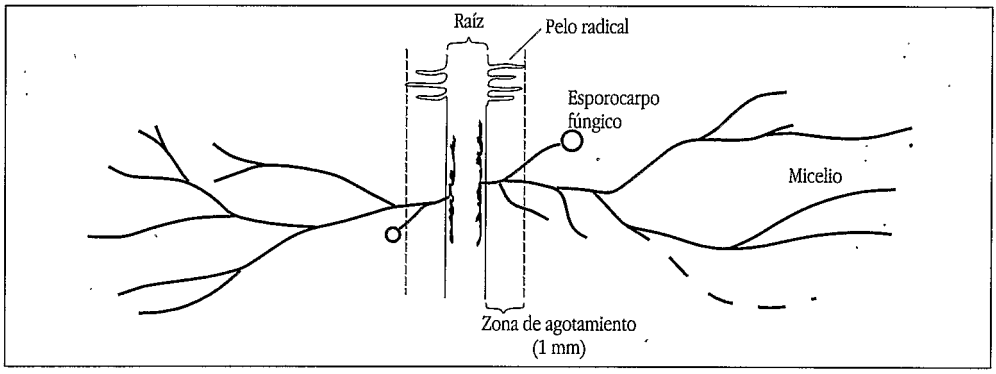


Figura 1 - Absorción de fósforo disponible por los pelos radicales y el micelio fúngico (Smith y Douglas, 1987)

Los hongos micorrízicos son de vital importancia en la nutrición vegetal, especialmente en la utilización del fósforo adicionado mediante la fertilización o el ya existente en el suelo.

Pese a que los tepetates presentan hongos endomicorrízicos en su microbiota nativa, la inoculación con cepas mejoradas aumenta considerablemente el rendimiento de algunos cultivos. Así, con la inoculación de cepas seleccionadas de *Glomus* sp. se incrementaron las cantidades de N y P disponibles, con lo que se obtuvo un aumento en el rendimiento de trébol rojo (*Trifolium pratense*) —González, 1987—.

Se ha reportado la presencia de hongos micorrízicos nativos infectivos en tepetates recién roturados, pero es notoria la mayor infectividad de cepas introducidas en el primer ciclo de cultivo. La colonización micorrízica se ve aumentada 100 días después de la siembra (dds) —etapa de plena floración de las leguminosas— en haba y en frijol, y en menor grado en maíz. Asimismo, se ha observado que la colonización micorrízica total aumenta de manera notoria por efecto de la aplicación de materia orgánica (Quintero y Ferrera-Cerrato, 1992).

En suelos de origen volcánico y calcimórfico, pobres en P, al inocular diferentes cultivos con micorrizas, la respuesta de ellos a la fertilización química se incrementa (Palacios *et al.*, 1991). Con el uso de *Leucaena leucocephala* y *Acacia constricta* inoculadas con *Rhizobium-Glomus*, la fertilización fosfatada potenció el efecto de los inoculantes; la dosis de fertilización fue un factor importante para que la respuesta fuera evidente. *A. constricta* presentó mayores porcentajes de colonización que *L. leucocephala*, por lo que

se concluyó que para la primera especie, la micorriza y la fertilización fueron los factores con mayor influencia en el aumento de la altura de las plantas y del volumen radical. En la segunda, la doble inoculación y la fertilización fueron los factores más determinantes (cuadro 1) —Rodríguez-Mendoza *et al.*, 1996—. *Trifolium pratense* y *Acacia cyanophylla* cultivados en tepetates e inoculados con hongos micorrízicos presentan un crecimiento equivalente al obtenido con altas dosis de fertilización fosfatada. Se considera que la utilización de la simbiosis micorrízica en plantas de la familia de las leguminosas, propagadas en vivero con propósitos de conservación o recuperación de suelos, es una alternativa de alta viabilidad y bajo costo, que puede ponerse en práctica para favorecer la supervivencia y la adaptación en el campo de muchas especies a las condiciones limitantes que imperan en las zonas degradadas (Guzmán-Plazola y Ferrera-Cerrato, 1990).

Tratamiento	*Leucaena leucocephala*			*Acacia constricta*		
	CM	Altura	VR	CM	Altura	VR
	%	cm	cm^3	%	cm	cm^3
RGNP	60,5	18,5	3,8	60,8	12,1	1,6
RGP	62,1	10,6	2,67	55,3	19,7	2,23
R[1]	62,5	9,6	2,15	38,3	14,2	1,87
T[1]	50,0	10	1,78	nd	12,1	1,72
G[1]	61,0	9,5	1,36	70,6	15,5	1,85
RG	64,0	nd	1,29	68,3	11,5	1,85
RGN	46,0	18,5	1,91	85,2	18,2	2,23
G	61,5	8	1,32	83,5	14,8	1,12

R: inoculación con *Rhizobium*, G: inoculación con *Glomus*; N: fertilización nitrogenada (30 kg de N ha^{-1}); P: fertilización fosfatada (40 kg de P_2O_5 ha^{-1}); T: testigo; 1: suelo no esterilizado; CM: colonización micorrízica total; VR: volumen radical; nd: no se determinó.

Cuadro 1 -Colonización micorrízica total, altura y volumen radical 90 dds, en dos leguminosas arbóreas en recuperación de tepetates (Rodríguez-Mendoza *et al.*, 1996)

Se encontraron diferencias significativas en la altura de *Eysenhardtia polystachya* entre los tratamientos testigo (aplicación de 50 kg de N ha^{-1}) e inoculación con micorriza más la adición del biofertilizante *Azolla caroliniana* (12 t ha^{-1}), con valores de 5,4 y 48,7 cm, respectivamente. También se reporta la estrecha relación existente entre la colonización micorrízica y las variables indicadoras del crecimiento del cultivo a lo largo del experimento. Así pues, se concluyó que la tendencia general es que la adición de *A. caroliniana* más la inoculación micorrízica provocan aumentos en las variables de importancia y en especial en la colonización micorrízica (Matías, 1990).

Con la realización de zanjillas de absorción y zanjas-trinchera para la conservación del suelo tepetatoso y la inoculación con endomicorrizas de distintas leguminosas arbóreas, se ha encontrado que la altura de las plantas inoculadas es mayor que la de las no inoculadas, y esta variable está estrechamente relacionada con la supervivencia de las especies en condiciones de campo (cuadro 2) —Rey *et al.*, 1992—. En un estudio con capulín

(*Prunus serotina* var. capulín) para conocer la micotrofía de este, en tepetate amarillo e inoculado con cepas del género *Glomus*, se encontró que algunas cepas colonizaron al capulín en más de un 50 % y esa colonización estuvo relacionada con una mayor altura de las plantas (Gómez y Ferrera-Cerrato, 1990).

Cuadro 2
Altura de algunas leguminosas arbóreas y *Dodonaea viscosa* durante el primer año de establecimiento en tepetates
(Rey *et al.*, 1992)

Especie	Altura (cm)	
	Micorrizada	No Micorrizada
Acacia farneciana	25,6	13,3
Dodonaea viscosa	56,3	30,3
Eysenhardtia polystachya	99,0	77,6
Mimosa biuncifera	35,6	31,3

En un estudio realizado con el policultivo maíz-frijol-haba en tepetate, se observó que el haba presentó, en todos los muestreos, el mayor porcentaje de colonización micorrízica (en el intervalo de 22 a 65 %). Con la aplicación de materia orgánica, se incrementó de manera notoria la colonización por parte de la micorriza. Por otra parte, se observó que la adición de materia orgánica al tepetate tiene efectos residuales, formación de compuestos orgánicos con los nutrimentos (manteniéndolos bajo una forma aprovechable por parte de las plantas) y liberación de CO_2, que proporciona solubilización de nutrimentos y abastecimiento de carbono como fuente de energía para la microbiota, además de la obtención del carbono de los exudados de las plantas. Por el contrario, la fertilización química (120-60-00) provocó una disminución de la colonización micorrízica, debido probablemente a que la disponibilidad de nutrimentos (principalmente P) disminuye la acción de las micorrizas (Matías y Ferrera-Cerrato, 1996).

En un estudio de invernadero con diversos genotipos de maíz en tepetate, se encontró una respuesta favorable en la variable peso seco de la parte aérea al inocular con *Glomus* sp. Zac-19 y aplicar materia orgánica en forma de vermicomposta. Asimismo, se observó que 50 dds la colonización micorrízica fue baja (cuadro 3). Sin embargo, la presencia de la micorriza se manifestó máximo 100 dds (Matías y Ferrera-Cerrato, 1996; Quintero y Ferrera-Cerrato, 1992). En cebolla cultivada en tepetates, se encontró que el rendimiento de bulbo ha^{-1} aumentó con la inoculación (con o sin aplicación de 5 t ha^{-1} de vermicomposta), al igual que con la fertilización (120-60-00) —figura 2— (Flores y Ferrera-Cerrato, no publicado). En un estudio realizado en invernadero con tepetates, se concluyó que la aplicación de 12 t ha^{-1} de vermicomposta y la inoculación con *Glomus* sp. Zac-19 mejoró el desarrollo de cebolla y de maíz (García, 1996).

Uso de la fijación biológica de nitrógeno

El nitrógeno es uno de los elementos más ampliamente distribuidos en la naturaleza. En la atmósfera se encuentra como dinitrógeno (N_2) representando el 78 %. Se calcula que la cantidad de nitrógeno fijado en la naturaleza es de 200 x 10^6 t $año^{-1}$. De esta cantidad, aproximadamente el 5 % es fijado por oxidación (provocada por las descargas eléctricas de las tormentas) del N_2 a ácido nítrico en presencia de O_2 y vapor de agua, y el 95 % es fijado por microorganismos. De allí que restablecer la microbiota fijadora libre y simbiótica en los suelos tepetatosos es un paso necesario, además de ser un proceso

Tratamiento	N	P	Ch	Bp	Bt	C	Promedio
	%	%	%	%	%	%	%
Testigo	1,66	1,33	0	3,66	0	1,00	1,27 b
MVA	8,66	0,66	5,33	2,66	4,33	1,33	3,94 ab
V	3,11	2,00	3,33	2,00	2,66	3,66	2,78 ab
MVA+V	3,66	4,00	5,33	2,00	7,00	13,00	5,86 a

N: negro; P: palomero; Ch: chino; Bp: blanco precoz; Bt: blanco tardío; C: cañuela, MVA: inoculación con micorriza; V: vermicomposta.

Cuadro 3 - Colonización micorrízica al inocular *Glomus* sp. Zac-19 en distintas variedades de maíz, 50 dds

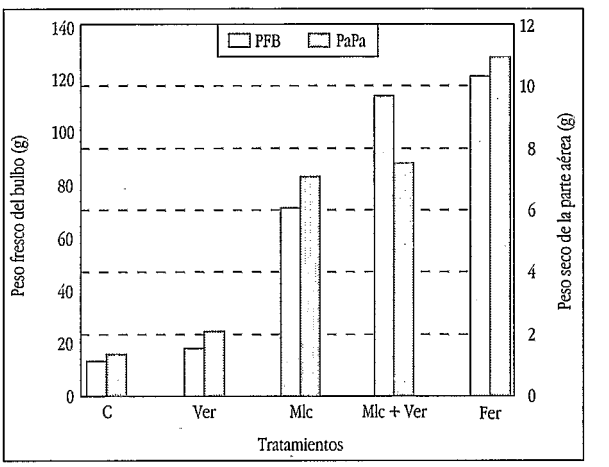


Figura 2
Inoculación micorrízica arbuscular en cebolla en tepetate
C: testigo; Ver: aplicación de vermicomposta; Mic: inoculado con micorriza; Fer: fertilizado; PFB: peso fresco del bulbo; PsPA: peso seco de la parte aérea (Flores y Ferrera-Cerrato, datos no publicados)

natural de equilibrio ecológico (Aparicio-Tejo *et al.*, 1993). Es importante mencionar que los microorganismos responsables de fijar el N_2 son de dos tipos, los de vida libre y los simbióticos, ambos de gran importancia para la recuperación de los suelos marginados (cuadro 4).

La existencia en el suelo de diversas bacterias fijadoras de nitrógeno es una de las ventajas más importantes, ya que ellas juegan un papel primordial en el reciclaje de nutrimentos y en la transformación del nitrógeno del aire a formas asimilables por parte de las plantas, y su manejo es factible en la recuperación de suelos tepetatosos. Específicamente, en este tipo de materiales se han desarrollado pocos trabajos de investigación para conocer los beneficios de las mencionadas bacterias. En el Área de Microbiología de Suelos del Colegio de Postgraduados, se han realizado algunas investigaciones, en las que se han cuantificado poblaciones de bacterias crecidas en los medios para *Azospirillum*, *Derxia* y *Azotobacter*. En estos medios, el mayor número de unidades formadoras de colonias (UFC) g^{-1} de suelo seco se presentó 50 días después del establecimiento del policultivo maíz-frijol-haba (Rodríguez-Mendoza *et al.*, 1995), pero en evaluaciones posteriores las poblaciones disminuyeron (cuadro 5). La población en el medio para *Azospirillum* sp. descendió al aumentar el tiempo del establecimiento del cultivo maíz-frijol en un

Fijadores de vida libre		
Arqueobacterias	*Methanosarcina* *Methanococcus*	Constituyen un reino diferenciado de las cianobacterias, presentan algunas características particulares como poseer intrones.
Anaerobios	*Clostridium*	Suelos, aguas dulces y marinas, sedimentos, tractos intestinales.
Anaerobios facultativos	*Klebsiella*	Microbiota intestinal, suelos y aguas.
Microaerobios	*Azospirillum*	Suelos, generalmente asociados a raíces de plantas.
Aerobios	*Azotobacter* *Beijerinckia*	Suelos aguas y superficies vegetales. Generalmente más eficientes a bajas concentraciones de O_2.
Bacterias fotosintéticas	*Rhodospirillum* *Chromatium*	Acuáticas, fijan N_2 en anaerobiosis utilizando la energía de la fotosíntesis.
Cianobacterias sin heterocistos	*Oscillatoria* *Gloeothece*	Fijan N_2 en microaerobiosis o en aerobiosis con separación temporal de la fotosíntesis y de la fijación.
Cianobacterias con heterocistos	*Nostoc* *Anabaena*	Capaces de fijar N_2 aeróbica o anaeróbicamente.
Fijadores en simbiosis		
Con leguminosas	*Rhizobium*	Leguminosas de origen templado
	Bradirhizobium	Leguminosas de origen tropical
	Azorhizobium	*Sesbania*
Con no leguminosas	*Frankia*	*Alnus, Casuarina, Myrica, Comptonia, Coraria.*
Otras simbiosis	*Nostoc* *Anabaena*	Asociaciones de cianobacterias con angiospermas, gimnospermas, pteridofitos, briofitos y hongos.
Simbiosis asociativas	*Azotobacter* *Azospirillum*	Simbiosis asociativas y asociaciones casuales con raíces de *Paspalum notatum*, maíz.

Fuente: Aparicio-Tejo *et al.*, 1993

Cuadro 4 - Grupos representativos de organismos fijadores de nitrógeno y algunas de sus características (Aparicio-Tejo *et al.*, 1993)

tepetate recién roturado (Álvarez, 1992). Sin embargo, se observó que el cultivo continuo, a lo largo de tres años permitió que la población de fijadores de nitrógeno se mantuviera en más de 10^6 UFC g^{-1} de suelo seco en los medios para *Derxia* y *Azotobacter*, independientemente de la aplicación de materia orgánica.

La incorporación de materia orgánica ha dado buenos resultados conjuntamente con la inoculación de bacterias, al incrementar los nutrimentos en el suelo y la producción de biomasa vegetal de trébol (*Melilotus albus*) inoculado con una multicepa de *Rhizobium meliloti*, con rendimiento de forraje de 27 t ha^{-1} (60 días después del corte realizado 90 dds) comparado con 11,82 t ha^{-1} del testigo, además de 22 y 19 % de proteína, 82 y 71 % de digestibilidad de la materia seca, del tratamiento con materia orgánica y del testigo, respectivamente. En el caso de la actividad de la enzima nitrogenasa, no hubo diferencias significativas, pero numéricamente fue superior el tratamiento con aplicación de materia orgánica e inoculación. Es importante considerar que la buena nutrición de las plantas redunda en una elevada calidad y cantidad de forraje.

Bacteria	Tratamiento del tepetate	Fecha de muestreo (días después de la siembra)		
		50	100	150
		UFC	UFC	UFC
Derxia[1]	SMO	$11,3 \times 10^6$	2×10^7	6×10^6
	CMO	$9,3 \times 10^6$	3×10^6	3×10^6
Azotobacter[1]	SMO	$1,9 \times 10^6$	3×10^7	11×10^6
	CMO	$9,4 \times 10^6$	4×10^6	5×10^6
Azospirillum[2]	SMO	$1,2 \times 10^4$	$2,35 \times 10^3$	$1,4 \times 10^3$
	CMO	$2,8 \times 10^4$	$4,60 \times 10^3$	$3,6 \times 10^2$

UFC: unidades formadoras de colonias g^{-1} de suelo seco, CMO y SMO: con y sin aplicación de materia orgánica, respectivamente.
Fuente: [1] Rodríguez-Mendoza *et al.* (1995); [2] Álvarez (1992).

Cuadro 5 -UFC crecidas en los medios de cultivo para *Derxia, Azotobacter* y *Azospirillum*, en tepetates

En un estudio con la misma especie en invernadero, se encontró que la actividad de la enzima nitrogenasa aumentó con la inoculación de las cepas de *Rhizobium meliloti* CPMEX176 y CPMEX178, al igual que con la incorporación de 15 t ha^{-1} de vermicomposta de pulpa de café. En peso seco por planta, se encontraron valores bajos para los testigos con y sin aplicación de 40 kg de P ha^{-1}. Además, al aumentar la dosis de vermicomposta, los valores para peso seco también se incrementaron (cuadro 6).

Tratamiento	Peso seco (g)	Actividad Nitrogenasa (nmoles planta^{-1} h^{-1})
CP1	2,76	42,7
CP89	2,79	40,3
CPMEX176	2,83	67,3
CPMEX177	3,08	43,9
CPMEX178	2,78	73,1
CPMEX179	2,91	43,8
Testigo + P	1,50	5,2
Testigo - P	1,21	5,9
Multicepa	2,30	45,7
5 t ha^{-1} de V + Multicepa	2,83	10,8
10 t ha^{-1} de V + Multicepa	2,95	39,3
15 t ha^{-1} de V + Multicepa	3,01	97,8

+P: aplicación de 40 kg ha^{-1} de fósforo; -P: sin aplicación de fósforo;
V: vermicomposta de pulpa de café; Multicepa: inoculante preparado con todas las cepas utilizadas

Cuadro 6 - Peso seco por planta y actividad de la enzima nitrogenasa en trébol (*Meliotus albus*) en invernadero, con aplicación de vermicomposta e inoculación de cepas de *Rhizobium melioti*

En una evaluación de la población microbiana crecida en medio para fijadores de N en un tepetate sin cultivo, se reportan diferentes poblaciones de acuerdo al cultivo: de 5,03 x 10^2 y hasta 9,53 x 10^4 UFC en veza y haba, respectivamente.

Al aplicar estiércol, las poblaciones se incrementaron, como en el caso del maíz que presentó 6,39 x 10^4 UFC, o se redujeron, como en el del haba que disminuyó a 3,84 x 10^4 UFC. La aplicación de materia orgánica permite el incremento de la población de *Rhizobium* (inoculado), no así de la población de *Azospirillum*. Un beneficio claro de la inoculación es el mayor peso de los nódulos, lo que indica una mayor fijación de N (Álvarez, 1992).

Estudio de las poblaciones microbianas en tepetates

La dinámica poblacional de la microbiota nativa de los tepetates se ve notablemente afectada por las prácticas de manejo y preparación anteriores a la siembra. Se observó que el tepetate que no ha sido laboreado posee ligeramente menor microbiota que el roturado. Al incorporar estiércol (40 t ha^{-1}), se favoreció el incremento de los microorganismos (cuadro 7). No obstante, el tepetate manejado tradicionalmente por el productor presentó mayor cantidad de hongos, bacterias y actinomicetos, debido a que el manejo que el agricultor da al terreno ha sido constante por mucho tiempo y las poblaciones microbianas llegan a equilibrarse (Álvarez, 1992). Los microorganismos, al igual que los demás seres vivos, requieren de ciertas condiciones para un desarrollo óptimo. Las condiciones climáticas, la cantidad de nutrimentos existentes en el substrato y las especies cultivadas forman parte del ambiente microbiano. Así, la cuantificación de microorganismos totales (bacterias, hongos y actinomicetos) en la rizosfera del policultivo maíz-frijol-haba en tepetate mostró amplia variación en las diferentes épocas de muestreo, así como en los tres años en que se desarrollaron los cultivos, lo que se atribuyó a las condiciones inestables del clima (figura 3).

Población	Antes de roturar	Después de roturar	Aplicación de estiércol
	UFC	UFC	UFC
Bacterias	2,2 x 10^4	6,0 x 10^4	2,5 x 10^6
Hongos	6,6 x 10^2	1,3 x 10^2	6,5 x 10^2
Actinomicetos	1,2 x 10^4	2,0 x 10^4	1,4 x 10^5

UFC: Unidades formadoras de colonias
Fuente: Alvarez (1992)

Cuadro 7 - Dinámica poblacional de la microbiota en tepetate durante las prácticas iniciales

Poblaciones bacterianas

Durante el primer año de establecimiento del policultivo (SMO1 y CMO1), las bacterias se incrementaron sustancialmente al aplicar estiércol de bovino 15 días antes de la siembra; no así en el segundo y tercer años (SMO2, CMO2 y SMO3, CMO3, respectivamente) donde se observó un ligero incremento en la misma época de evaluación. Se encontró mayor número de bacterias 50 dds del policultivo, en el primer año, posiblemente debido al desarrollo de la microbiota nativa (figura 3a).

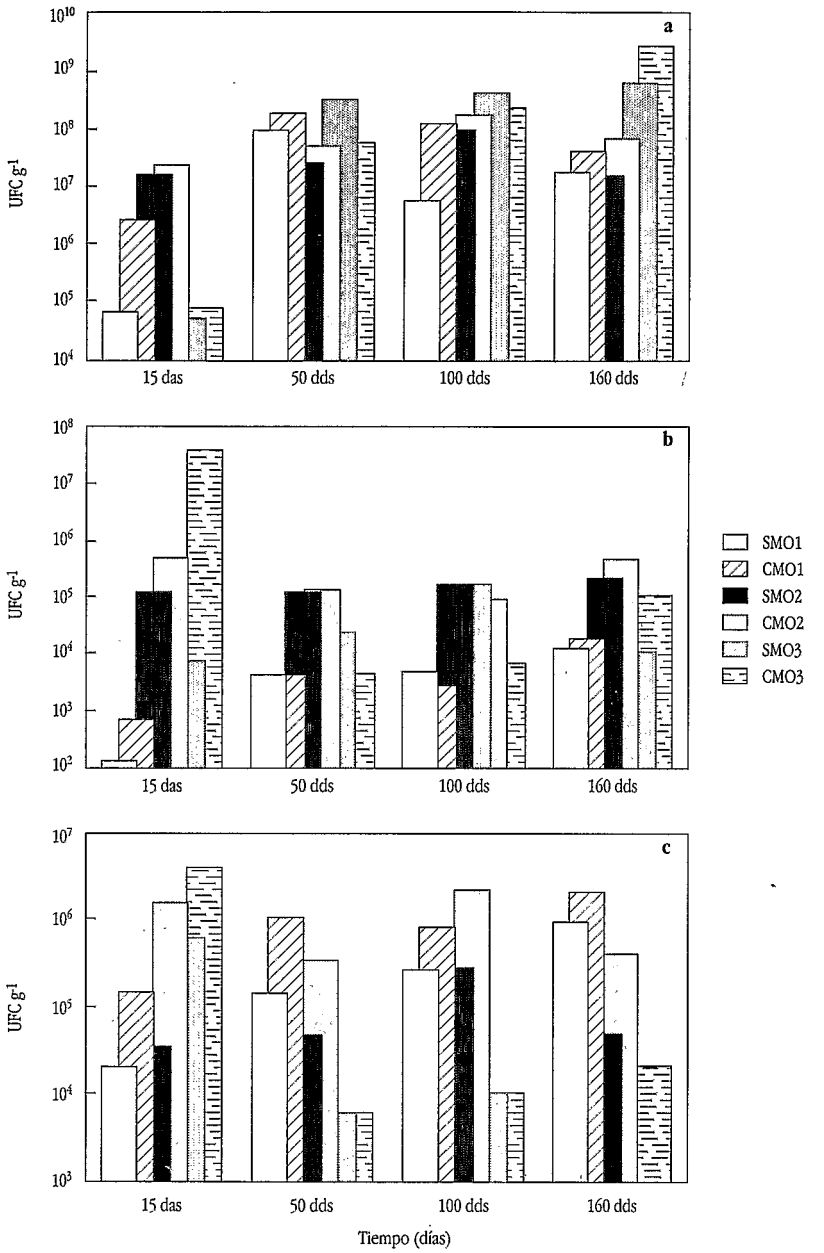


Figura 3 - Microorganismos totales en la rizosfera del policultivo maíz-frijol-haba, desarrollados en tepetate
UFC: Unidades Formadoras de Colonias; a) bacterias, b) hongos, c) actinomicetos; das: días antes de la siembra; dds: días después de la siembra; CMO y SMO: con y sin materia orgánica, respectivamente, durante el primero (1), el segundo (2) y el tercer (3) año de cultivo.

Se ha mencionado que las poblaciones de microorganismos se incrementan después de la introducción de los cultivos, debido a que las plantas son los principales suministradores de compuestos energéticos al suelo (Rodríguez-Mendoza *et al.*, 1996); los microorganismos utilizan dichos compuestos, próximos al sistema radical, y prolifera en este la microbiota. En el segundo y tercer años de cultivo, el número de bacterias 100 y 160 dds fue superior al del primero, debido al establecimiento de los cultivos y a la aplicación de la materia orgánica que interviene positivamente en las características físicas y químicas de los suelos aumentando la actividad biológica de los mismos (Rodríguez-Mendoza *et al.*, 1995).

Poblaciones de hongos

La población de hongos varió en los diferentes años de establecimiento del policultivo maíz-frijol-haba. La mayor población de hongos totales se observó en el segundo año, independientemente de la aplicación de materia orgánica. Los hongos nativos se incrementaron al aplicar estiércol (40 t ha^{-1}) 15 días antes de la siembra. Asimismo, se encontró un mayor efecto al prolongar la aplicación de estiércol durante el tercer año (figura 3b). No obstante, 100 dds en el tercer año, la población se vio reducida, ya que las condiciones climáticas fueron inestables y la humedad es un factor importante en el desarrollo de este grupo microbiano.

Poblaciones de actinomicetos

De la misma manera que las bacterias y los hongos, los actinomicetos aumentaron después de la roturación del tepetate y de la aplicación de materia orgánica en el primer año del establecimiento del policultivo (cuadro 7). Se observó que la población se incrementó durante el primer ciclo. La aplicación de materia orgánica jugó un papel importante en la microbiota del suelo durante el primero y el segundo años. Durante el tercer año, los actinomicetos disminuyeron (figura 3c), no así la población bacteriana. Resultados muy similares se encontraron al estimar la población de los microorganismos rizosféricos en trébol (*Melilotus albus*), donde las poblaciones de bacterias y actinomicetos aumentaron, respectivamente, de 6,1 x 10^7 y 3,4 x 10^5 UFC antes de la siembra a 7,6 x 10^8 y 1,2 x 10^6 UFC después del establecimiento del cultivo. Sin embargo, los hongos disminuyeron de 3,4 x 10^4 a 5,3 x 10^3 UFC por gramo de suelo seco.

Microorganismos con actividad fisiológica específica en la degradación de la materia orgánica

Los microorganismos con actividad fisiológica específica, de importancia en la descomposición y transformación de la materia orgánica, presentaron fluctuaciones en la dinámica poblacional durante las etapas fenológicas del policultivo maíz-frijol-haba. Se observó un incremento considerable al aplicar 40 t ha^{-1} de estiércol al tepetate, en bacterias amilolíticas y proteolíticas, así como en los microorganismos celulolíticos totales, pero la respuesta de los hongos no fue significativa (cuadro 8). También se observó un aumento significativo al avanzar el desarrollo de los cultivos, independientemente de la aplicación de materia orgánica. Se obtuvo mayor población bacteriana en la muestra final (168 dds) debido a que con la senescencia los cultivos aportan al suelo residuos vegetales radicales y aéreos. El tepetate cultivado de manera tradicional siempre tuvo mayores poblaciones de microorganismos que el tepetate sin cultivar. En hongos amilolíticos y ligninolíticos existieron diferencias estadísticas significativas, no así en los proteolíticos. La microbiota se ha multiplicado y ha biodegradado la

materia orgánica, con lo cual se confirma que en el proceso de rehabilitación de tepetate las prácticas microbiológicas juegan un papel trascendental (Gutiérrez, 1994).

Poblaciones		15 das UFC	50 dds UFC	100 dds UFC	168 dds UFC
Bacterias					
Amilolíticas	CMO	$6,2 \times 10^6$	$2,2 \times 10^6$	$2,0 \times 10^7$	$1,7 \times 10^7$
	SMO	$4,2 \times 10^6$	$2,2 \times 10^6$	$2,6 \times 10^6$	$3,7 \times 10^6$
Proteolíticas	CMO	$1,2 \times 10^7$	$4,4 \times 10^6$	$2,1 \times 10^6$	$5,4 \times 10^6$
	SMO	$6,4 \times 10^5$	$2,4 \times 10^6$	$2,5 \times 10^6$	$3,2 \times 10^6$
Hongos					
Amilolíticos	CMO	$5,1 \times 10^3$	$2,7 \times 10^4$	$9,6 \times 10^4$	$6,2 \times 10^4$
	SMO	$4,7 \times 10^3$	$2,7 \times 10^3$	$4,5 \times 10^4$	$3,8 \times 10^4$
Proteolíticos	CMO	$1,6 \times 10^4$	$3,7 \times 10^5$	$1,9 \times 10^6$	$3,6 \times 10^4$
	SMO	$2,8 \times 10^4$	$4,5 \times 10^5$	$1,9 \times 10^5$	$2,1 \times 10^4$
Ligninolíticos	CMO	$4,5 \times 10^3$	$2,0 \times 10^5$	$7,0 \times 10^5$	$4,0 \times 10^4$
	SMO	$2,4 \times 10^3$	$5,3 \times 10^3$	$2,7 \times 10^5$	$4,5 \times 10^4$
Celulolíticos totales	CMO	$1,2 \times 10^7$	$2,8 \times 10^6$	$1,2 \times 10^7$	$3,7 \times 10^6$
	SMO	$8,8 \times 10^6$	$3,0 \times 10^5$	$2,3 \times 10^7$	$1,5 \times 10^6$

das: días antes de la siembra; dds: días después de la siembra; UFC: Unidades Formadoras de Colonias; CMO y SMO: con y sin materia orgánica, respectivamente
Fuente: Gutiérrez (1994)

Cuadro 8 - Población de microorganismos con actividad fisiológica específica, encontrados en la rizosfera del policultivo maíz-frijol-haba en tepetate

Respiración microbiana

La incorporación de materia orgánica al suelo acelera la acción de los microorganismos, pues es la principal fuente de energía para que la población microbiana participe eficazmente en la descomposición de dicha materia. Esto incide en la nutrición vegetal y en la formación de agregados del suelo. Una forma indirecta de determinar la fertilidad global de un suelo es midiendo su actividad microbiana; en forma general, puede decirse que cuanto mayor sea la actividad microbiana más productivo es el suelo. Existe una correlación entre el número de microorganismos existentes en el suelo y el consumo de oxígeno; sin embargo, esto depende directamente del contenido de materia orgánica que se encuentra en el suelo. Por otra parte, se determinó el consumo de oxígeno para un tepetate roturado, uno sin roturar y un suelo agrícola adyacente. Se encontró mayor consumo de oxígeno en el suelo agrícola, seguido del tepetate roturado y por último del no roturado. Además, se encontró que el consumo de oxígeno aumentó al aplicar 40 t ha^{-1} de materia orgánica. Al analizar tepetate rizosférico de maíz, haba, frijol y veza, se demostró la influencia de la materia orgánica en la actividad microbiana y en el consumo de oxígeno; el maíz y el frijol presentaron mayor consumo de oxígeno que el haba y la veza. A su vez, el consumo fue menor cuando los cultivos se sembraron sin la adición de materia orgánica. Por último, el menor valor de consumo de oxígeno se encontró en el tepetate sin sembrar (Matías *et al.*, 1992).

Se evaluó la respiración microbiana de acuerdo con el método de Jenkinson y Powlson (1976), el cual determina la cantidad de CO_2 producido por los microorganismos

del suelo. Al analizar los datos de estudios realizados en la asociación maíz-frijol-haba, en la asociación maíz-frijol ayocote, en trébol y en veza, con muestreos en tres etapas (50, 100 y 150 dds), se concluyó que los valores más altos de producción de CO_2 se presentaron en los tratamientos con aplicación de materia orgánica. En leguminosas forrajeras se incrementa considerablemente 150 dds. Lo anterior indica que la tendencia general es que la biomasa microbiana sea menor en los tratamientos sin aplicación de materia orgánica y en aquellos con fertilización, y aumente con la aplicación de materia orgánica —cuadro 9— (Rodríguez-Mendoza *et al.*, 1995).

Cuadro 9
Respiración microbiana (producción de CO_2, en µg) en suelo rizosférico de diferentes cultivos en tepetates, en tres fechas de muestreo
(adaptado de Rodríguez-Mendoza *et al.*, 1995)

	Días de incubación	Fecha de muestreo		
		50 dds	100 dds	150 dds
Maíz-Frijol-Haba				
CMO	8	16	4	5
SMO	8	7	1	7
CMO	15	18	5	4
SMO	15	3,0	4	9
Maíz-Frijol ayocote				
CMO	8	14,5	nd	9
SMO	8	6	nd	4,5
FER	8	5	nd	9
CMO	15	16	nd	10,5
SMO	15	5	nd	5
FER	15	3	nd	6
Trébol				
CMO	8	6	4	10
SMO	8	5	3	8
CMO	15	8	3	10
SMO	15	4	4	16
Veza				
CMO	8	7	2	12
SMO	8	8	2	9
CMO	15	7	4	12
SMO	15	4	4	16

dds: días después de la siembra; CMO: con materia orgánica; SMO: sin materia orgánica; FER: fertilización inorgánica; nd: no se determinó.

Referencias bibliográficas

ÁLVAREZ S., J. D., 1992: *Manejo agroecológico y actividad microbiana en la recuperación de tepetates*, Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, 123 p.

APARICIO-TEJO, T. M.; ARRESE-IGOR, C.; BECANA, M., 1993: Fijación de nitrógeno, en *Fisiología y bioquímica vegetal*, J. Azcon-Bieto y M. Talon (editores), Editorial Interamericana-Mc Graw-Hill, Madrid, España, p. 193-213.

FLORES G., A.; FERRERA-CERRATO, R.: Uso de vermicomposta y micorriza arbuscular en cebolla para la rehabilitación de tepetates, datos no publicados.

GARCÍA C., R., 1996: *Vermicomposta e inoculación micorrízica en maíz y cebolla cultivados en tepetate*, Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México, 129 p.

GÓMEZ, G.; FERRERA-CERRATO, R., 1990: *Prunus serotina* var. capulí (Cav. Mc. Vaugh) y la micorriza V-A en tepetate amarillo del estado de México, en *Resúmenes del V Congreso Latinoamericano de Botánica. I Simposio Latinoamericano de Micorrizas*, La Habana, Cuba, p. 399

GONZÁLEZ, L., 1987: *Estudio bajo invernadero de la simbiosis* Glomus-Rhizobium *en el desarrollo del trébol rojo* (Trifolium pratense) *en tepetates de San Dieguito Xochinacan*, Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México, 125 p.

GUTIÉRREZ, O. A., 1994: *Los microorganismos como un indicador en la recuperación de tepetates en el estado de Tlaxcala*, Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, 117 p.

GUZMÁN-PLAZOLA, R. A.; FERRERA-CERRATO, R., 1990: *La Endomicorriza vesículo-arbuscular en las leguminosas*, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, 120 p.

JENKINSON, S.; POWLSON, D. S., 1976: The Effects of Biocidal Treatment on Metabolism in Soil. A Method for Measuring Soil Biomass, in *Soil Biol. Biochem.*, 8, p. 209-213.

MATÍAS, S., 1990: Azolla caroliniana *como biofertilizante en* Eysenhardtia polystachya *inoculada con micorriza V-A creciendo en tepetate*, Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México, 156p.

MATÍAS, S.; FERRERA-CERRATO, R., 1996: Efecto de microorganismos y adición de materia orgánica en la colonización micorrízica en la recuperación de tepetates, en *Avances de Investigación*, J. Pérez-Moreno y R. Ferrera-Cerrato (editores), Área de Microbiología de Suelos, IRENAT-PROEDAF, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, p. 52-61.

MATÍAS, S.; FERRERA-CERRATO, R.; ZEBROWSKI, C., 1992: Análisis de la microflora asociada al manejo agroecológico en la recuperación de tepetates, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 419-424.

PALACIOS, M.; KUMIKO, S.; GAMA, J.E.; VALLEJO, G., 1991: Los hongos micorrízicos V-A como biomejoradores de cultivos en suelos de origen volcánico y calcimórfico muy deficiente, en *Memoria de la Convención sobre la Evolución geológica de México. Primer Congreso Mexicano de Mineralogía*, Pachuca, Hidalgo, México, 23-28 de junio), p. 151-155.

QUINTERO R., M.; FERRERA-CERRATO, R., 1992: La endomicorriza vesículo arbuscular en la recuperación de tepetates, en *La investigación edafológica en México 1991-1992. Memorias del XXV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo*, J. L. Tovar y R. Quintero (editores), Acapulco, México, p. 230.

REY, J. S.; GAISKA, B.; CAMACHO, F.; JEAN, D.; FERRERA-CERRATO, R., 1992: Desarrollo de plantas endomicorrizadas en áreas erosionadas, en *La investigación edafológica en México 1991-1992. Memorias del XXV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo*, J. L. Tovar y R. Quintero (editores), Acapulco, México, p. 229.

RÍOS G., S., 1994: *Manejo de la endomicorriza V-A en plantas arbóreas para la rehabilitación de tepetate*, Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México, 118 p.

RODRÍGUEZ-MENDOZA, M. N.; FERRERA-CERRATO, R.; FLORES, A.; GONZÁLEZ, P., 1995: *Importancia de los microorganismos en el manejo agroecológico con fines de recuperación de tepetates*, Informe anual al CONACyT, Área de Microbiología de Suelos, IRENAT-PROEDAF, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, 98 p.

RODRÍGUEZ-MENDOZA, M. N.; GONZÁLEZ-CHÁVEZ, M. C.; FERRERA-CERRATO, R., 1996: Manejo de la doble inoculación (*Glomus-Rhizobium*) en dos leguminosas arbóreas con uso en la recuperación de suelos, en *Avances de investigación*, Área de Microbiología de Suelos, IRENAT-PROEDAF, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, p.180-187.

SMITH, D. C.; DOUGLAS, A. E., 1987: *The Biology of Symbiosis*, Edward Arnold, Londres, 302 p.

Melilotus albus inoculado con *Rhizobium meliloti* y aplicación de materia orgánica en la recuperación de un tepetate

Julián Delgadillo, Ronald Ferrera-Cerrato

Abstract

Mexico has large areas of eroded lands known as tepetates. *These soil materials present low productivity due to particular physical, chemical and biological properties. There are few works related with the use of beneficial microorganisms in the recovering of degraded land. The objective of this work was to determine the role of inoculated* Melilotus *on the improvement of some chemical and physical properties of the* tepetates. *Plants of* Melilotus *species were grown on a* tepetate *with and without inoculation with* Rhizobium *in plots that, in addition, were manured. Control plots were carried on each case. Dry matter production of* Melilotus *with and without inoculation were 4.7 and 2.7 t* ha^{-1}, *respectively. The soil organic matter increased of 0.34 to 2.1 % as a consequence of the inoculation and the manure application, respectively. Fungi population in the soil decreased 33 %, bacteria increased of 1.26 x* 10^8 *to 4.5 x* 10^8 *and the actinomycetes of 5.6 x* 10^3 *to 1.35 x* 10^6 *CFU by g of dry soil. Higher soil fertility, and high forage yield of good nutritional quality of* Melilotus *were found after a cultivation cycle in the treatments with inoculated plants and organic matter addition.*

Keywords: *Sweet Clover* - Rhizobium - *Forage Legumes - Degraded Soils - Reclamation*

INTRODUCCIÓN

Los microorganismos del suelo intervienen en la rehabilitación de zonas degradadas como los tepetates. Juegan un papel fundamental debido a sus actividades metabólicas como la biotransformación de la materia orgánica y la síntesis de humus. Además, aportan a los agro-ecosistemas múltiples beneficios, pues efectúan diversos procesos biodegradativos a través de sus complejos sistemas enzimáticos.

En los tepetates, la degradación de la materia orgánica y su incorporación a los suelos tiene los siguientes efectos benéficos: agregación de las partículas, estabilidad de agregados, aumento de la porosidad, incremento de la conductividad hidráulica, conservación de la humedad, etc. (Gutiérrez, 1994).

En la fijación de nitrógeno (N_2) de la atmósfera por parte de sistemas biológicos, aquel es primeramente convertido en amonio, elemento asimilado más rápidamente en los procesos metabólicos celulares.

Desde el punto de vista agrícola, el sistema más importante de fijación de N es el que relaciona a los microorganismos con las plantas. La mayoría de las especies de la familia de las leguminosas son capaces de fijar N en simbiosis con bacterias del género *Rhizobium*.

En el Área de Microbiología de Suelos del Colegio de Postgraduados se han desarrollado estudios de campo e invernadero con el uso de distintos tipos de microorganismos para la recuperación de tepetates, logrando importantes avances en la rehabilitación de los mismos. Algunos han sido realizados utilizando fijadores simbiontes en leguminosas (Álvarez, 1992; Ferrera-Cerrato *et al.*, 1993; Rodríguez-Mendoza *et al.*, 1995) y otros con micorriza arbuscular (Flores y Ferrera-Cerrato, 1997; García, 1996; Gómez y Ferrera-Cerrato, 1990; Matías y Ferrera-Cerrato, 1996; Quintero y Ferrera-Cerrato, 1992; Ríos, 1994).

Desde el punto de vista de la nutrición animal, las leguminosas representan la principal fuente de alimentación del ganado, en especial el lechero, pues aportan proteína y fibra de excelente calidad. En el altiplano mexicano, la producción de leguminosas forrajeras para la alimentación del ganado lechero estabulado, se limita a los reducidos distritos de riego de la zona de los llanos, donde se produce alfalfa. La insuficiente producción, así como las largas distancias de transporte, provocan un elevado costo de este forraje, lo que lo hace inaccesible para los pequeños productores. Por ello, es imperativa la búsqueda de leguminosas adaptadas a las condiciones climáticas y edáficas de las zonas tepetatosas de Tlaxcala, que puedan contribuir a la alimentación animal, con un aporte de nutrimentos semejante al de la alfalfa.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo de campo se realizó en la comunidad de Tlalpan, municipio de Hueyotlipan en el estado de Tlaxcala. La siembra del trébol ladino (*Melilotus albus*) se hizo al voleo, después del barbecho y rastreo de la terraza. Se aplicaron dos tratamientos: 1) sin inoculación y sin aplicación de materia orgánica (MO); 2) con aplicación de 40 t ha^{-1} de MO fresca más inoculación con *Rhizobium meliloti*. El diseño experimental utilizado fue completamente al azar con cuatro repeticiones. La aplicación de la MO se hizo 15 días antes de la siembra para propiciar su descomposición.

Antes de la aplicación de materia orgánica al suelo y 180 días después de la siembra, se realizaron muestreos de suelo para llevar a cabo análisis de fertilidad y de poblaciones microbianas. Se tomaron muestras de los componentes nutritivos y la producción del forraje: 90 días después de la siembra, al presentarse el 10 % de floración en el tratamiento con materia orgánica (momento en el cual se realizó un corte a 20 cm de altura); 15 días después del corte (ddc); 30 ddc; 45 ddc; 60 ddc.

Con las cepas de *Rhizobium meliloti* CP1, CP89, CPMEX176, CPMEX177, CPMEX178 y CPMEX179, pertenecientes a la colección microbiana del Área de Microbiología de Suelos, se procedió a la preparación de un inoculante multicepa con turba molida, neutralizada y estéril como soporte, la que se impregnó con 10^9 bacterias mL^{-1} crecidas en caldo extracto de levadura manitol (CELM) para posteriormente proceder a la inoculación de la semilla (Ferrera-Cerrato *et al.*, 1993). Por gramo de semilla inoculada, se tuvo una carga de 5,98 x 10^6 unidades formadoras de colonias (UFC), de acuerdo con el método de cuantificación de *Rhizobium* en semilla (Ferrera-Cerrato *et al.*, 1993).

En el experimento se midieron las siguientes variables:

Variables bromatológicas

- biomasa seca y fresca por hectárea,
- digestibilidad *in vitro* de la materia seca (Narris, 1970),
- porcentaje de proteína (calculado mediante el método Kjeldhal de determinación del nitrógeno total).

Variables agronómicas

- peso seco de la parte aérea por planta
- peso seco de la raíz,
- peso seco de los nódulos,
- número de nódulos.

Variables microbiológicas

Se sembraron diluciones decimales de tepetate rizosférico en diferentes medios:

- para hongos, Agar Papa Dextrosa (PDA) con rosa de Bengala a 1 % (Ferrera-Cerrato *et al.*, 1993);
- para bacterias totales, medio Bunt y Rovira (Ferrera-Cerrato *et al.*, 1993);
- para actinomicetos, medio Czapek (Warcup, 1963).

Además, se determinó la actividad de la enzima nitrogenasa, por el método de reducción de acetileno (Ferrera-Cerrato *et al.*, 1993).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables bromatológicas

En el caso de realizar tres cortes por año y tomando en cuenta una producción de materia seca por corte de 4,7 t ha^{-1} para el tratamiento con materia orgánica más inoculación, se tendría una carga de 2,86 unidades animal (UA)/ha. (Una UA es equivalente a un bovino de 454 kg de peso vivo.) En el testigo, con una producción por corte de 2,5 t ha^{-1}, se tendría una carga de 1,52 UA ha^{-1}, valores comparables a los reportados para leguminosas arbóreas en climas tropicales secos. A su vez, estas cargas son muy superiores a las que se obtienen en agostaderos con pastizales nativos o introducidos en las regiones secas del país, donde se reporta que los coeficientes de agostadero no deben ser menores de 12 ha UA^{-1} para evitar daños por sobrepastoreo. Las cargas señaladas para diversos cultivos y bajo diferentes condiciones de humedad se presentan en el cuadro 1.

El porcentaje de proteína en el tratamiento inoculado varió de 16 a 26, según la etapa de crecimiento del cultivo, con un promedio de 22,11 %. El tratamiento testigo presentó un contenido de proteína del 17 al 22 %, de acuerdo con la etapa fenológica de la planta, con un promedio de 20,4 %. Este forraje, al rebasar el orden del 20 % de proteína, tiene un alto valor nutritivo (cuadro 1).

Con valores de hasta el 82 %, la digestibilidad de la materia seca es una variable en la que se obtuvieron magníficos resultados. Al considerar que la digestibilidad en alfalfa varía del 69 al 77 % y que la de los pastos de zonas tropicales y áridas se encuentra en un 50 %, los promedios de 77,53 % para el tratamiento inoculado y 74 % para el testigo son un indicador de la excelente calidad de esta leguminosa (cuadro 1).

Es conveniente la realización de estudios que corroboren la palatabilidad de esta leguminosa para las especies animales de mayor importancia en la región (ovinos, bovinos, caprinos y equinos), ya que esta característica aunada a su alta calidad nutritiva redundará

Especie	Precipitación anual mm	Rend. M.S. t ha[a] año[a]	Carga animal UA ha[a]	Dig. M.S. %	Proteína %
Medicago sativa[a]	riego	50 - 80	8-14	69 - 77	16 - 21
Leucaena sp.[b]	800	15,2	2,62	77 - 81	27,8
M. albus[c]	838	7,5 - 14,1	1,52 - 2,86	74 - 77	20,4 - 22,1
Pastos tropicales perennes[d]	1.200	32 - 58	5,5 - 10	52 - 68	5,3 - 9,7
Bouteloua spp.[e]	500	0,5 - 0,4	0,09 - 0,07	50 - 67	6 - 8,5

[a]: De Boever *et al.* (1994); [b]: Carrete *et al.* (1993); [c]: datos del presente trabajo; [d]: Betancourt *et al.* (1991); [e]: González y Ochoa (1990)
Rend. M.S.: Rendimiento de materia seca; Dig. M.S.: Digestibilidad de la materia seca

Cuadro 1 - Producción de forraje en diversas especies con distintas condiciones de humedad

en un elevado consumo voluntario de alimento, lo que a su vez se derivará en una elevada producción de leche, carne o lana.

En la forma de suministro se observó una alta versatilidad (consumo en verde, alimentación en pastoreo, forraje henificado o ensilado) por lo que el ganado puede distribuirse de acuerdo a las necesidades fisiológicas de los animales y a las condiciones climáticas.

Variables agronómicas

Para las variables peso seco de la parte aérea por planta, peso seco de la raíz, número de nódulos por planta y peso seco de los nódulos, no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos de inoculación y el testigo. Numéricamente se comportaron de forma similar, lo que indica la presencia de cepas nativas eficientes en fijación de nitrógeno, o bien que en la competencia entre cepas nativas y cepas inoculadas, estas últimas presentaron desventajas (cuadro 2).

Tratamiento	Fecha	AN µmol planta^{-1} hr^{-1}	Peso Seco g planta^{-1}	PSR g planta^{-1}	N° de nódulos por planta	PSN g planta^{-1}
CMO	90 dds	0,738	3,87	2,11	238,75	0,047
CMO	60 ddc	0,795	5,64	3,15	386,50	0,078
SMO	90 dds	0,604	4,12	2,15	221,00	0,042
SMO	60 ddc	0,683	4,13	2,32	279,50	0,053

AN: Actividad de la enzima nitrogenasa (producción de etileno); PSR: Peso Seco de la Raíz; PSN: Peso Seco de los Nódulos; CMO: Con Materia Orgánica más inoculación; SMO: testigo.

Cuadro 2 - Actividad de la enzima nitrogenasa y variables agronómicas en trébol (Melilotus albus) en diferentes etapas del cultivo

Variables microbiológicas

En lo que se refiere a la actividad de la enzima nitrogenasa, los resultados muestran que no existieron diferencias significativas entre el cultivo 90 días después de la siembra y 60 después del corte —ambas fechas corresponden a la etapa de inicio de la floración—

(cuadro 2), lo que indica que la actividad de los nódulos se mantiene cuando el cultivo se encuentra en la etapa de rebrote. Asimismo, el tratamiento con inoculación presentó valores más altos en esta variable, pero no hubo diferencias significativas en comparación con el testigo, lo que hace suponer la existencia de cepas nativas eficientes en la fijación de nitrógeno (cuadro 2).

Se observó un aumento en las poblaciones de bacterias y actinomicetos rizosféricos del trébol. En el caso de las bacterias, antes de la incorporación de materia orgánica, se tuvo, en el tratamiento con inoculación, una población de 6,1 x 10^7, que 180 días después de la siembra (dds) aumentó a 7,55 x 10^8 unidades formadoras de colonias (UFC) por g de suelo seco; en el testigo, pasó de 4,4 x 10^7 a 1,14 x 10^8. En el caso de los actinomicetos, en el tratamiento con inoculación, se tuvo una población de 3,4 x 10^5 que se incrementó a 1,2 x 10^6 UFC g^{-1} de suelo seco; en el testigo, creció de 4,4 x 10^5 a 1,49 x 10^6. Se observó una disminución de las poblaciones de hongos en ambos tratamientos, asociada a cambios en el pH del suelo por efecto de aplicación de materia orgánica o de los cambios que provocó el sistema radical de la leguminosa, ya que la materia orgánica, al ser alcalina, basifica las condiciones del suelo lo que reduce el desarrollo de los hongos e incrementa el de bacterias y actinomicetos. La población de hongos en el tratamiento con inoculación disminuyó de 3,2 x 10^4 antes de la incorporación de materia orgánica a 5,27 x 10^3 UFC g^{-1} de suelo seco 180 dds. En el testigo, pasó de 7,4 x 10^4 a 5,93 x 10^3 UFC g^{-1} de suelo seco.

Entre los tratamientos, las poblaciones de hongos, bacterias y actinomicetos no presentan diferencias significativas. Sin embargo, según la fecha del muestreo, las diferencias sí lo son, en el caso de esas mismas variables.

Después de un ciclo de cultivo del trébol, se observó una recuperación del tepetate en algunas características químicas que indican un incremento de la fertilidad, principalmente la cantidad de materia orgánica (figura 1).

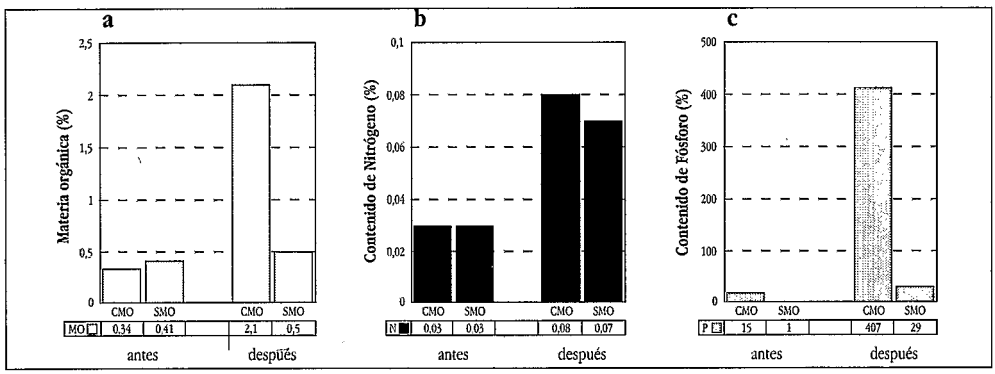


Figura 1 - Características químicas del tepetate, antes de la aplicación de materia orgánica y 180 dds
CMO: aplicación de materia orgánica más inoculación; SMO: testigo; a) materia orgánica, b) nitrógeno, c) fósforo.

Referencias bibliográficas

ÁLVAREZ S., J. D., 1992: *Manejo agroecológico y actividad microbiana en la recuperación de tepetates*, Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, 123 p.

BETANCOURT, R; EGUIARTE, J. A.; BECERRA, J., 1991: Efecto de la altura al corte en la producción de forraje de cinco zacates perennes, en *Técnica Pecuaria Mexicana*, 29 (2), p. 79-85.

CARRETE, F. O.; EGUIARTE, J. A.; SÁNCHEZ, R., 1993: Comparación de cuatro alturas de corte en la producción y calidad del forraje de dos variedades de *Leucaena*, en *Técnica Pecuaria en México*, 31 (2), p. 122-127.

DE BOEVER, J. L.; COTTYN, B. G.; VANACKER, J. M.; BOUCQUE, C. V., 1994: An Improved Enzymatic Method by Adding Gammanase to Determine Digestibility and Predict Energy Value of Compound Feeds and Raw Materials for Cattle, in *Animal Feed Science and Technology*, 47 (1), p. 1-18.

FERRERA-CERRATO, R.; GONZÁLEZ, M. C.; RODRÍGUEZ, M. N., 1993: *Manual de agromicrobiología*, Editorial Trillas, México, 142 p.

FLORES G., A.; FERRERA-CERRATO, R.: Uso de vermicomposta y micorriza arbuscular en cebolla para la rehabilitación de tepetates, datos no publicados.

GARCÍA C., R., 1996: *Vermicomposta e inoculación micorrízica en maíz y cebolla cultivados en tepetate*, Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México, 129 p.

GÓMEZ, G.; FERRERA-CERRATO, R., 1990: *Prunus serotina* var. capulí (Cav. Mc. Vaugh) y la micorriza V-A en tepetate amarillo del estado de México, en *Resúmenes del V Congreso Latinoamericano de Botánica. I Simposio Latinoamericano de Micorrizas*, La Habana, Cuba, p. 399

GONZÁLEZ, R.; OCHOA, J. G., 1990: Condición y carga animal de los pastizales de navajita del estado de Durango, en *Técnica Pecuaria Mexicana*, 28 (3), p. 159-164.

GUTIÉRREZ, O. A., 1994: *Los microorganismos como un indicador en la recuperación de tepetates en el estado de Tlaxcala*, Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, 117 p.

MATÍAS, S.; FERRERA-CERRATO, R., 1996: Efecto de microorganismos y adición de materia orgánica en la colonización micorrízica en la recuperación de tepetates, en *Avances de investigación*, J. Pérez-Moreno y R. Ferrera-Cerrato (editores), Área de Microbiología de Suelos, IRENAT-PROEDAF, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, p. 52-61.

NARRIS, L .E., 1970: Nutrition Research Techniques for Domestic and Wild Animals, in *Academic Press*, Vol. 1, New York, p. 505

QUINTERO R., M.; FERRERA-CERRATO, R., 1992: La endomicorriza vesículo arbuscular en la recuperación de tepetates, en *La investigación edafológica en México 1991-1992. Memorias del XXV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo*, J. L. Tovar y R. Quintero (editores), Acapulco, México, p. 230.

RÍOS G., S., 1994: *Manejo de la endomicorriza V-A en plantas arbóreas para la rehabilitación de tepetate*, Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México, 118 p.

RODRÍGUEZ-MENDOZA, M. N.; FERRERA-CERRATO, R.; FLORES, A.; GONZÁLEZ, P., 1995: *Importancia de los microorganismos en el manejo agroecológico con fines de recuperación de tepetates*, Informe anual al CONACyT, Área de Microbiología de Suelos, IRENAT-PROEDAF, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, 98 p.

WARCUP, J. H., 1963: Ocurrence of Dormant Ascospores in Soil, in *Nature*, 197, p. 1.317-1.318.

Adición de vermicomposta e inoculación de endomicorriza en seis variedades criollas de maíz cultivadas en tepetate

Salustio Santamaría R., Ronald Ferrera-Cerrato

Abstract

An experiment with six local maize varieties grown on a tepetate *of Tlaxcala was established under greenhouse conditions. Vermicompost and arbuscular mycorrhiza were applied to the sustrate and the effect on height, foliar area, photosyntesis, dry weight, root volume and mycorrhizae colonization were evaluated 50 days after of the sowing. A beneficial effect with the addition of vermicompost was observed in all evaluated variables. The inoculation with mycorrhizae did not show beneficial effects maybe due to a low colonization percentage (< 6 %). The addition of vermicompost (12 t ha^{-1}) caused a 68 % increase of foliar area in the local variety* Negro *in relation to control. Photosyntetic activity of local variety* Cañuela *was 146 % higher than that of the* Negro *variety. The higher photosyntetic activity increased dry mater (32 %) and height (27 %) of the* Cañuela *variety.*

Keywords: *Organic Matter - Mycorrhiza - Zea Mays* - Tepetate

INTRODUCCIÓN

La utilización de vermicomposta ha mejorado las características físicas, químicas y biológicas del suelo (Edwards *et al.*, 1985; Penninck y Verdonck, 1987). Asimismo, el uso de la micorriza arbuscular en algunas gramíneas ha dado buenos resultados en el crecimiento y producción de materia seca. Cuando el hongo se encuentra presente en las raíces, se incrementa la concentración de fósforo en la planta (Bethlenfalvay *et al.*, 1982; Tobar *et al.*, 1994). Sin embargo, algunas variedades de maíz han mostrado poca dependencia de la asociación micorrízica, posiblemente debido al desarrollo de las raíces laterales (Estañol, 1992). Por otra parte, los tepetates son materiales endurecidos, ricos en sílice y sodio; son más arcillosos, menos densos y más porosos que el suelo, retienen más agua, aunque su reserva hídrica útil es un tanto inferior. Su porosidad gruesa es casi nula, por lo que la conductividad hidráulica es muy lenta. Son más alcalinos, contienen más bases intercambiables y están saturados en bases (Quantin *et al.*, 1993); su fertilidad se ve afectada por la falta de macroporos y, por lo tanto, una deficiente aireación, lo que determina una baja permeabilidad y una restricción de las raíces de las plantas, además de su deficiencia en nitrógeno y fósforo asimilables.

La vermicomposta es un medio apropiado para el desarrollo de los microorganismos del suelo (Doube *et al.*, 1994) y puede poseer propágulos de microorganismos fijadores de nitrógeno, lo que mejora el aprovechamiento de este nutrimento. Su aplicación determina incrementos en el porcentaje de micorrización por parte los cultivos (Kale *et al.*, 1992) y que de esta manera las plantas aprovechen mejor el fósforo (Mansell *et al.*, 1981).

Este trabajo forma parte de una serie de investigaciones sobre la recuperación de tepetates. Trata del favorable papel de la vermicomposta (composta producida por lombriz) en el mejoramiento de las características físicas y nutrimentales de los suelos, así como del potencial de las micorrizas en el aprovechamiento de los nutrimentos y la disponibilidad de humedad para las plantas. Su objetivo fue evaluar el comportamiento de 6 variedades criollas de maíz frente a la aplicación de vermicomposta y al uso de la endomicorriza *Glomus* sp. Zac-19, para determinar las variedades y tratamientos de tepetate más eficaces, a fin de practicarlos en la región de Tlaxcala, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se estableció en invernadero, en el Colegio de Postgraduados. Se utilizó tepetate del estado de Tlaxcala, México. El material se depositó en macetas de 2 kg, en las que se sembraron seis variedades criollas de maíz provenientes de la misma región que el tepetate. Para el tratamiento con micorriza, se aplicaron, en el tepetate de las macetas, 5 g de inóculo formado por arena y esporas de la endomicorriza *Glomus* sp. Zac-19 con un 33 % de colonización total. Otro tratamiento consistió en la adición de 6,15 g de vermicomposta (12 t ha^{-1}) con pH de 7,6 y 36 % de humedad. En el tercer tratamiento, las macetas recibieron inoculación de endomicorriza (5 g de inóculo) y de vermicomposta (12 t ha^{-1}), mientras que otras macetas no fueron objeto de tratamiento alguno (testigo). Las semillas se depositaron sobre el inóculo respectivo a una profundidad aproximada de 2 cm. Las plantas se regaron cada tercer día hasta alcanzar la capacidad de campo. Se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial de 6 x 4 y cuatro repeticiones por tratamiento. La unidad experimental fue la maceta.

Las variables evaluadas en los tratamientos fueron:

a) la altura inicial siete días después de la siembra (dds), la misma que se estimó desde la base de la planta hasta el ápice de la primera hoja;
b) la altura final 50 dds, hasta el último nudo;
c) el peso fresco y seco de la parte aérea al final del experimento (50 dds);
d) el volumen radical al final del experimento (50 dds);
e) el área foliar al final del experimento, utilizándose un medidor LICOR modelo 3100;
f) la fotosíntesis antes de la cosecha de las plantas, cuya medición se efectuó con un medidor portátil LICOR Modelo 6200;
g) la colonización micorrízica (Phillips y Hayman, 1970), para cuya evaluación se recolectaron las raíces al final del experimento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las variables evaluadas mostraron diferencias estadísticas debidas tanto al tratamiento del tepetate como a las distintas variedades criollas de maíz.

Fotosíntesis

Al parecer, la aplicación de vermicomposta, la inoculación de la endomicorriza o el uso de ambas en la rehabilitación de tepetates no inciden en el proceso fotosintético del maíz (cuadro 1). Las limitaciones ambientales conducen a una menor eficiencia de la

conversión de la energía luminosa (Scurlock *et al.*, 1988). Asimismo, la reducción en la fotosíntesis puede presentarse particularmente cuando se produce una combinación de luz intensa y baja temperatura, o bien por un déficit hídrico. Sin embargo, estas condiciones no se presentaron durante el experimento, ya que la humedad fue controlada y el otro factor mencionado fue inexistente pues el cultivo se desarrolló en invernadero.

Tratamiento	A-7d (cm)	A-50d (cm)	Peso seco[z] (g)	Tasa fotosintética ($\mu molesm^{-2}s^{-1}$)
Testigo	8,25 *b*	34 *a*	1,37 *b*	4,87 *a*
Glomus sp. Zac-19	9,04 *ab*	31 *a*	1,27 *b*	4,33 *a*
Vermicomposta	9,75 *a*	35 *a*	1,77 *a*	4,82 *a*
Zac-19 + Vermicomposta	9,08 *ab*	35 *a*	1,95 *a*	4,34 *a*

Valores con letras diferentes en las columnas son estadísticamente diferentes (Tukey $\alpha = 0,05$).
A-7d = Altura en el ápice de las hojas 7 días después de la siembra
A-50d = Altura en el último nudo 50 días después de la siembra
[z]: Peso seco de la parte aérea 50 días después de la siembra

Cuadro 1 - Efecto del tratamiento de tepetate en la respuesta del maíz

Por otro lado, se observaron diferencias significativas (Tukey $\alpha = 0,05$) en la actividad fotosintética según las variedades utilizadas (cuadro 2). Es posible mejorar la eficiencia fotosintética mediante el manejo de las bases fisiológicas y genéticas (Nasyrov, 1978). La variedad Cañuela superó en un 146 % a la variedad Negro, lo que originó un incremento del 32 y 27 % en el peso seco y la altura 50 dds respectivamente. Lo anterior se explica por el hecho de que el proceso fotosintético transforma la energía luminosa en energía química, y esta, almacenada, es la biomasa que se puede recolectar (Roberts *et al.*, 1988).

Altura de las plantas

La variable altura inicial mostró diferencias significativas según los tratamientos del tepetate (cuadro 1); se observó que, al aplicar vermicomposta, las plantas jóvenes se desarrollaron más, lo que puede atribuirse a una rápida germinación debida a la aplicación de materia orgánica.

Según Edwards *et al.* (1985), la aplicación de vermicomposta incrementó el porcentaje de germinación de las semillas de hortalizas y de arbustos ornamentales.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede afirmar que la altura de las variedades influyó en la actividad fotosintética de las hojas del maíz en las diferentes variedades, ya que Chino, Blanco tardío y Cañuela (las de mayores alturas) presentaron un valor numérico superior de actividad fotosintética. Sin embargo, en el caso de la variedad Chino, dicho valor fue inferior al de las otras dos variedades mencionadas, pero no hubo diferencia estadística significativa (cuadro 2). Lo anterior muestra la diferencia en la capacidad de adaptación de las variedades a las condiciones en las que se cultivaron. La altura de las plantas al último nudo, medida 50 dds, no presentó diferencias entre los tratamientos y solo se observaron diferencias estadísticas ligadas a las variedades (cuadro 2). Esto muestra que los tratamientos proporcionan beneficios apreciables en cuanto a esta variable únicamente en la etapa inicial del desarrollo, o que quizá habría sido necesaria una

Variedad	A-7d (cm)	A-50d (cm)	Peso seco[z] (g)	Tasa fotosintética ($\mu molesm^{-2}s^{-1}$)
Negro	8,68 *a*	29 *b*	1.41 *bc*	2,16 *b*
Palomero	9,50 *a*	31 *ab*	1.32 *c*	4,62 *ab*
Chino	9,25 *a*	37 *a*	1.63 *abc*	4,36 *ab*
Blanco precoz	8,81 *a*	32 *ab*	1.55 *abc*	3,79 *b*
Blanco tardío	9,13 *a*	37 *a*	1.77 *ab*	6,32 *a*
Cañuela	8,81 *a*	37 *a*	1.87 *a*	6,32 *a*

Valores con letras diferentes en las columnas son estadísticamente diferentes (Tukey $\alpha = 0,05$).
A-7d = Altura en el ápice de las hojas 7 días después de la siembra
A-50d = Altura en el último nudo 50 días después de la siembra
[z]: Peso seco de la parte aérea 50 días después de la siembra

Cuadro 2 - Altura, peso seco y fotosíntesis de variedades de maíz cultivadas en tepetate

mayor cantidad de vermicomposta. La aplicación de estiércol en otros experimentos de recuperación de tepetate ha sido de 40 t ha^{-1}, pero en este experimento solo se utilizaron 12.

Peso seco

A pesar de los bajos resultados obtenidos en la determinación de esta variable (reflejo de la poca fertilidad del tepetate), la aplicación de la materia orgánica favoreció al peso seco de las variedades, habiéndose encontrado diferencias estadísticas significativas (Tukey $\alpha = 0,05$) respecto a los tratamientos sin aplicación de vermicomposta (cuadro 1). El incremento en la cantidad de vermicomposta aplicada se traduce en un aumento en el peso seco de las plantas (Flores y Ferrera-Cerrato, 1995). En campo, los rendimientos de grano cultivado en tepetate fueron muy bajos (menos de 0,3 t ha^{-1}), comparados con la media regional (1,82 t ha^{-1}), aun después de aplicar 40 t ha^{-1} de materia orgánica (Márquez *et al.*, 1992). La variedad Cañuela presentó el mayor peso seco de la parte aérea, aunque no hubo diferencias significativas entre ella y las variedades Chino, Blanco precoz y Blanco tardío (cuadro 2).

El valor del peso seco así como el de las demás variables evaluadas fue bastante bajo para la edad de las plantas, pero debe considerarse que el tepetate utilizado en este experimento fue recogido en un lugar no cultivado y sin cobertura vegetal. En este sitio, la producción de maíz fue baja el primer año de cultivo, pero con el cultivo continuo es posible incrementarla (Navarro y Zebrowski, 1992).

Área foliar

Al aplicar vermicomposta sola o al inocular micorriza más vermicomposta, se incrementó ligeramente el área foliar en las variedades Cañuela, Blanco precoz y Palomero, aunque el efecto fue mayor en las variedades Blanco tardío, Chino y Negro (figura 1a). También se observó que la aplicación de vermicomposta no incidió en la expresión de la micorriza en el valor del área foliar, como sucedió en el caso del peso seco. La variedad Negro con adición de vermicomposta o con inoculación micorrízica más vermicomposta superó en un 68 % a lo obtenido en el tepetate sin tratar (testigo). El área foliar determina en gran medida la actividad fotosintética y es al mismo tiempo una de las variables que

más influyen en la cantidad de biomasa y en el peso seco de los vegetales. Se encontró que la biomasa seca de la alfalfa crecida en tepetate se relacionaba con el ancho de la hoja, el mismo que varió en los diferentes tipos de suelo utilizados, incluyendo el tepetate (Nava *et al.*, 1992).

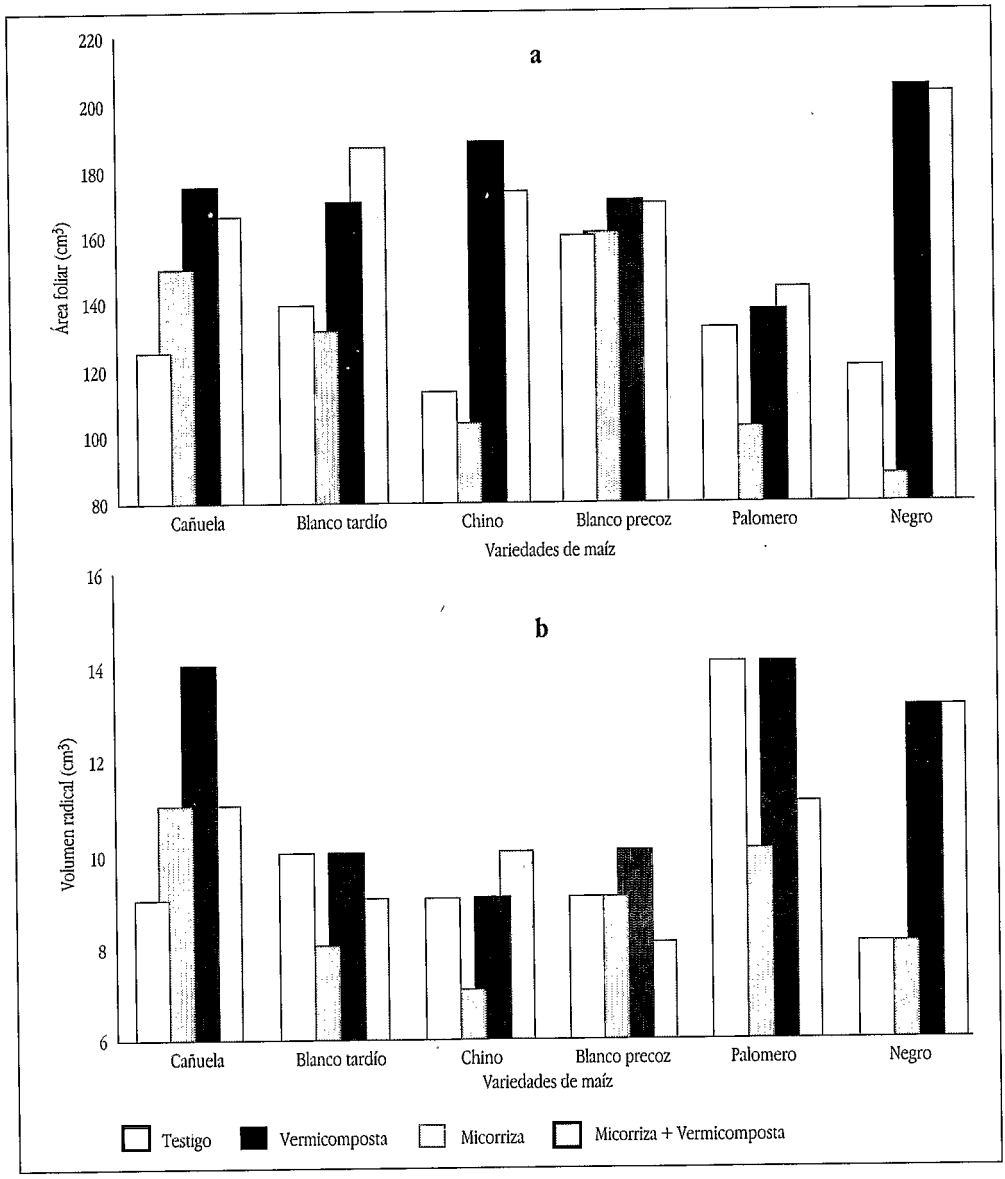


Figura 1 - Área foliar (a) y volumen radical (b) de seis variedades criollas de maíz, como respuesta a la aplicación de micorriza y vermicomposta en tepetate

Volumen radical

La extensión del sistema radical determina el volumen de suelo explorado para la obtención de nutrimentos, en lo cual la intensidad radical es menos importante (Haggar y Ewel, 1994). En el experimento, la extensión del sistema radical se vio limitada por el volumen de las macetas (2 dm^3). Posiblemente este factor incidió en todas las variables. Se observó que el sistema radical se concentró al fondo de la maceta. Por otra parte, el bajo contenido de fósforo en el tepetate (1 a 7 ppm) fue otro factor que limitó el crecimiento radical. Al respecto, Roselem *et al.* (1994) observaron que el peso radical de maíces híbridos dependió del contenido de fósforo en el suelo y de las características de los híbridos. Aunque la variedad Palomero presentó un mayor volumen radical al aplicarse vermicomposta, esto no resulta significativo ya que en el cultivo de esa misma variedad en tepetate sin tratamiento, el volumen radical fue comparable. Únicamente en la variedad Negro el volumen radical está ligado al área foliar y por lo tanto al peso seco (figura 1b).

Colonización micorrízica

Probablemente, la actividad de la endomicorriza no se manifestó debido al bajo porcentaje de colonización presentado por el inóculo (33 %). En el experimento, las plantas no mostraron diferencias estadísticas significativas (cuadro 3) en cuanto a la colonización por parte de la endomicorriza, siendo el porcentaje correspondiente relativamente bajo (< 6 %). De la misma manera, se encontró poca dependencia de la variedad de maíz con respecto a la micorriza (Estañol, 1992). Otro factor que pudo incidir en la baja colonización observada es la fecha en que se tomaron las muestras (50 dds). Al respecto, la mayor colonización en maíz cultivado en tepetate se obtuvo 100 dds, en tanto que 50 dds solo se encontró menos del 5 % de colonización al aplicarse 40 t ha^{-1} de materia orgánica (Quintero y Ferrera-Cerrato, 1992) y menos de 10 % con 60 t ha^{-1} (Matías-Crisóstomo y Ferrera-Cerrato, 1993). En los trabajos anteriormente citados se utilizaron 43 g de inóculo de endomicorriza por mata (1,52 t ha^{-1}), pero en condiciones de campo.

Variedad	Testigo %	Zac-19 %	Vermicomposta %	Zac-19 + vermicomposta %
Negro	1,66	8,66	3,11	3,66
Palomero	1,33	0,66	2,00	4,00
Chino	0,00	5,33	3,33	5,33
Blanco precoz	3,66	2,66	2,00	2,00
Blanco tardío	0,00	4,33	2.66	7,00
Cañuela	1,00	1,33	3,66	13,00
Media	1,27 *b*	3,94 *ab*	2,78 *ab*	5,86 *a*

Tukey $\alpha = 0,05$. Evaluación al final del experimento, 50 días después de la siembra.

Cuadro 3 - Colonización de la endomicorriza *Glomus* sp. Zac-19 en los diferentes tratamientos utilizados y variedades consideradas

Referencias bibliográficas

BETHLENFALVAY, G. J.; ULRICH, J. M.; BROWN, M. S., 1982: Plant Response to Mycorrizhal Fungi: Host, Endophyte, and Soil Effects, in *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49, p. 1.164-1.168.

DOUBE, M. D.; STEPHENS, P. M.; DAVOREN, C. W.; RYDER, M. H., 1994: Interactions betwen Earthworms, Beneficial Soil Microorganisms and Root Pathogens, in *Appl. Soil Ecol.*, 1, p. 3-10.

EDWARDS, C. A.; BURROWS, I.; FLETCHER, K. E.; JONES, B. A., 1985: The Use of Earthworms for Composting Farm Vastes, in *J.K.R.*, Gasser (Ed.), Els. Appl. Sci. Publ. London and New York, p. 229-241.

ESTAÑOL, B. E., 1992: *Estudio de la interacción entre maíz con alta capacidad de asociación con la micorriza vesículo-arbuscular (v-a) y su comportamiento hacia el nematodo* Meloidogyne chitwoody, Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados,. Montecillo, México, 121 p.

FLORES G, A.; FERRERA-CERRATO, R., 1995: Uso de la vermicomposta en la producción de hortalizas, in *First International Meeting on Microbial Ecology*, CINVESTAV-IPN, México D.F., p. 138.

HAGGAR, J. P.; EWEL, J. J., 1994: Experiments on the Ecological Basis of Sustainability: Early Findings on Nitrogen, Phosphorus, and Root Systems, in *Interciencia*, 19, p. 347-351.

KALE, R. D; MALLESH, B. C.; KUBRA, B.; BAGYARAJ, J. D., 1992: Influence of Vermicompost Application on the Available Macronutrients and Selected Microbial Populations in a Paddy Field, in *Soil Biol. Biochem.*, 24, p. 1.317-1.320.

MANSELL, G. P.; SYERS, J. K.; GREGG, R. E. H., 1981: Plant Availability of Phosphorus in Dead Herbage Ingested by Surface-Casting Earthworms, in *Soil Biol. Biochem.*, 13, p. 163-167.

MÁRQUEZ R., A.; ZEBROWSKI, C.; NAVARRO, H., 1992: Alternativas agronómicas para la recuperación de tepetates, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 465-473.

MATÍAS C., S.; FERRERA-CERRATO, R., 1996: Efecto de microorganismos y adición de materia orgánica en la colonización micorrízica en la recuperación de tepetates, en *Avances de investigación*, J. Pérez-Moreno y R. Ferrera-Cerrato (editores), Área de Microbiología de Suelos, IRENAT-PROEDAF, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, p. 52-61.

NASYROV, Y.S., 1978: Genetic Control of Photosynthesis and Improving of Crop Productivity, in *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 29, p. 215-237.

NAVA, V.; SÁNCHEZ, J.; OLVERA, Y.; LEYTE, A. R., 1992: Rehabilitación del tepetate mediante el manejo tradicional en Tlaxcala, México; en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 460-464.

NAVARRO, H.; ZEBROWSKI, C., 1992: Análisis agronómico comparativo en tepetates, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 451-459.

PENNINCK, R.; VERDONCK, O., 1987: Earthworms Compost versus Classic Compost in Horticultural Substrates, in *Compost: Production, Quality and Use*, M. de Bertoldi, M. P. Ferranti, P. L. Hermite y F. Zucconi (editors), Els. Appl. Sci. Udine, Italy, p. 814-817.

PHILLIPS, J. M.; HAYMAN, D. S., 1970: Improved Procedures of Clearing Roots and Staining Parasitic and Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi for Rapid Assessment to infection, in *Trans. Brit. Mycol. Soc.*, 55, p. 158-161.

QUANTIN, P., ARIAS H. M.; ETCHEVERS B., J. D.; FERRERA-CERRATO, R.; OLESCHKO, K.; NAVARRO, H.; WERNER, G.; ZEBROWSKI, C., 1993: *Terra*, Vol. 11 (número especial: Tepetates de México, caracterización y habilitación para la agricultura), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, 72 p.

QUINTERO R., M.; FERRERA-CERRATO, R., 1992: La endomicorriza vesículo arbuscular en la recuperación de tepetates, en *La investigación edafológica en México 1991-1992. Memorias del XXV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo*, J. L. Tovar y R. Quintero (editores) Acapulco, México, p. 230.

ROBERTS, M. J.; LONG, S. P.; TIESZEN, L. L.; BEADLE, C. L., 1988: Medición de la biomasa vegetal y de la producción primaria neta, en *Técnicas en fotosíntesis y bioproductividad*, J. Coombs, D. O. Hall, S. P. Long y J. M. Scurlock (editores), Colegio de Postgraduados, Chapingo, México, p. 1-16.

ROSELEM, C. A.; ASSIS, J. S.; SANTIAGO, A. D., 1994: Root Growth and Mineral Nutrition of Corn Hibrids as Affected by Phosphorus and Lime, in *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 25: p. 2.491-2.499.

SCURLOCK, J. M. O.; LONG, S. P.; HALL, D. O.; COOMBS, J., 1988: *Técnicas en fotosíntesis y bioproductividad*, J. Coombs, D. O. Hall, S. P. Long y J. M. Scurlock (editores), Colegio de Postgraduados, Chapingo, México, p. XXI-XXIV.

TOBAR, R.; AZCÓN, R.; BAREA, J.M., 1994: Improved Nitrogen Uptake and Transport from 15N-Labelled Nitrate by External Hyphae of Arbuscular Mycorrhiza under Water-Stressed Conditions, in *New Phytol.*, 126, p. 119-122.

Uso de vermicomposta y micorriza arbuscular en cebolla, para la rehabilitación de tepetates

Alberto Flores, Ronald Ferrera-Cerrato

Abstract

The effect of either vermicompost application or mycorrhiza inoculation or both treatments in an onion crop grown in a tepetate *from Tlaxcala (Mexico) was evaluated. Onion yields in control, inoculated with mycorrhiza, vermicompost alone, vermicompost plus mycorrhiza, and chemical fertilization crops were 963, 1,765, 4,023, 4,529, and 4,851 kg ha^{-1}. The last three treatments were statistically beter than the control. The mycorrhiza inoculation was the most important factor in determining yields and its interaction with vermicompost application must be suggested as an option in* tepetate *recovery.*

Keywords: *Organic Matter - Mycorrhiza* - Allium cepa - Tepetate

INTRODUCCIÓN

El nombre de tepetate se usa para designar horizontes cementados y específicamente para gruesas capas endurecidas formadas a partir de cenizas volcánicas, con características físicas y químicas que limitan su utilización con fines agrícolas (Nimlos, 1987). Dichos estratos, que en un inicio estaban cubiertos por una capa de suelo fértil (Sánchez, 1994), afloran a la superficie debido a la erosión y a la falta de medidas de conservación de los suelos.

Se ha demostrado que la mayoría de tepetates provienen de la alteración de proyecciones volcánicas endurecidas (Quantin, 1993).

Se ha planteado que la transformación de un tepetate en terreno agrícola se logra sólo a través de su roturación hasta una profundidad de 40-50 cm, la construcción de terrazas, la realización de barbecho y, lo más importante, la adición de materia orgánica (Pimentel, 1992). Por otra parte, se afirma que los principales elementos para la incorporación de tepetates a la agricultura son la pulverización y la fertilización (William, 1972).

Una de las funciones más importantes de las micorrizas es absorber los elementos minerales del suelo y transferirlos a la planta hospedante. Esta, por sí sola, no puede absorber a través de sus raíces más que los elementos minerales solubles que se encuentran en el suelo en cantidades limitadas. Las micorrizas facilitan la absorción de todos los elementos minerales, sobre todo los menos solubles y menos móviles, como el fósforo, el cobre y el zinc (Eivazi y Weir, 1989; Le Facon, 1985).

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la inoculación de micorriza arbuscular y de la adición de materia orgánica en forma de vermicomposta, en el cultivo pluvial de cebolla, en suelos tepetatosos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en un área tepetatosa de la comunidad de Tlalpan (municipio de Hueyotlipan, estado de Tlaxcala), ubicado a 19°35' de latitud Norte y 98°40' de longitud Oeste, a una altura de 2.540 m.s.n.m.. El clima, que es Cb(w)(w)(i')g, se define como templado subhúmedo con lluvias en verano, una temperatura media anual entre 12 y 18 °C y poca oscilación térmica.

La especie vegetal utilizada fue cebolla (*Allium cepa* L.), cultivar Santa Cruz, de bulbo blanco y alto rendimiento. La parcela experimental consistió en surcos de 4 m de largo x 0,8 m de ancho. La siembra fue directa y se realizó aclareo 35 días después de la siembra, para obtener una densidad de 125.000 plantas ha^{-1}. Los tratamientos utilizados fueron: testigo, micorriza, vermicomposta, micorriza más vermicomposta y fertilización (120-60-00).

El inóculo micorrízico consistió en raíces de alfalfa colonizadas por el hongo *Glomus* sp. Zac-19, cortadas en pequeños segmentos y mezcladas con suelo. La inoculación se llevó a cabo al momento de la siembra. En la fertilización fue 120-60-00, se utilizó sulfato de amonio como fuente de nitrógeno y superfosfato de calcio simple como fuente de fósforo. Se la realizó igualmente al momento de la siembra. La dosis de vermicomposta fue de 5 t ha^{-1} y se la aplicó 20 días antes de la siembra.

Se realizaron 2 muestreos en el ciclo de cultivo y se evaluaron el peso fresco de la parte aérea, el peso fresco del bulbo, el volumen radical, la colonización micorrízica y el rendimiento. La cuantificación de la colonización micorrízica de cada muestreo se efectuó mediante la técnica de tinción de Phillips y Hayman (Hayman, 1980).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el primer muestreo, 60 días después de la siembra, el peso fresco de la parte aérea se comportó estadísticamente igual en los tratamientos de fertilización, de micorriza más vermicomposta y de vermicomposta. Sin embargo, en los dos primeros tratamientos se logró superar al testigo en 645 y 500 % respectivamente. En el caso del peso fresco del bulbo, el tratamiento de fertilización y el de aplicación de vermicomposta superaron al testigo en 883 y 838 % respectivamente, siendo significativa esta diferencia.

Tratándose del volumen radical, los tratamientos de fertilización y micorriza más vermicomposta superaron estadísticamente al testigo y al tratamiento micorrizado (cuadro 1). En colonización micorrízica, los tratamientos con micorriza y micorriza más vermicomposta superaron estadísticamente a los tratamientos de vermicomposta y de fertilización y al testigo; estos dos últimos no presentaron colonización y en el tratamiento con vermicomposta se registró un promedio bajo. Esto permite afirmar que la cepa introducida fue efectiva, habiéndose encontrado un bajo porcentaje de cepas nativas.

En el segundo muestreo, 120 días después de la siembra, se observó una clara diferencia numérica entre tratamientos. Frente a los tratamientos con vermicomposta, micorriza más vermicomposta y fertilización, las variables peso fresco de la parte aérea, volumen radical y peso seco de la parte aérea se comportaron estadísticamente igual y superaron en forma significativa a los resultados obtenidos con micorriza y en el testigo en todos los casos. Numéricamente, el tratamiento con micorriza superó de manera considerable al testigo.

En peso fresco del bulbo, los mejores tratamientos fueron inoculación con micorriza más vermicomposta y fertilización, en los que se superó significativamente al testigo en un 761 y 811 % respectivamente. Los tratamientos con inoculación de micorriza y aplicación de abono orgánico lograron mantener siempre valores altos, similares a los obtenidos con fertilización, como se observa en el rendimiento del bulbo. El comportamiento frente a

los tratamientos de micorriza, micorriza más vermicomposta y fertilización fue estadísticamente igual, superando significativamente a los resultados obtenidos con vermicomposta y en el testigo (cuadro 2). Cabe aclarar que el tratamiento con micorriza superó en un 83 % al testigo, ventaja considerable bajo las condiciones climáticas del experimento (cultivo de temporal).

Tratamiento	PFPA (g planta^{-1})	PFB (cm^3)	VR (cm^3)	PSPA (g planta^{-1})	CT (%)
Testigo	0,68 c	0,18 b	0,16 b	0,19 a	0,00 b
Vermicomposta	3,64 abc	1,69 a	0,54 a	0,26 a	17,0 b
Micorriza	1,42 bc	0,33 ab	0,18 b	0,28 a	76,96 a
Mic. + Ver.	4,08 ab	1,48 ab	0,43 ab	0,26 a	60,90 a
Fertilización	5,07 a	1,77 a	0,56 a	0,37 a	0,00 b

Promedios con la misma letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey $\alpha = 0,05$).
PFPA: peso fresco de la parte aérea; PFB: peso fresco del bulbo; VR: volumen radical; PSPA: peso seco de la parte aérea; CT: colonización micorrízica.

Cuadro 1 - Efecto de la inoculación de micorriza arbuscular y la incorporación de vermicomposta en las diferentes variables, en cebolla en condiciones de campo, 60 días después de la siembra

Tratamiento	PFPA (g planta^{-1})	PFB (g planta^{-1})	VR (cm^{-3})	PSPA (g planta^{-1})	RTO (kg ha^{-1})
Testigo	10,09 b	13,21 c	1,14 b	1,42 b	963 b
Vermicomposta	15,33 b	18,04 a	1,86 b	2,16 b	1.765 b
Micorriza	53,45 a	71,55 ab	4,90 a	7,16 a	4.023,3 a
Mic + Ver	60,30 a	113,77 a	5,60 a	7,55 a	4.529,2 a
Fertilización	66,95 a	120,46 a	5,20 a	10,96 a	4.851,4 a

Promedios con la misma letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey $\alpha = 0,05$).
PFPA: peso fresco de la parte aérea; PFB: peso fresco del bulbo; VR: volumen radical; PSPA: peso seco de la parte aérea; RTO: rendimiento.

Cuadro 2 - Efecto de la inoculación de micorriza arbuscular y la incorporación de vermicomposta en las diferentes variables, en cebolla en condiciones de campo, 120 días después de la siembra

Referencias bibliográficas

Eivazi, F.; Weir, C. C., 1989: Phosphorus and Mycorrhizal Interaction on Uptake of P and Trace Elements by Maize, in *Fertilizer Research*, 21, p. 19-22.

Hayman, D. S., 1980: Micorrhizae and Production of Crops, in *Nature*, 287, p. 487-488.

Le Facon, F., 1985: Las micorrizas, una cooperación entre plantas y hongos, en *Mundo Científico*, 49, p. 261-278.

Nimlos, T. J., 1987: La nomenclatura de horizontes endurecidos en suelos derivados de cenizas volcánicas, en *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*, J. F. Ruiz F. (editor), UACH, Chapingo, México, p. 10-18.

PIMENTEL, L., 1995: Técnicas de plantación forestal en suelos degradados (experiencias en la vertiente oriental de la cuenca de México), en *Memorias del IV curso sobre Desertificación y desarrollo sustentable en América Latina y el Caribe*, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

QUANTIN, P., ARIAS H. M.; ETCHEVERS B., J. D.; FERRERA-CERRATO, R.; OLESCHKO, K.; NAVARRO, H.; WERNER, G.; ZEBROWSKI, C., 1993: *Terra*, Vol. 11 (número especial: Tepetates de México, caracterización y habilitación para la agricultura), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, 72 p.

SÁNCHEZ, J. M., 1984: *Comportamiento de los dos tipos de tepetate bajo la adición de abonos orgánicos y abonos verdes en invernadero*, Tesis de licenciatura, UACH, Chapingo, México, 119 p.

WERNER, G., 1977: La distribución de los suelos en la región de Puebla, comunicación 14, Proyecto Puebla-Tlaxcala, México.

WILLIAMS, B.J., 1972: Tepetate in Valley of México, in *Annals of the Association of American Geographers*, Vol. 62, N° 4, p. 618-632.

Síntesis del tema 3
Experimentos agronómicos y productividad

Hermilio NAVARRO G.

INTRODUCCIÓN

Los trabajos de investigación que se refieren a la productividad agrícola de los suelos volcánicos endurecidos, desarrollados en el marco de los contratos con la UE, debían responder a las siguientes interrogantes:

- ¿Cómo se manejan estas formaciones y cuánto producen?
- ¿Cómo aumentar la producción mediante la selección de cultivos apropiados y aportes de fertilizantes adecuados, sabiendo que estos suelos son estériles por carecer de microorganismos simbióticos y presentan contenidos insuficientes de fósforo, nitrógeno y materia orgánica?

Para aportar una respuesta, se han desarrollado dos tipos de investigaciones:

- El primero consistió en encuestas realizadas a los campesinos para conocer su estrategia frente al problema del cultivo en este material y los itinerarios practicados, así para estimar en campo los rendimientos (Olivares y Márquez, 1992; Navarro y Zebrowski, 1994).
- En el segundo se realizaron experimentaciones en parcelas agronómicas, en el tipo de tepetate más representativo de los estados de México y de Tlaxcala, en las que se probaron los cultivos más sembrados por los agricultores (maíz, cebada, trigo, frijol, haba) a los que se añadieron otros como la veza, por ser leguminosa. En estos experimentos, iniciados en 1990 en el estado de Tlaxcala en un tepetate t3 recién roturado, se probaron varias dosis de abonos químicos y orgánicos. Se realizaron los seguimientos agronómicos hasta determinar los rendimientos y se analizaron sus componentes.

Los principales resultados del primer programa fueron los siguientes:

- Un 80 % de los agricultores inician el cultivo del tepetate después de su roturación, con trigo, a veces cebada, mientras el resto cultivan maíz solo o asociado a una leguminosa. En el segundo año de cultivo, disminuyen trigo-cebada al 50 % en favor del maíz. Los rendimientos de trigo pueden ser altos desde el primer año, aquellos de maíz son generalmente bajos (0,4 t/ha) el primer año pero se incrementan en los años siguientes (2,2 a 2,5 t/ha en el tercer año, 2,5 a 3,1 t/ha en el quinto año).
- Los experimentos realizados en parcelas agronómicas (Márquez *et al.*, 1992) confirman que el trigo permite buenos rendimientos el primer año y, en contraparte, el maíz da rendimientos bajos e incluso nulos. Los rendimientos más elevados fueron los obtenidos con fertilización química (120-60-0) asociada a estiércol (40 t/ha), seguidos por los

obtenidos con fertilización química sola (120-60-0). Además, se probó que la producción en un tepetate profundo con textura fina dio mejores resultados que en un suelo poco profundo con fragmentos gruesos (abundantes bloques de tepetate no fraccionados).

En los años siguientes (1994) el proyecto se amplió al Ecuador, donde la investigación se dedicó a experimentos sencillos para comprobar en la cangahua los resultados obtenidos en tepetate de México. Allí se estudió el impacto del número de años de cultivo, del precedente cultural, de una fertilización biológica, así como la influencia de las labores culturales en los rendimientos de varios cultivos. Los resultados de todos estos trabajos se presentaron en este taller.

APORTES DE LAS COMUNICACIONES

El taller comporta 8 trabajos, de los cuales 3 relatan experiencias realizadas en el Ecuador y 5 en México.

1. Ecuador

Consisten en ensayos de productividad en cangahua recién roturada. El de Trujillo y Arias (Productividad en cangahua rehabilitada. Ecuador: ensayos agronómicos) fue realizado durante dos años con cuatro cultivos y diferentes aportes de abonos orgánicos o minerales. Los resultados confirman los obtenidos en México.

Los trabajos de Suárez (Productividad potencial y costos de producción en cangahua recuperada) y de Ríos (Evaluación del cultivo de cebada bajo dos sistemas de siembra en terrazas y en surcos a nivel) relatan experimentos realizados con diferentes preparaciones de la cangahua (terrazas planas, de formación progresiva) y labores. Los rendimientos son mayores en terrazas planas, pero estos autores subrayan el elevado costo de ejecución de dichas obras en comparación, en el caso de Suárez, con el de una terraza de formación progresiva. Además, muestran que es posible obtener una producción moderada de avena y cebada, a un costo más razonable de preparación del suelo y de fertilización.

2. México

Los trabajos se orientaron según varias perspectivas:

- seguimiento de la producción durante varios años;
- rotaciones, asociaciones de cultivos, efecto del cultivo anterior;
- efecto de diferentes tipos de fertilización (orgánica, mineral, inoculación de simbiontes);
- efecto de diferentes labores

Efecto del número de años de cultivo

El trabajo de Báez *et al.* (Análisis del comportamiento de cultivos en tepetates), realizado durante 4 años (1993-1996) en San Miguel Tlaixpan, así como los tres de Navarro *et al.* (Rendimiento de maíz-frijol en tepetate en el segundo año de rehabilitación agrícola, Manejo agronómico diferencial de la asociación maíz-haba en tepetate de quinto año de uso agrícola, y Desarrollo agro-ecológico y factores agronómicos de la productividad en suelos volcánicos endurecidos), que se refieren a un seguimiento de cultivos durante 5 años (1991-1995) en parcelas experimentales en Tlalpan, confirman los resultados obtenidos en las encuestas en parcelas de agricultores (Olivares y Márquez, 1992; Navarro y Zebrowski, 1994). La producción de trigo, con fertilización mineral u orgánica adecuada, fue elevada durante los cinco años de cultivo. En contraparte, la de maíz, aun con fertilización mineral asociada a abonos orgánicos, fue muy baja en el primer año, alcanzando

sin embargo rendimientos satisfactorios desde el segundo año, pero incluso con una fertilización adecuada, muestra irregularidades con el paso del tiempo, es decir que no hay una progresión sistemática de la producción con los años de rehabilitación de estas formaciones. Como lo subrayan Báez *et al.*, Navarro *et al.*, y Navarro y Zebrowski (1994), el maíz es poco resistente a la sequía y, más que la edad de rehabilitación, son las variaciones climáticas de un año al otro las que explican la irregularidad en su producción.

Rotaciones, asociaciones de cultivos, efecto del cultivo anterior

Estos temas han sido estudiados por Navarro *et al.* en Hueyotlipan y por Báez *et al.* en San Miguel Tlaixpan.

Aparte de señalar que es necesario empezar el cultivo del tepetate con un cereal de grano pequeño o una leguminosa, pero no con el maíz, no se obtuvieron conclusiones en lo que concierne al efecto de las diferentes rotaciones probadas por los autores, pero sí en cuanto a la asociación de varios cultivos. Así, Báez *et al.* muestran que las asociaciones cebada + veza y maíz + haba tienden a producir globalmente algo más que los monocultivos de cebada y maíz. Las leguminosas tienen un efecto benéfico. Además, la asociación maíz + haba, de la misma manera que una leguminosa sola, como precedente cultural, tienen un efecto benéfico en el cultivo siguiente. Sin embargo, Navarro y Flores, en la asociación maíz + haba, subrayan un efecto competitivo entre el maíz y el haba. Cuando el rendimiento del maíz es elevado, el del haba es bajo, y viceversa.

Fertilización

Los diferentes tipos de fertilización en tepetate en condición experimental fueron estudiados por Navarro *et al.* y por Báez *et al.* Estos autores muestran que una fertilización únicamente biológica (inoculación de simbiontes) no aumenta la producción de los cultivos, lo que confirma los datos obtenidos en otros experimentos (ver tema 2). Sin embargo, la inoculación asociada a una fertilización *starter* (15-60-0) duplica los rendimientos de maíz obtenidos con inoculación sola.

De hecho, en este tipo de material se necesita una fertilización mineral, combinada o no a una orgánica. Báez *et al.* recomiendan una fertilización mínima de 100-80-0, con aportes fraccionados de nitrógeno. Navarro *et al.* realizaron sus experimentos con una fertilización de 120-60-0 y destacan, en el ensayo de un cultivo de maíz + haba en quinto año de cultivo de un tepetate, el papel positivo de la fertilización química en el rendimiento del maíz. Subrayan en efecto que dicha fertilización, al disminuir el tiempo entre las floraciones masculina y femenina del maíz, aumenta los rendimientos en grano. Por el contrario, la fertilización química del haba no dio buenos resultados, contrariamente a la materia orgánica sí.

Si bien en el caso del maíz, los rendimientos pueden ser altos con la sola fertilización química, un aporte complementario de materia orgánica siempre mejora los resultados.

La incorporación de materia orgánica es primordial para el tepetate. Además de aportar elementos nutricionales, favorece la vida microbiana (ver tema 2) y con el tiempo deberá favorecer la creación de una estructura secundaria en este material. Navarro y Benítez observaron además su efecto positivo en el rendimiento de maíz durante el segundo año.

Sin embargo, un aporte de 40 t/ha de estiércol solo no es suficiente para conseguir una producción elevada. Este aporte permitió obtener 1,1 t/ha de grano, mientras que, asociado a la fertilización *starter*, duplicó la producción (2,2 t). La fertilización *starter*, con

su aporte de fósforo (60 unidades), mejora la relación N/P del estiércol, estimula la mineralización de la materia orgánica y el desarrollo del maíz.

Si bien la producción máxima de maíz se consigue con una combinación de altas dosis de fertilizantes y de estiércol, este método es muy costoso. Para una manejo sustentable del tepetate, es mejor una fertilización orgánica asociada a una fertilización *starter*, aunque a corto plazo, con una producción similar, la fertilización química sola puede ser más económica, tomando en cuenta el precio del abono orgánico.

Preparación del terreno y labores culturales

Todos los experimentos de México fueron realizados en terrazas planas. Báez *et al.* probaron el efecto de la profundidad del subsoleo. Contrariamente a lo observado por Suárez en el Ecuador y Márquez *et al.* (1992) en México, los rendimientos fueron similares en las terrazas subsoleadas a mayor profundidad (60 cm) que en las terrazas con un subsoleo a 40 cm. Probablemente la diferencia entre 40 y 60 cm es insuficiente, pues en una misma terraza, la producción en la parte baja (con un suelo profundo y una textura fina) es mayor a la de la parte alta, de menor profundidad. De todas maneras, cabe anotar que el efecto profundidad del suelo en los rendimientos de maíz sería más notorio con híbridos (que poseen un sistema radical importante) que con las variedades criollas utilizadas en los diferentes experimentos en México.

Fechter-Escamilla *et al.* estudiaron el efecto de las labores culturales en la producción de maíz con fertilización mineral. Con una labor mínima, sin cobertura vegetal entre el maíz, los rendimientos fueron los más bajos (1,2 t/ha). Estos aumentaron a 1,6 t/ha con una cobertura vegetal entre el maíz que limitó el acame. Los mejores (2,2 t/ha) se obtuvieron con la labor tradicional, pues el aporque limita aún más el acame. Las variedades criollas de maíz probadas parecen no adaptarse a un manejo de mínima labranza. Valdría la pena probar igualmente otro método de siembra, como grano por grano en vez de por mata.

Báez *et al.* probaron el contreo (compartimentación de los surcos). Esta labor, muy practicada en zonas secas, aumentó los rendimientos del haba, pero muy poco los del maíz.

CONCLUSIÓN

Las restricciones agronómicas de los suelos volcánicos endurecidos son de naturaleza física, química y biológica.

Con una buena preparación del terreno y una fertilización adecuada, se puede conseguir una producción elevada en estos materiales, a partir del primer año en el caso de las leguminosas y los cereales de grano pequeño, y desde el segundo año en el caso del maíz. Después de 5 a 7 años de cultivo, a menudo antes, estos suelos producen igual que los otros tipos de suelo.

El impacto de la fertilización química y orgánica ha sido muy estudiado mostrándose eficaz en todos los casos, pero no se obtuvieron conclusiones de los pocos trabajos realizados con incorporación de abonos verdes.

Una alternativa de productividad duradera podría ser ya sea la utilización de abono orgánico y fertilización química *starter*, o la fertilización mineral sola. El interés de la inoculación de simbiontes sigue siendo controvertido, dependiendo del tipo de plantas y del uso de abono orgánico.

De acuerdo a las discusiones mantenidas en el transcurso de las sesiones de trabajo, se destacan varios puntos :

- los estudios se han limitado a la producción de algunos cultivos, ciertamente importantes, pero no hubo presentaciones relacionadas con la producción forestal en los suelos volcánicos endurecidos;
- un manejo agro-forestal o agro-pastoral sería más recomendable que un uso solo agrícola;
- los suelos estudiados han sido de tipo fragipán, los cuales no presentan las características más desfavorables. Valdría la pena desarrollar estudios similares en duripanes, más duros y que pueden presentar otras deficiencias químicas por la alcalinidad del material, además de ser muy comunes en climas muy secos;
- la búsqueda de labores adaptadas a estos suelos y a las condiciones climáticas en las que se encuentran merecería también un esfuerzo particular tanto para disminuir la erosión como para limitar el efecto de las sequías;
- se debería experimentar un riego complementario para asegurar la producción.

Referencias bibliográficas

MÁRQUEZ R., A.; ZEBROWSKI, C.; NAVARRO, H., 1992: Alternativas agronómicas para la recuperación de tepetates, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 465 - 473.

NAVARRO, H., 1992: Metodología para análisis de sistemas de producción, con énfasis en el manejo de tepetates, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 515-523

NAVARRO, H.; ZEBROWSKI, C., 1994: La réhabilitation agricole des sols volcaniques indurés et érodés en Équateur et au Mexique, en *Transactions of the 15th World Congress of Soil Science*, Acapulco, México, Vol. 6a, p. 592-610.

OLIVARES, P.; MÁRQUEZ, A., 1992: Aspectos socioeconómicos y agroecológicos de la recuperación de tepetates en San Pablo Ixayoc, estado de México, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 524-533.

Productividad en cangahua rehabilitada
Ensayos agronómicos

Germán TRUJILLO, José ARIAS

Abstract

Cangahua *is an indurated volcanic ash horizon which becomes exposed when the topsoil has been eroded.* Cangahua *is found mainly in the northern volcanic highlands of Ecuador, between 2,400 and 3,000 meters.*

A cangahua *reclamation experiment was conducted in two sites to the north of Quito. Some of the traditional crops for the area were tested using organic manure and chemical fertilizers in a two-year experiment.*

Maize yields were low for the two yearly cycles in both sites. With chemical fertilizers (100-60-0) barley, oat and beans yields were high. Yields obtained for these crops using manure are as high as with chemical fertilizers, but the economic analysis shows a better profitability when chemical fertilizers are used.

Keywords: *Ecuador* - Cangahua - *Agronomic Experimentation*

INTRODUCCIÓN

La erosión constituye el más grave problema ambiental que afecta a los suelos volcánicos de la región centro-Norte del callejón interandino del Ecuador, y ha dado lugar al afloramiento de la cangahua, estrato endurecido de baja fertilidad que cuando es roturado e incorporado a la producción, es altamente susceptible al transporte hídrico. Actualmente, se tienen 37.000 ha con cangahua aflorante, que potencialmente pueden incrementarse en 240.000 más, lo que constituye además un grave problema social, ya que se localiza en las vertientes internas del callejón interandino, entre los 2.000 y 3.000 metros de altura, donde se asienta una numerosa población principalmente indígena.

Los campesinos han desarrollado incipientes sistemas de rehabilitación manual, llegando a obtener rendimientos de 600 kg/ha de maíz y cebada, y año tras año deben volver a romper la cangahua para seguir cultivando los productos tradicionales.

El presente trabajo se inscribe en el marco de los ensayos agronómicos realizados en el Ecuador para validar la experiencia mexicana con el propósito de adaptar la tecnología de rehabilitación del tepetate a la cangahua y divulgarla posteriormente en el campo.

Para ello se ha evaluado el comportamiento de cultivos tradicionales en respuesta a la aplicación de materia orgánica y fertilización química en el proceso de rehabilitación de cangahuales, durante dos ciclos de cultivo (Arias y Ordóñez, 1995; Hernández y Lluminquinga, 1996).

MATERIALES Y MÉTODOS

La presencia de cangahua aflorante bajo una gama de precipitaciones relativamente amplia (500 a 900 mm de lluvias anuales) nos llevó a escoger dos sitios de experimentación: Cangahua en clima subárido (P = 650 mm/año) y La Tola en clima subhúmedo (P = 880 mm/año).

La estación de Cangahua (a 2.840 m.s.n.m.) se localiza a 75 km de Quito, en la región septentrional de la provincia de Pichincha, al Sur de la ciudad de Cayambe. La de La Tola (a 2.480 m.s.n.m.) está situada 28 km al Oeste de Quito, en la granja experimental de la Universidad Central del Ecuador (UCE).

Características climáticas de los sitios

Las precipitaciones pueden ser estimadas según los resultados de dos estaciones: la primera, La Tola, ubicada exactamente en el sitio de experimentación, la segunda en el pueblo de Cangahua, un tanto más lluvioso que el sitio de experimentación. Los datos climáticos de estos sitios (cuadro 1) muestran que:

- las variaciones interanuales son muy importantes;
- existen dos estaciones secas: la primera, muy marcada, de junio a agosto, y la segunda entre diciembre y enero;
- el promedio de las precipitaciones anuales de 11 años es 200 mm menor en el pueblo de Cangahua (686,2 mm) que en La Tola (879,4 mm). En el sitio experimental de Cangahua el promedio anual de las precipitaciones se ubica probablemente alrededor de los 650 mm.

Para los cultivos de ciclo largo, como el maíz cosechado en seco, el período ideal de siembra es octubre. Los cultivos de ciclo corto (cebada, avena, maíz «choclo») pueden ser sembrados en enero.

Según Vargas (1993), los campesinos siembran la cebada entre octubre y febrero y el maíz (cosechado en «choclo» o en seco) en octubre.

Características edafológicas

Los dos sitios experimentales están localizados en pendientes del 15 por ciento. En el sitio de Cangahua, la cangahua aflora en la totalidad de la superficie, es gris, muy dura, con abundantes micelios de carbonatos de calcio en la superficie. Es arenosa al tacto.

En La Tola, es un poco más amarilla, menos arenosa y dura que en Cangahua. Los carbonatos están localizados en profundidad. Fue necesario limpiar la superficie del suelo pues existían testigos de suelo agrícola en una capa de 10 a 30 cm de espesor.

Los resultados del análisis granulométrico confirman la observación de campo. La cangahua del sitio de Cangahua tiene una textura franco-arenosa, la de La Tola una textura franca.

La cangahua presenta valores sumamente bajos en fósforo, nitrógeno y materia orgánica, lo que fue confirmado por la experiencia en laboratorio (Cisneros *et al.*, 1996). Por ello fue indispensable aportar estos elementos en el proceso de investigación.

Precipitaciones en La Tola (medias de 11 años: 1980-1990)

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Mínimo	31,2	26,6	9,7	73,3	11,6	1,2	0,1	0,4	15,6	72,1	8,2	9,7	676,3
Promedio	65,1	76,8	99,6	134,9	75,3	24,5	25,2	23	71,5	126,9	86	69,1	879,4
Máximo	103,1	155,5	196,6	194,3	124,6	65	147 ?	58,4	149	221,2	171,0	153,2	1.101

Temperaturas en La Tola (años 1990-1993)

Años	temp.	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
1990	prom. mens.	16,2	15,6	16,4	16,1	16,1	16,3	15,2	16,1	16,2	15,2	16,1	15,8	15,9
	prom. máx.	24,3	22,5	23,6	22,9	22,5	23,2	23,0	23,6	24,3	22,1	23,6	23,7	23,3
	prom. mín.	9,8	11,0	11,0	11,5	10,6	10,2	8,0	9,0	9,0	10,2	10,2	9,9	10,0
1991	prom. mens.	15,9	16,2	16,0	16,0	16,0	16,0	15,9	15,9	15,9	15,7	15,2	15,8	15,9
1992	prom. mens.	16,3	16,2	16,3	16,0	15,6	16,4	15,7	15,7	15,3	15,8	15,3	16,2	15,9
1993	prom. mens.	15,4	15,1	15,0	15,6	15,6	16,2	15,5	16,1	15,4	16,0	15,5	15,8	15,6

Precipitaciones en el pueblo de Cangahua (medias de 11 años: 1980-1990)

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Mínimo	16,5	23,9	0	35,7	14,7	0	0	0	9,1	34,2	3	11	443,5
Promedio	47,8	59,3	80,8	82,8	70,7	25,8	13,1	14,5	38	96,9	62,8	60,9	686,2
Máximo	115,3	129,6	182,2	157,5	123,1	79,5	52,2	32,1	103,7	143,1	165,2	167,8	847,3

Cuadro 1 - Datos climáticos

Textura y pH

Muestra	Textura (%)							pH	
	arcilla	limo fino	limo grueso	arena fina	arena gruesa	agua	total	agua	KCl
Cangahua	6,69	17,57	9,04	24,17	38,87	2,16	98,5	8,5	7,3
La Tola	7,34	33,06	11,54	32,43	11,13	2,41	97,91	7,8	6,4

Materia orgánica, fósforo y bases intercambiables

	C (%)	N (%)	P (Olsen) ppm	Bases (me/100g)				CIC (me/100g)	Sat
La Tola	0,32	0,03	0	14,5	5,98	0,62	0,81	16,5	saturado

Cuadro 2 - Resultados analíticos

Preparación del terreno

Se la realizó con un tractor Caterpillar D6 equipado de una cuchilla y de un *rooter* con dientes de 60 cm. Las diferentes etapas de la preparación del campo experimental fueron:

- obtención de una superficie de cangahua limpia después de la eliminación de la vegetación y de los testigos del suelo agrícola;

- realización de terrazas planas;
- subsoleo de la cangahua a una profundidad media de 40 cm;
- fraccionamiento de los bloques de cangahua con las cadenas del buldózer seguido de 3 pasadas de rastra de discos con tractor agrícola;
- fraccionamiento manual con pico y azadón;
- rastrillado de los bloques de tamaño superior a 5 cm.

Al final de esta preparación, la profundidad efectiva del suelo era de 35 cm en La Tola y de 30 cm en Cangahua. Cincuenta por ciento de los bloques tenían entre 1 y 5 cm de diámetro.

Cultivos probados y tratamientos

Los cultivos probados fueron, para el primer año, el maíz (variedad Mishca), la cebada (variedad Calicuchima) y una avena forrajera común.

En el segundo año se probaron el maíz y la cebada en las mismas parcelas que el año anterior, pero se cultivó fréjol en las parcelas en que se había sembrado avena.

Las densidades de siembra fueron de 50 kg/ha para el maíz, 150 kg/ha para la cebada, de 120 kg/ha para la avena y de 100 kg/ha para el fréjol.

En cada cultivo se probaron tres tratamientos :

- T0: testigo, sin abono;
- T1: aporte de MO, sin fertilización mineral: 40 t/ha de estiércol de bovino el primer año, 20 t/ha el segundo año;
- T2: fertilización mineral 100-60-0 (urea y 18-46-0).

Parcelas experimentales y variables evaluadas

El tamaño de las parcelas fue de 3 x 4 m. El número de repeticiones para cada tratamiento fue de 6 en La Tola, pero solamente de 4 en Cangahua.

Además de las parcelas en cangahua se instalaron también parcelas experimentales en suelo agrícola con fertilización mineral 100-60-0 (parcelas SFT2).

Las variables evaluadas fueron el porcentaje de emergencia, la altura de las plantas, el rendimiento de masa vegetal y en grano seco.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condiciones que pudieron afectar a los rendimientos

Condiciones climáticas

Se observa (figura 1) que el primer año (1994-1995) fue más seco que el año promedio. El agua precipitada por lluvias naturales fue insuficiente para lograr el buen desarrollo de los cultivos, razón por la cual se aportó riego complementario.

En el primer ciclo (1994-1995), a pesar de que se aportó riego, los cultivos no dispusieron de agua suficiente para su desarrollo durante el ciclo vegetativo (cuadro 3).

El año 1995-1996 fue más lluvioso que el anterior. Para el fréjol, el agua total aportada durante el ciclo de cultivo (498 mm) estuvo por encima del requerimiento máximo. En el caso de la cebada fue normal-bajo (464 y 500 mm) y en el del maíz insuficiente (584 y 597 mm).

Una lluvia con granizo caída el 2 de junio de 1996 en La Tola, a los 3 meses de la siembra, ocasionó una importante destrucción de las flores y una baja polinización en el

maíz, en tanto que en la cebada se produjo el desgrane y el acame de las plantas lo que afectó al rendimiento final del segundo ciclo.

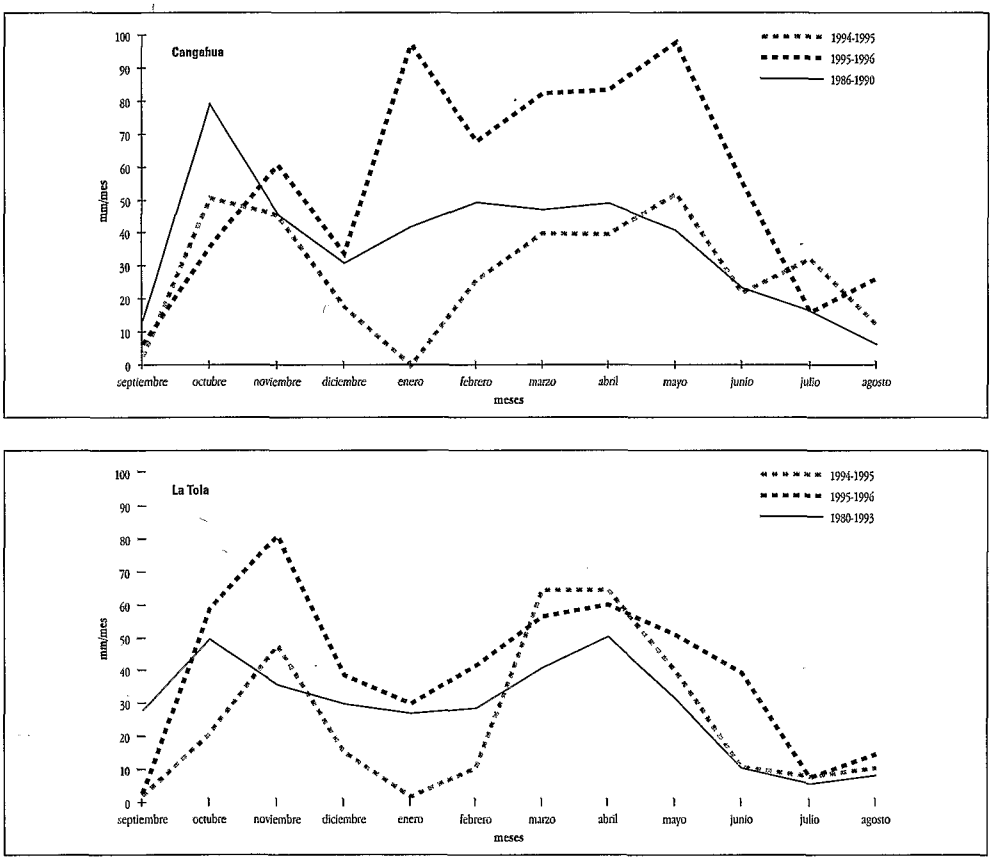


Figura 1 - Precipitaciones durante los años del experimento

Año	1994-1995						1995-1996					
Lugar	Cangahua			La Tola			Cangahua			La Tola		
Cultivo	avena	cebada	maíz	avena	cebada	maíz	fréjol	cebada	maíz	fréjol	cebada	maíz
Precipitaciones	83,8	183,8	205,4	236,7	311	289,3	437	396	509	497	500	566
Riego	132,5	105	147,5	63,7	207,1	300,4	61	68	88	5	0	18
Total	216	288,8	352,9	300,4	518,1	589,7	498	464	597	502	500	584
Agua requerida	500-700	400-800	700-1.300	500-700	400-800	700-1.300	350-450	400-800	700-1.300	350-450	400-800	700-1.300

Cuadro 3 - Agua precipitada, aportada y requerimientos por cultivo (en mm)

Daños a los cultivos

En el año 1995-1996 un ataque de gusano (*Spodoptera furgiperda*) al momento de la cosecha del maíz también afectó al rendimiento.

Ese mismo año, la entrada a fines de febrero de animales que destruyeron los cultivos de cebada y maíz en las parcelas de La Tola, obligó a sembrar nuevamente.

Año	1994-1995				1995-1996			
Lugar	Cangahua		La Tola		Cangahua		La Tola	
Cultivo	cebada	maíz	cebada	maíz	cebada	maíz	cebada	maíz
Fecha de siembra	enero de 1995				noviembre de 1995		marzo de 1996	
Ataque plaga	no	no	no	no	no	no	no	sí
Varios	no	no	no	no	no	no	granizo	granizo, vacas

Cuadro 4 - Plagas y otros daños

Tamaño de los fragmentos

Inicialmente, al momento de la roturación y preparación de la cangahua con maquinaria pesada y agrícola, se hizo una apreciación cuantitativa del tamaño de los fragmentos en la superficie del terreno, habiéndose observado que el 50 % de ellos tenía un diámetro entre 1 y 5 cm. Posteriormente, al final del estudio, en 1996, se hizo una medición del tamaño de los fragmentos del terreno en dos parcelas que recibieron tratamiento, cultivadas con cebada.

	T0		T1		T2	
	Cangahua	Tumbaco	Cangahua	Tumbaco	Cangahua	Tumbaco
Mayor a 5 cm	0	3,5	3,7	0	0	0
de 5 a 2,3 cm	5,4	9,1	6,9	3,4	5,4	12,7
de 2,3 cm a 3 mm	36,9	28,4	38,2	28,0	35,5	28,4
de 3 mm a 1 mm	18,6	19,1	17,8	19,4	19,7	29,4
menor a 1 mm	39,1	39,4	33,4	49,2	39,4	38,5

Cuadro 5 - Tamaño de los fragmentos por volumen de tierra (%)

- Las fracciones inferiores a 2,3 cm constituyen casi el 90 % del volumen total de la muestra analizada después del segundo año de cultivo. Esto, comparado con el tamaño inicial de los fragmentos cuantificado en 1994 (50 % de bloques de 1 a 5 cm de diámetro), permite deducir que se ha dado un acelerado proceso de destrucción de los bloques, ya que la fracción de 2,3 a 5 cm en la actualidad es apenas del 12 %.

- No se observan diferencias entre tratamientos, es decir el proceso de meteorización de los bloques es similar en T0, T1 y T2.
- Al inicio de la roturación, los bloques de 1 a 5 cm de diámetro no se rompían a la presión entre los dedos; al final del estudio, los bloques menores a 2,3 cm se rompen fácilmente con una leve presión.

Rendimientos

Avena y fréjol

Se tienen resultados solamente de un año de observación para cada cultivo (cuadro 6).

- En los dos cultivos y con todos los tratamientos, los rendimientos obtenidos en Cangahua son superiores a los de La Tola.
- En los dos sitios, la materia orgánica (T1) proporcionó los mejores rendimientos, por lo que se la considera el mejor tratamiento para los dos cultivos.
- La diferencia de producción en T1 y T2 respecto al testigo (T0), es muy marcada, por lo que la avena forrajera y el fréjol cultivados en cangahua recuperada responden bien al abono químico y orgánico.
- La producción media nacional de fréjol seco es de 0,41 t/ha por lo que se puede decir que los rendimientos obtenidos en cangahua rehabilitada con T1 y T2 son superiores. Se debe señalar que la media nacional es baja, debido a que generalmente no se contempla la cosecha anticipada que normalmente hace el campesino en estado tierno para consumo familiar, ni el hecho de que es muy común la siembra asociada con maíz y la escasa aplicación de abonos para estos cultivos.
- La producción de fréjol en suelo fértil es mayor a la correspondiente a todos los tratamientos.
- Para la avena forrajera no existen datos de producción nacional.

Cultivo	Avena forrajera		Fréjol	
Año	1994-1995		1995-1996	
Lugar	Cangahua	La Tola	Cangahua	La Tola
Tratamiento T1 (MO)	2,65	1,62	1,18	1,03
Tratamiento T2 (fertilización química)	1,89	1,61	0,99	0,73
Tratamiento T0 (testigo)	0,57	0,45	0,49	0,29
Suelo agrícola + T2 (SFT2)	–	–	1,89	1,26

Cuadro 6 - Rendimientos de materia seca de avena y grano seco de fréjol (en t/ha)

Cebada

En el caso de los tres tratamientos, la producción fue mayor en el primer año (1994-1995) que en el segundo (cuadro 7). Los rendimientos excepcionalmente bajos en La Tola en el segundo año se explican en parte por la fuerte granizada que dañó los cultivos.

Se observa que los rendimientos de la cebada tanto con aporte de materia orgánica (T1) como de fertilizantes (T2) son muy superiores a los del testigo y a la media nacional (0,65 t/ha). A pesar de que la producción disminuyó en el segundo año, los rendimientos siguen siendo superiores a la media nacional, lo que implica que la cebada en cangahua rehabilitada responde bien al abono. Sin embargo el monocultivo continuo no parece ser conveniente.

Cultivo	Avena forrajera		Fréjol	
Año	1994-1995		1995-1996	
Lugar	Cangahua	La Tola	Cangahua	La Tola
Tratamiento T1 (MO)	2,80	2,66	1,96	0,75
Tratamiento T2 (fertilización química)	1,50	4,12	1,22	1,25
Tratamiento T0 (testigo)	0,07	1,09	0,07	0,06
Suelo agrícola + T2 (SFT2)	3,42	1,06	–	–

Cuadro 7 - Rendimiento de la cebada en grano seco (en t/ha)

Los rendimientos obtenidos en Cangahua son mayores con aporte de estiércol que con fertilización química. En La Tola sucede lo contrario. Las condiciones climáticas, más secas en Cangahua pueden explicar este fenómeno.

La producción en suelo agrícola (SFT2) obtenida en el primer año de cultivo es superior que en la cangahua rehabilitada, aunque en La Tola los resultados son similares con T2.

Maíz

Los rendimientos obtenidos en cangahua con aportes de estiércol (T1) o de fertilizantes (T2) son mayores a los obtenidos en el testigo (cuadro 8) y a la media nacional, de 0,43 t/ha.

Los más altos niveles de producción se obtienen en Cangahua en los dos años de observación y en el segundo año se aprecia un ligero incremento también en Cangahua.

Año	1994-1995		1995-1996	
Lugar	Cangahua	La Tola	Cangahua	La Tola
Tratamiento T1 (MO)	1,45	0,34	1,82	0,25
Tratamiento T2 (fertilización química)	0,66	0,75	1,50	0,18
Tratamiento T0 (testigo)	0,03	0,06	0,04	0,04
Suelo agrícola + T2 (SFT2)	–	–	–	0,42

Cuadro 8 - Rendimientos del maíz en grano seco (en t/ha)

La baja producción de maíz en La Tola, en comparación con la obtenida en Cangahua, en el primer año, se puede explicar por la caída de fuertes precipitaciones y un severo ataque de gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) en la fase de maduración del maíz. En el segundo año se explica por el daño causado por las vacas que ingresaron a las parcelas.

Análisis económico

El análisis económico se realizó en función del valor que tienen los productos en el mercado y mediante el método de Perrin *et al.* (1976) que considera como únicas variables los costos del abono orgánico y químico, siendo tomado el costo de las demás actividades como fijo.

Para la avena se tienen datos del ciclo correspondiente al período 1994-1995; el mayor beneficio neto se obtiene en Cangahua con materia orgánica (T1), seguido del tratamiento con fertilización química, pero las mayores tasas internas de retorno (TIR) se

Tratamiento	Testigo		Materia orgánica		Fertilización química	
Lugar	Cangahua	La Tola	Cangahua	La Tola	Cangahua	La Tola
Avena forrajera						
Beneficio neto	832.500	630. 000	3'895.000	2'182.500	2'734.700	2'093.300
TIR			179,9	13,8	926,5	712,7
Fréjol						
Beneficio neto	980.000	604. 000	1'685.000	1'827.000	1'626.500	1'112.500
TIR			18,2	222,4	269,1	43,9
Cebada (1994-1995)						
Beneficio neto	168.000	736.440	1'618.160	1'212.560	1'177.700	3'144.700
TIR			68,3	0	491,8	1 .173
Cebada (1995-1996)						
Beneficio neto	117.600	105.960	843.960	87.240	780.860	911.420
TIR			19,6	0	187,6	227
Maíz (1994-1995)						
Beneficio neto	94.800	135.800	1'271.900	-270.140	798.580	952.000
TIR			73,4	0	342,7	397,5
Maíz (1995-1996)						
Beneficio neto	72.200	80.700	1'827.300	106.040	1'670.800	138.600
TIR			48,7	0	451,3	16,4

Cuadro 9 - Análisis del beneficio neto (en sucres) y de la TIR (en %) por cultivo
(método de Perrin *et al.*)

obtienen en Cangahua y en La Tola con el tratamiento de fertilización química. Esto se explica por el costo variable del tratamiento con materia orgánica, mucho mayor al correspondiente a la fertilización química.

Para el fréjol se dispone de datos del ciclo correspondiente al período 1995-1996. El mayor beneficio neto se obtiene en La Tola con materia orgánica (T1), seguido por el mismo tratamiento (T1) en Cangahua y luego la fertilización química en la misma localidad. La mayor TIR corresponde al tratamiento con fertilización química (T2) en Cangahua, seguido por el de materia orgánica (T1) en La Tola.

En cuanto a la cebada, se tiene información de dos ciclos continuos en las mismas parcelas. El mayor beneficio neto de los dos años se obtiene en el período 1994-1995, con fertilización química (T2), tanto en La Tola como en Cangahua, aunque en La Tola es bastante superior. La mayor TIR también corresponde al primer ciclo, con fertilización química (T2) en La Tola y en Cangahua; el beneficio neto superior en el período 1995-1996 se obtiene con materia orgánica. En el segundo año, la tendencia tanto del beneficio neto como de la TIR se mantienen, pero con niveles más bajos que los obtenidos en el primer año.

Para el maíz también se dispone de datos de dos ciclos continuos en las mismas parcelas En general se puede decir que el mayor beneficio neto en los dos años se obtiene en Cangahua con materia orgánica (T1), observándose un incremento en el segundo año de producción. La mayor TIR se obtiene en el segundo ciclo en Cangahua con fertilización química (T2), mientras que en el primer año, La Tola y Cangahua se comportan de manera bastante similar.

CONCLUSIONES

La diferencia de rendimientos entre el primero y el segundo años se debe a los fenómenos ocurridos en el segundo ciclo de cultivo, por lo que no se podría decir que existe una disminución marcada entre los dos, ni en el maíz ni en la cebada. Sin embargo, la reducción de la producción con T1 en cebada en el segundo año se puede atribuir a la disminución del aporte de materia orgánica a 20 ton/ha, al monocultivo continuo o a la falta de aplicación de potasio.

La producción en cangahua rehabilitada con materia orgánica (T1) y fertilización química (T2), aplicadas en dosis de 40 ton/ha y 100-60-0 (N-P-K), muestra un rendimiento elevado en comparación con la situación tradicional (T0).

La producción en suelo fértil es mayor que en suelos rehabilitados, excepto en el caso del maíz.

Se observa un marcado desmenuzamiento de los bloques en la superficie del terreno y no se distingue diferencia entre tratamientos.

En el primer año, el cultivo de cebada y de avena forrajera constituye una alternativa económica interesante, principalmente con fertilización química, ya que los costos son menores que con materia orgánica.

Nos parece importante hacer las siguientes recomendaciones:

- no sembrar dos ciclos continuos con un mismo cultivo y en el mismo terreno ;
- analizar la producción con dosis combinadas de materia orgánica y fertilización química, tratando de encontrar la fórmula más adecuada;
- sembrar cebada o avena forrajera en el primer año de cultivo;
- no sembrar maíz en el primero ni segundo año de cultivo;
- evaluar la producción de una leguminosa en el primer año que sigue a la rehabilitación de la cangahua;
- para poner en marcha un proyecto agrícola, es necesario disponer de agua de riego.

Referencias bibliográficas

ARIAS, J., 1995: *Estudio preliminar para rehabilitación de suelos volcánicos endurecidos (cangahua), Cangahua, Pichincha,* Tesis de grado, Universidad Central del Ecuador, Quito.

HERNÁNDEZ, L., 1996: *Estudio preliminar para rehabilitación de suelos volcánicos endurecidos (cangahua), Cangahua, Pichincha,* Tesis de grado, Universidad Central del Ecuador, Quito.

LLUMIQUINGA, M., 1996: *Estudio preliminar para rehabilitación de suelos volcánicos endurecidos (cangahua), Cangahua, Pichincha,* Tesis de grado, Universidad Central del Ecuador, Quito.

ORDÓÑEZ, L., 1995: *Estudio preliminar para rehabilitación de suelos volcánicos endurecidos (cangahua), Cangahua, Pichincha,* Tesis de grado, Universidad Central del Ecuador, Quito.

PERRIN, R.; WINKELMANN, D.; MOSCARDI, E.; ANDERSON, J., 1976: *Formulación de recomendaciones a partir de datos agronómicos. Un manual metodológico de evaluación económica,* CIMMYT, México, 54 p.

VARGAS, J., 1994: *Calendario de siembras y cosechas. Impacto agroclimático, Proyecto para la reorientación del sector agropecuario,* MAG-PRONAREG, Quito, 83 p.

Productividad potencial y costos de producción en cangahua recuperada

Edison SUÁREZ O.

Abstract

In Licto (Chimborazo Province), experiments of cangahua *cultivation have been carried out in order to determine the agricultural production of these soils. Several systems of* cangahua *reclamation and fertilization have been tested. With a good fertilization (100-60-0 or 10 t/ha of organic matter), the crop yields obtained are higher than the average yield of the province. The highest have been achieved in flat terraces. But the cost of making this type of terrace is five times higher than that of progressive formation terrace. The cost of the latter can be paid after four years of cultivation.*

Keywords: *Ecuador* - Cangahua *Reclamation - Productivity - Production Costs*

INTRODUCCIÓN

En el marco del proyecto «Licto» realizado por CESA (Central Ecuatoriana de Servicios Agrícolas) se están recuperando 600 ha de cangahua en la zona sur de Riobamba (Terán, 1996), con la ejecución de prácticas de conservación de suelos y actividades complementarias para el mejoramiento de la fertilidad. Con estos trabajos se han instalado parcelas experimentales para medir la productividad potencial de algunos cultivos (gramíneas y leguminosas). Estos ensayos, realizados en parte con la colaboración de técnicos del proyecto «Rehabilitación de suelos volcánicos endurecidos» (contrato ORSTOM-Unión Europea nº ERB-TS3*CT 93052), permiten no solamente tener una idea de la producción posible en estos tipos de terrenos, sino también evaluar los costos de las obras de recuperación así como los de producción de los cultivos, a fin de poder establecer la rentabilidad de este proceso de recuperación de la cangahua.

CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA

El área del proyecto se localiza en la parte central de la provincia de Chimborazo, 15 km hacia el Sur de la ciudad de Riobamba. Específicamente, la comunidad de Molobog se ubica entre los 1°46'00" de latitud Sur y 78°36'30" de longitud Oeste.

El ensayo se localizó en el lote comunal de Molobog que fue adquirido mediante un préstamo comunitario realizado por la Curia de Riobamba, en el cual se han realizado prácticas de recuperación y conservación de suelos.

Política y administrativamente, la comunidad de Molobog pertenece a la parroquia Licto, cantón Riobamba, provincia de Chimborazo; conviene señalar que dicha comunidad está actualmente vinculada a la Corporación de Organizaciones Campesinas de Licto (CODOCAL), organización campesina de segundo grado.

Ecológicamente, Molobog corresponde a la formación ee-MB. Se encuentra conformada por suelos ústicos de la clase Durostolls y Haplustolls, es decir suelos poco profundos y erosionados, sobre una capa dura cementada de cangahua. Se ubica a 2.925 m.s.n.m., con temperaturas que varían de 12 a 16 °C y una precipitación media anual de 417 mm (CESA, 1986).

La cangahua que, por su naturaleza físico-química, es una tierra endurecida proveniente de suelos volcánicos, constituye un gran porcentaje del área del proyecto.

LOS ENSAYOS

Se realizaron 2 ensayos. El primero consistió en observar el comportamiento de cultivos de avena, arveja y cebada con aplicación de abono orgánico y fertilizantes químicos. El segundo se centró en averiguar la influencia de la preparación del suelo en la producción de cebada.

Ensayo 1

El objeto de este ensayo fue analizar el comportamiento de abonos orgánicos en diferentes estados de descomposición y en dosis mínimas que podrían ser aplicadas en el área del proyecto; los resultados serían comparados con la producción de cada uno de los cultivos establecidos.

El ensayo fue establecido en un terreno comunal de Molobog, en el que afloraba la cangahua. Por esta razón, en noviembre de 1994, fue roturado utilizando maquinaria pesada.

Debido a la presencia de la cangahua, existía poca vegetación como chilca (*Baccharis latifolia*) y paja (*Stipa ichu*). Fue necesario entonces roturar este suelo mediante la utilización de un tractor de oruga (Fiat Alis D65A), con *ripper* de 3 dientes. Se hicieron dos cruzas y la profundidad efectiva del subsoleo alcanzó de 40 a 60 cm. Luego se construyeron 300 m de pircas que son muretes de bloques de cangahua colocados en sentido contrario al de la pendiente (terrazas de formación lenta de doble fila, de 50 cm x 100 cm) y 400 m de zanjas de desviación de agua (de 60 cm x 60 cm). Estas prácticas de conservación de suelos fueron complementadas con agroforestería. Seguidamente, se pulverizó y se sembró vicia-avena. Para la ejecución de todas estas prácticas, se contó con la participación de los 75 socios propietarios del lote comunal. Asistieron además niños, mujeres en mayor proporción y jóvenes, lo que significa un rescate de las mingas asociativas.

Metodología

El ensayo se estableció el 31 de octubre de 1995. Se diseñaron 27 parcelas, de 5 m^2 cada una: 9 para avena, 9 para arveja y 9 para cebada. En ellas se utilizaron, por una parte, 5 tipos de abonos orgánicos en diferentes estados de descomposición, y por otra, rastrojo de maíz y de avena (cuadro 1).

En uno de los tratamientos se probó fertilizante químico en dosis de 100-60-0, frente al testigo.

Se utilizó un rotavator para pulverizar aún más la cangahua e incorporar los abonos.

Resultados

El ciclo vegetativo de la avena y arveja para cosechar en verde fue de 130 días y en el caso de la cebada de 160.

Cultivo	Tratamientos								
	Abono orgánico					Rastrojo (5t/ha) de		Fert. Q*	Testigo
	D 10t/ha	F 10t/ha	G 5 t/ha	S 10t/ha	R 10t/ha	avena	maíz		
Avena forrajera	T1AOD	T2AOF	T3AOG	T4AOS	T5AOR	T6RA	T7RM	T8FQ	T0
Arveja	T1AOD	T2AOF	T3AOG	T4AOS	T5AOR	T6RA	T7RM	T8FQ	T0
Cebada cervecera	T1AOD	T2AOF	T3AOG	T4AOS	T5AOR	T6RA	T7RM	T8FQ	T0

*: fertilización química (100-60-0)
D: descompuesto, F: fresco, G: gallinaza, S:semi-descompuesto, R: reciclaje de basura

Cuadro 1 - Diseño del ensayo: comportamiento de avena, arveja y cebada con aplicación de abono orgánico y químico

El mayor problema se presentó en la cebada en las primeras fases del cultivo. Se observaron manchas foliares ubicadas indistintamente en toda la lámina por la presencia de *Cladosporium sp*, *Alternaria sp* y *Mycosphaerella*. La mayor incidencia se observó en el T8FQ (tratamiento con fertilizante químico en dosis de 100-60-0).

Para los tres cultivos, el mejor resultado se obtuvo aplicando 10 t/ha de abono orgánico descompuesto proveniente de ovino (T1AOD, cuadro 2).

Tratamientos	T1AOD	T2AOF	T3AOG	T4AOS	T5AOR	T6RA	T7RM	T8FQ	T0
Avena									
Altura (cm)	87	85	101	75	96,8	60	48	93	80
Macollos (número)	5	3	3	3	4	4	5	6	4
Peso masa verde (kg/ha)	13.636	9.036	10.309	9.036	7.490	3.672	2.818	9.818	6.363
Peso masa seca (kg/ha)	4.090	2.710	3.092	2.710	2.247	1.101	845	2.945	2.509
Arveja									
Vaina + grano (kg/ha)	3.400	3.300	2.500	3.340	740	200	400	200	100
Peso del grano verde (kg/ha)	1.008	980	742	990	220	58	116	58	29,6
Peso del grano seco (kg/ha)	278,2	270,5	204,8	273,2	60,8	16	32,6	16	8,17
Cebada									
Altura de la planta (cm)	44,7	44,8	49,6	51,2	59,2	59,6	46,8	54	55,2
Peso de material seco (kg/ha)	1.850	1.540	1.450	2.380	1.960	2.770	1.820	4.710	800
Peso del grano seco (kg/ha)	3.800	2.280	1.530	1.930	1.720	1.660	1.750	2.380	430

Cuadro 2 - Rendimientos de los cultivos con aplicación de abonos orgánicos y químicos

Los rendimientos de arveja y cebada fueron mucho mayores que los rendimientos promedio citados para la provincia de Chimborazo (respectivamente 2,8 y 3,8 t/ha en el experimento, frente a 0,31 y 0,59 t/ha en la provincia). Esto se debe esencialmente a que generalmente los campesinos aportan dosis de MO muy bajas, a veces nulas.

La incorporación de rastrojos dio, al igual que el testigo, rendimientos bajos.

Mediante la utilización de fertilizantes químicos en la dosis de 100-60-0 se obtuvo una buena producción para la avena (2,9 t/ha) pero una muy mala producción para el arveja (0,016 t/ha) lo que no se explica.

En el caso de la cebada, el rendimiento de granos con fertilización química fue solamente de 2,38 t/ha (frente a 3,8 t/ha con MO), lo que es bajo en comparación con el rendimiento en materia seca (4,7 t/ha) que es el mayor de los obtenidos con todos los tratamientos. Ese bajo valor se debe principalmente a las enfermedades ya mencionadas en este ensayo así como a un ataque de pájaros poco antes de la cosecha.

Ensayo 2

Los objetivos de este ensayo fueron:

- comparar la produccion agrícola con varios sistemas de preparación de suelos (preparación fina y gruesa en sistema tradicional con o sin extracción de bloques), en terrazas de formación lenta;
- comparar el efecto de terrazas de formación lenta y de terrazas planas;
- comparar el efecto de varios tratamientos de fertilización.

El lote experimental fue roturado en noviembre de 1994 y no se realizó actividad alguna hasta agosto de 1995. En octubre de 1995, se construyeron las pircas y la terraza plana.

Para la construcción de la terraza plana se utilizó un tractor de oruga (Komatsu D65A) equipado con una cuchilla y un *ripper* con tres dientes de 60 cm.

La maquinaria utilizada para la preparación del suelo fue un tractor agrícola Ford 7610, arado de 4 y rastra de 32 discos.

El ensayo se estableció el 31 de octubre de 1995, en una superficie de 1.600 m^2, de los cuales 1.200 m^2 correspondían a terrazas de formación lenta (con pircas) y 400 m^2 a terrazas planas (cuadro 3).

Cada parcela experimental (T1 a T14) tenía una superficie de 100 m^2.

Terrazas de formación lenta (p = 20 %)

Efecto preparación del terreno (fertilización: 100-60-0)					
Preparación fina (2 cruzadas)		Tradicional (extracción de bloques) + 1 cruzada		Gruesa (1 cruzada)	
T1	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**
CA	CC	CA	CC	CA	CC
Efecto fertilización (una sola cruzada)					
Abono orgánico (5 t/ha)		Fertilización: 100-60-0		Testigo	
T7	**T8**	**T9**	**T10**	**T11**	**T12**
CA	CC	CA	CC	CA	CC

Terrazas planas *(fertilización: 10-60-0, una sola cruzada)*

T13	**T14**
CA	CC

CA: cebada Atahualpa, CC: cebada cervecera
T1 a T4: parcelas experimentales

Cuadro 3 - Diseño del ensayo

Efecto preparación (con fertilización única: 100-60-0)

En las terrazas de formación lenta se comparó el efecto de la preparación del terreno después del subsoleo:

- parcelas T1 y T2: preparación fina obtenida después de dos pasadas de rastra de discos (2 cruzadas);
- parcelas T3 y T4: preparación tradicional que consiste en una extracción de los bloques de cangahua después del subsoleo y en una pulverización de los mismos seguida de una pasada de arado de discos. Es un trabajo muy lento pero se obtiene un suelo desmenuzado formado de bloques muy pequeños hasta llegar a la profundidad del subsoleo;
- parcelas T5 y T6: preparación gruesa, una sola pasada de rastra de discos.

En las terrazas planas, la preparación fue gruesa (una sola pasada de rastra de discos): parcelas T13 y T14.

EFECTO FERTILIZACIÓN

Se realizó únicamente en las terrazas de formación lenta con preparación gruesa. Los diferentes tratamientos aplicados fueron:

- parcelas T7 y T8: aporte de estiércol de 5 t/ha (dosis máxima habitualmente empleada en la región). Se lo aplicó momentos antes de la siembra y fue dispersado al voleo;
- parcelas T9 y T10: fertilización química (100-60-0), en forma fraccionada para el nitrógeno, es decir 1/3 de N a la siembra y los 2/3 restantes al macollo (45 días más tarde), el mismo que fue dispersado al voleo en las parcelas seleccionadas;
- parcelas T11 y T12: testigo, sin ningún aporte.

El cultivo fue la cebada. Se probaron dos variedades: Atahualpa (CA, variedad mejorada) y Dorada o «Cervecera» (CC, variedad local).

RESULTADOS

El ciclo del cultivo fue de 160 días.

En la cebada cervecera, se observó un severo ataque de *Cladosporium sp*, *Alternaria sp* y *Mycosphaerella*, en los tratamientos con fertilización química y en el testigo. A los 2 meses, se aplicó DITHANE M45 con lo que se detuvo el ataque; a partir del quinto mes, se observó un ataque a un 10 % de las plantas *Claviceps* purpúrea en la cebada Atahualpa.

Rendimientos

Debido a un ataque de pájaros al final del ciclo, no se pudo medir el rendimiento en grano, el mismo que fue estimado en función del rendimiento de materia vegetal y del índice de cosecha (IC = Rendimiento en grano/Rendimiento en grano + Rendimiento de materia seca), atribuyendo a este último un valor pesimista (0,25) y un valor optimista (0,35).

Las cifras indicadas en el cuadro 4 corresponden a los promedios de tres mediciones efectuadas en las partes alta, media y baja de cada parcela experimental.

Se observa que los rendimientos de la cebada cervecera son generalmente superiores a los de la variedad Atahualpa. Esta última, menos rústica, es sensible especialmente a la falta de nutrientes y de agua.

Efecto preparación del terreno

No hay una diferencia muy grande entre los diferentes tratamientos, aunque los rendimientos obtenidos en parcelas finas son menores que los demás, fenómeno por cierto inexplicable.

Los rendimientos altos (2,3 t/ha con un IC de 0,25 y 3,7 t/ha con un IC de 0,35) obtenidos en la terraza plana se explican no solamente por la fertilización química, la cual

Terrazas	con pendiente												plana	
Efecto	preparación						fertilización							
	Fina		Tradicional		Gruesa		con M.O.		100-60-0		testigo			
variedad	CA	CC	CA	CC	CA	CC	CA	CC	CA	CC	CA	CC	CA	CC
parcela	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14
altura (cm)	48,6	64	53,3	81	59,5	72,4	50,9	60,2	64,5	62,7	35,4	53	65,2	67,4
macollo/ planta	10,8	7,6	12,4	10,6	10,4	12,2	9,4	5,7	14,1	9,3	5,2	4,6	11,2	19
espigas/ m^2	340	253	625	538	601	394	370	272	719	405	242	311	890	962
materia vegetal	3,3	3,8	4,2	8,7	4,9	5,3	1,9	2,1	4,0	4,5	1,2	3,0	6,9	6,8
grano IC = 0,25	1,1	1,3	1,4	2,9	1,6	1,8	0,6	0,7	1,3	1,5	0,4	1	2,3	2,3
grano IC = 0,35	1,8	2	2,3	4,7	2,6	2,9	1	1,1	2,2	2,4	0,6	1,6	3,7	3,7

Cuadro 4 - Resultados y rendimientos en materia vegetal y en grano

da mejores rendimientos que la materia orgánica, sino también por una mayor disponibilidad de agua debido a que la terraza es plana. En efecto, cabe anotar que para cada parcela experimental los rendimientos son mayores en la parte baja de la terraza que es más profunda, que en la parte alta.

Efecto fertilización

Los rendimientos más altos se obtuvieron con fertilización química, seguidos por los resultantes de la aplicación de materia orgánica. La cebada Cervecera sin fertilización da mejores resultados que la Atahualpa, debido a su rusticidad.

Resultados económicos

Los ingresos por cultivo

El mayor ingreso se obtuvo en el cultivo de cebada (CC) con la incorporación de 10 t/ha de estiércol de ovino (cuadro 5). El ingreso es menor en el caso de fertilización química tomando la media de los rendimientos obtenidos con tal tratamiento en terraza de formación lenta (2,4 t/ha de grano seco), pero es superior al obtenido en los otros cultivos.

Cultivo	Rendimiento (t/ha)	precio unitario/kg (sucres)	Ingresos (sucres)
Fertilización organica (10 t/ha de estiércol)			
Avena (materia vegetal)	13,6	66	900.000
Arveja (en verde)	1,0	1.320	1'320.000
Cebada	3,8	660	2'508.000
Fertilización química			
Cebada (grano seco)	2,4	660	1'584.000

Cuadro 5
Ingreso bruto por cultivo

Costos de producción

Los diferentes costos para la preparación del terreno están indicados en el cuadro 6. Se calcularon los costos de producción para el cultivo que dio el mayor beneficio, es decir para la cebada con fertilización química, tomando en cuenta que los costos de producción de ese cultivo con aportes de MO son más elevados.

Prácticas	unidades necesarias	precio unitario (sucres)	precio total (sucres)	Total (sucres)	Total (dólares)
Subsoleo	10 horas	140.000	1'400.000	1'400.000	437,5
Construcción de terrazas (p = 20 por ciento)					
Formación lenta					
- pircas (300 m)	75 jornales	10.000	750.000		
- zanjas de desviación (400 m)	40 jornales	10.000	400.000	1'150.000	359,4
Terraza plana (subsoleo incluido)	90 horas	140.000	12'600.000	12'600.000	3.937,5
Preparación del suelo					
- excavación de bloques	100 jornales	10.000	1.000.000		
- pulverización manual	40 jornales	10.000	400.000	1'400.000	437,5
- rastra de discos (1 cruzada)	4 horas	25.000	100.000		
(2 cruzadas)	8 horas	25.000	200.000	200.000	62,5
Cultivo (cebada, R = 3,3 t/ha)					
Mano de obra					
- siembra	4 h (tractor)	25.000	100.000		
- cosecha	20 jornales	10.000	200.000		
- trillada		3.000/q	220.000	520.000	162,5
Productos					
- semilla	135 kg	880.000	118.800		
- vitavax	250 g	10.000	10.000		
- dithane	1 litro	80.000	80.000	208.800	65,6
- fertilización					
M.O.	10 t	100.000	1.000.000	1.000.000	
18-40-0	130 kg	1.000	130.000		
úrea	165 kg	700.000	115.500	245.500	76,7
Costo total de producción con fertilización química				974.300	304,5

Cuadro 6 - Costos por hectárea (en sucres)

Se observa que el precio del subsoleo (1'400.000 sucres/ha) es relativamente bajo en comparación con las demás prácticas.

La realización de terrazas planas (12'600.000 sucres) resulta cinco veces más costosa que la de aquellas de formación lenta (2'550.000 sucres) incluyendo el subsoleo.

La preparación tradicional, incluyendo la extracción y la pulverización manual de los bloques, es mucho más costosa (1'400.000 sucres) que la preparación con una doble pasada de rastra de discos (200.000 sucres). Así, al considerar el costo de esta última labor para el cultivo de la cebada se llegó a un precio total de:

- 12'800.000 sucres por hectárea con terraza plana (+ rastra de discos);
- 2'750.000 sucres por hectárea con terraza de formación lenta (subsoleo + zanjas de desviación + rastra de discos).

En estas condiciones, una producción de 2,4 t/ha de cebada (ingreso bruto de 1'584.000 sucres, ingreso neto de 609.700 sucres) amortiza la inversión, en el caso de la realización de terrazas de formación lenta, en casi 4 años, mientras que se necesitan 20 años en el caso de realización de terrazas planas o por lo menos 10 años si el rendimiento alcanza 3,7 t/ha (caso del experimento con IC de 0,35).

CONCLUSIÓN

La producción en suelos cangahuosos puede ser alta después de un subsoleo y con el aporte de una fertilización adecuada (fertilización química de 100-60-0 o abonos orgánicos de 10 t/ha). Así, los rendimientos obtenidos en los ensayos han sido mayores a los rendimientos promedio de la provincia.

Aunque la fertilización química (100-60-0 por hectárea) resulta cuatro veces más económica que el aporte de 10 t/ha de estiércol, no sería recomendable adoptar solamente esa fertilización, pues un mínimo de abono orgánico es indispensable para favorecer una estructura en el suelo.

El costo de realización de una terraza de formación lenta es cuatro veces menor que el de la terraza plana, pero no hay que olvidar que a medida que se hace la primera, es necesario subsolear de nuevo la parte alta de la misma, lo que aumenta el costo. Todavía no se conoce la frecuencia necesaria de estos subsoleos adicionales.

Los rendimientos de cebada en la terraza plana han sido un 60 % superiores a los de las terrazas de formación lenta. Sería necesario hacer un seguimiento de los rendimientos durante varios años para conocer el tiempo necesario para equipararlos.

Referencias bibliográficas

CESA, 1986: *Campesino y entorno ecosocial*, Riobamba, Ecuador.

INEC, 1994: *Sistema estadístico agropecuario nacional. Encuesta de superficie y producción agropecuaria*, Quito.

TERÁN, G., 1996: *La recuperación de suelos cangahuosos en el Proyecto Licto*, en este volumen.

Rendimiento de maíz-frijol en un tepetate en el segundo año de rehabilitación agrícola

Dionisio Benítez, Hermilio Navarro

Abstract

An agronomic experiment was conducted in a brown tepetate *(t3) near Santiago Tlalpan (Tlaxcala, México). The objective of this experiment was to evaluate the residual effect of an application of 40 t/ha of farmyard manure to the preceeding crops and also to evaluate their influence in the grain and yield components of a maize-bean association. The best treatments were those receiving organic matter in the previous year, and having either a polyculture (with or without microbial inoculation) or wheat as a preceeding crop.*

***Keywords**: Maize-Bean Association - Farmyard Manure - Residual Effect - Previous Crop*

INTRODUCCIÓN

Los tepetates en México representan un recurso potencial para contrarrestar la escasez de tierras cultivables en las faldas del eje neovolcánico, dada la creciente presión demográfica en esa zona (Quantin *et al.*, 1992). Estos materiales se definen como horizontes endurecidos o semi-endurecidos que subyacen a suelos de origen volcánico y afloran a la superficie como consecuencia de un manejo irracional de los suelos (Etchevers *et al.*, 1992a). Los tepetates de mayor incidencia en Tlaxcala son de color café (t3) y gris claro (t2) (Quantin *et al.*, 1992). Los nombres t2 y t3 se refieren a tipos de tepetates según la nomenclatura propuesta por Peña y Zebrowski (1992). Se ha observado que, desde el punto de vista de la fertilidad, la rehabilitación agrícola de estos substratos es posible, pese a la existencia de ciertas limitaciones como la extremada carencia de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, entre otras cosas. El proceso es largo, pero mediante un manejo consistente en el reacondicionamiento topográfico del material, la aplicación constante de estiércol, la incorporación de abonos verdes y/o fertilizantes, así como el uso de rotaciones y asociaciones de cultivos con leguminosas y un buen suministro de agua, se puede alcanzar un nivel de aptitud productiva adecuado, ya que tales prácticas modifican ciertas limitaciones físico-químicas y biológicas (Etchevers *et al.*, 1992b; González, 1984; Quantin *et al.*, 1992; López, 1995). Una vez resueltas las limitaciones, el potencial productivo de estos substratos puede llegar a ser similar a los de los demás suelos de la zona (Etchevers *et al.*, 1992a).

El abono orgánico más utilizado en el proceso de rehabilitación es el estiércol, pero en la mayoría de los casos este producto es de difícil consecución para muchos

productores, por lo que es necesario buscar alternativas. El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto de algunos tratamientos (con y sin estiércol vacuno aplicado en dosis de 40 t/ha el primer año de rehabilitación y tomando en cuenta el tipo de cultivo anterior) en el rendimiento de grano y algunos componentes agronómicos de la asociación maíz-frijol, en el segundo año de rehabilitación agrícola de un tepetate café (t3).

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se realizó en Santiago Tlalpan (municipio de Hueyotlipan, estado de Tlaxcala, México, entre 19° 29' de latitud norte y 98° 20' de longitud oeste), ubicado a una altura aproximada de 2.600 m.s.n.m.. El experimento se estableció el 1° de mayo de 1992, en un tepetate café (t3), roturado y terraceado un año antes, en el que se habían practicado, en esa primera temporada, policultivos (trigo y veza, con tratamientos que se describen más adelante). El diseño empleado consistió en bloques incompletos ubicados al azar, con seis repeticiones. La unidad experimental fue de 16 m^2, con cuatro surcos. Los tratamientos experimentales fueron 8 y se arreglaron factorialmente 2 x 4. Se empleó la variedad criolla Blanco grande de maíz y el cultivar Mecentral de frijol para el establecimiento de la asociación. Los factores de estudio fueron tratamientos sin y con adición de materia orgánica el año anterior (0 y 40 t/ha de estiércol de bovino) y el cultivo anterior, conformado por: a) maíz asociado con frijol y haba sin inoculación microbiana; b) maíz asociado con frijol y haba inoculados con endomicorriza vesículo-arbuscular (*Glomus* sp.), *Azospirillum* sp., *Rhizobium leguminosarum* bv. *phaseoli* y *Rhizobium leguminosarum* bv. *vicea*; (c) veza inoculada con *Rhizobium* sp.; d) trigo.

Se realizó una fertilización con 60 kg/ha de N y P_2O_5, que se aplicó a la siembra y al primer aporque. Las labores de cultivo fueron dos aporques, 30 y 60 días después de la siembra, y los deshierbes pertinentes.

Las variables medidas en el estudio con maíz fueron: número de mazorcas por metro cuadrado, número de granos por mazorca, número de granos por metro cuadrado, índice de cosecha, materia seca a la cosecha y rendimiento de grano. En el experimento con frijol solamente se consideró este último componente debido a que las constantes lluvias que afectaron al cultivo impidieron un desarrollo normal de las mediciones. Para la interpretación de los resultados se realizó un análisis de varianza y comparación de medias según Tukey (α = 0,05).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimientos del frijol

Las constantes lluvias ocurridas durante la segunda mitad de la temporada (figura 1) dañaron al cultivo de frijol, lo cual repercutió severamente en los resultados. Por ello, como se señaló, no se consideró conveniente estudiar sino el rendimiento de grano a la cosecha (cuadro 1).

El rendimiento del frijol fue muy bajo en todos los tratamientos como consecuencia de la situación adversa señalada.

Efecto de la materia orgánica en el rendimiento del maíz

El cuadro 2 muestra los rendimientos de maíz obtenidos en el tepetate recuperado, con y sin la incorporación previa de materia orgánica. Esta tuvo un efecto residual significativo en todos los parámetros excepto en la materia seca a la cosecha, lo que pone de

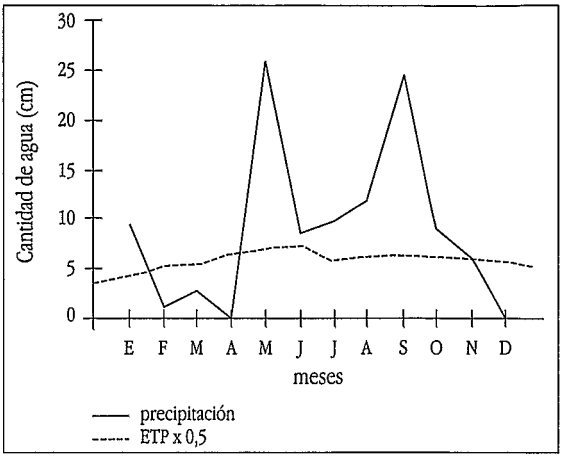


Figura 1 - Precipitaciones y humedad en Hueyotlipan, Tlaxcala, en 1992
(Pérez *et al.*, 1992)

Variables	Rendimiento (t/ha)
Materia orgánica	
con	0,14
sin	0,16
Cultivo anterior	
policultivo con inoculación	0,12
policultivo sin inoculación	0,12
veza	0,13
trigo	0,21

Cuadro 1 - Efecto de la materia orgánica y del cultivo anterior en el rendimiento de frijol

manifiesto la importancia de la adición de este material en cantidad suficiente para suplir la escasez nutrimental de los tepetates en proceso de rehabilitación y mejorar la aptitud productiva, particularmente cuando se dispone de agua de lluvia como el año en que se realizó este experimento.

Cuadro 2 - Rendimiento de grano y componentes agronómicos en maíz, con y sin aplicación de materia orgánica el año anterior en tepetates de segundo año de incorporación a la producción

Variables	Materia orgánica	
	con	sin
Rendimiento (t/ha)	3,53 a	2,52 b
Número de mazorcas por m²	4,36 a	3,97 b
Número de granos por mazorca	279 a	253 b
Número de granos por m²	1.234 a	1.024 b
Índice de cosecha	0,39 a	0,31 b
Materia seca (t/ha)	8,75 a	8,30 b

Tukey (μ = 0,05) = valores con la misma letra en una misma línea son estadísticamente iguales.

Los resultados presentados en el cuadro anterior hacen suponer que en el tepetate todavía quedaba una provisión adecuada de nutrimentos provenientes del estiércol aplicado el año anterior, ya que esa materia orgánica promovió rendimientos de maíz más elevados, así como un menor número de plantas infértiles, buen desarrollo de mazorcas y mejor llenado de grano, en relación con aquellos tratamientos que no recibieron materia orgánica.

En la figura 2 se puede apreciar, de manera general, el impacto benéfico que tuvo el efecto residual del abono orgánico en el tepetate, ya que su aplicación posibilitó una mayor producción de materia seca y con ello mejores rendimientos de grano.

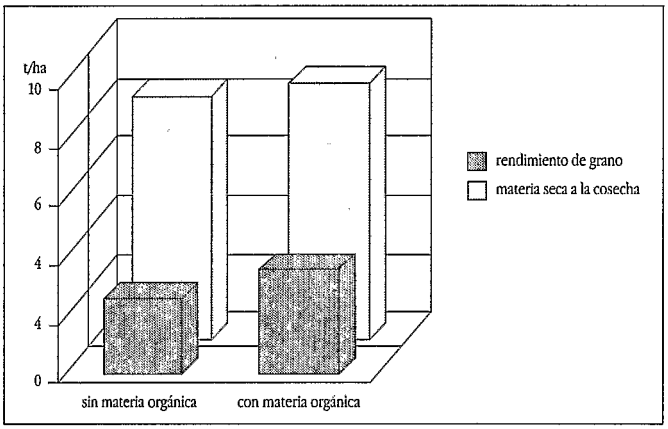


Figura 2 - Relación entre la materia seca acumulada a la cosecha y el rendimiento de grano debido al efecto residual de la materia orgánica aplicada el año anterior en un tepetate de reciente rehabilitación

El efecto residual de la materia orgánica adicionada al tepetate el año anterior aseguró condiciones nutrimentales mínimas para obtener un rendimiento agronómico que se considera adecuado, y, por lo tanto, mejores condiciones para que las plantas transformen en mazorca con mayor eficiencia parte de su rendimiento biológico, generando asimismo un mayor número de granos por metro cuadrado.

Cabe señalar que las plantas de frijol no parecieron competir con las de maíz, ya que los rendimientos obtenidos en este último cultivo se situaron por encima de la media, aun en los tratamientos sin adición de materia orgánica. Este efecto benéfico se debe principalmente a que con la asociación de cultivos se hace un uso más eficiente de los escasos recursos del suelo, tanto de nutrientes como de agua.

Efecto del cultivo anterior en el rendimiento de maíz

En el cuadro 3 se presenta el efecto del cultivo anterior en el rendimiento del maíz. La veza como cultivo anterior hizo que el número de granos por mazorca y el índice de cosecha fueran significativamente mayores a los alcanzados en los otros tratamientos. El índice de cosecha se acercó al ideal establecido (0,39) para las variedades criollas de maíz en Tlaxcala (Obrador, 1994).

Cuadro 3 - Rendimiento de grano y componentes agronómicos en maíz, según el tipo de cultivo anterior

Variables	Cultivo anterior			
	Policultivo		Trigo	Veza
	con inoculación	sin inoculación		
Rendimiento (t/ha)	2,81 a	3,52 a	2,97 a	3,46 a
Número de mazorcas por m²	3,97 a	4,34 a	4,34 a	4,13 a
Número de granos por mazorca	267 a	267 a	252 a	299 b
Número de granos por m²	1.089 a	1.170 a	1.118 a	1.240 a
Índice de cosecha	0,34 a	0,32 a	0,37 a	0,38 b
Materia seca (t/ha)	8,51 a	9,62 a	7,94 a	9,10 a

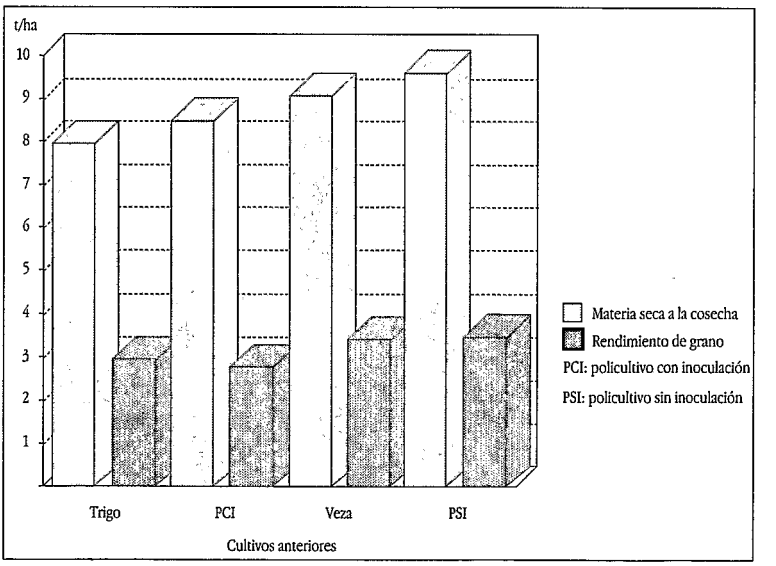
Tukey (α = 0,05) = valores con la misma letra en una misma línea son estadísticamente iguales.

El efecto favorable de la veza destaca la importancia del establecimiento de leguminosas en las primeras etapas de rehabilitación de los tepetates, por su aporte de materia orgánica y nitrógeno, que posibilita un mejoramiento de las condiciones nutrimentales de estos substratos.

A pesar del escaso efecto de los cultivos anteriores en el rendimiento de grano de maíz, es digno de tomarse en cuenta su papel en el proceso de rehabilitación de este substrato. Los resultados denotan una cierta tendencia en todos los tratamientos a un rendimiento mayor a la media regional que es de 1,82 t/ha. Probablemente este efecto favorable se debió a que los rastrojos del policultivo y de la veza fueron incorporados al tepetate, favoreciendo de alguna manera el aporte nutrimental y los rendimientos.

Se puede apreciar, de manera general, que a mayor producción de materia seca, mayor es también el rendimiento de grano (figura 3). Esto se atribuyó a que el mejor crecimiento y desarrollo de las plantas se tradujo en una mayor eficiencia en la formación

Figura 3 Relación entre la materia seca a la cosecha y el rendimiento de grano, bajo el efecto del cultivo anterior



de granos y menor en la de paja. La veza y el policultivo sin inoculación microbiana resultaron ser tendencialmente los mejores tratamientos en este caso.

Efecto de la interacción materia orgánica-cultivo anterior en el rendimiento de maíz

En el cuadro 4 se muestra el efecto de la interacción entre la materia orgánica y el cultivo anterior en los rendimientos de maíz.

Tal interacción influyó en los rendimientos de grano y en los componentes de rendimiento del maíz en comparación con los tratamientos que no incluyeron adición de estiércol. En la figura 4 se pueden apreciar gráficamente los rendimientos de grano obtenidos en estas condiciones.

Variables	Materia orgánica	Cultivo anterior			
		Policultivo		Trigo	Veza
		con inoculación	sin inoculación		
Rendimiento (t/ha)	con	3,48 a	4,81 a	3,37 a	3,41 a
	sin	2,14 b	2,22 b	2,58 b	3,50 a
Mazorcas por m²	con	4,23 a	4,53 a	4,40 a	4,44 a
	sin	3,71 a	4,15 a	4,27 a	3,82 a
Granos por mazorca	con	298 a	302 a	267,00 a	261 b
	sin	237 b	232 b	236,00 a	337 a
Granos por m²	con	1.267 a	1.361 a	1.198,00 a	1.197 a
	sin	911 a	978 a	1,03 a	1.284 a
Índice de cosecha	con	0,40 a	0,38 a	1038 a	0,36 a
	sin	0,27 b	0,27 b	0,34 b	0,39 a
Materia seca a la cosecha (t/ha)	con	8,64 a	10,33 a	8,13 a	9,42 a
	sin	8,39 a	8,92 a	7,74 a	8,78 a

Tukey (0,05) = valores en una línea con la misma letra son estadísticamente iguales.

Cuadro 4 - Rendimiento de grano y componentes del maíz al interactuar la materia orgánica y el cultivo anterior

Los resultados indican que mientras mayor es la producción de materia seca, mayor es el rendimiento de grano, aún más si se cuenta con adición previa de abono orgánico. Esto se debería al mejoramiento de la condición nutrimental que aumenta la eficiencia para formar granos más que paja. Tales resultados evidencian la importancia de la adición de materia orgánica en los tepetates para lograr mejores resultados a corto plazo, ya que los rendimientos obtenidos en esas condiciones superaron las 3 t/ha, cantidad que solo ha sido alcanzada al quinto año de rehabilitación en otras investigaciones (Quantin *et al.*, 1992). Cabe señalar que los altos rendimientos de grano de maíz obtenidos con la veza (como cultivo anterior) sin materia orgánica y el policultivo sin inoculante microbiano pero con adición de abono orgánico, se explican por los elevados valores de sus componentes. El hecho que de la veza como cultivo previo permita generar rendimientos significativamente mayores, aun

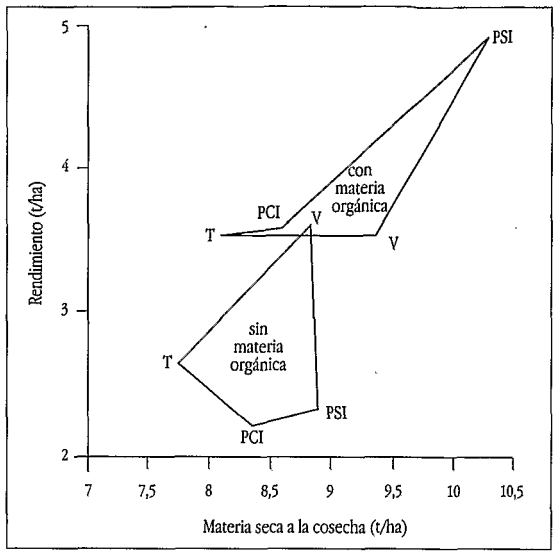


Figura 4
Relación entre la materia seca a la cosecha y el rendimiento de grano bajo el efecto interactivo de la materia orgánica y del cultivo anterior

sin la adición de materia orgánica, se debe indudablemente al aporte nutrimental, particularmente de nitrógeno, que realiza este cultivo al tepetate por tratarse de una leguminosa. Su efecto se hace aún más evidente cuando es incorporada al suelo como en el presente caso.

CONCLUSIONES

Los mayores rendimientos de grano de maíz se obtuvieron en un tepetate reincorporado a la agricultura con una aplicación inicial de 40 t/ha de materia orgánica, lo cual destaca el efecto residual de ese producto cuando se lo aplica en esas cantidades. También se observaron rendimientos considerados altos en los tratamientos con materia orgánica y policultivo, con y sin inoculante, y con trigo como cultivo anterior, lo cual se atribuyó a los residuos que dejan estos cultivos en el campo.

El tipo de cultivo anterior no determinó una diferencia significativa entre los parámetros evaluados. Ello se debió a que los rastrojos de todos los cultivos habían sido incorporados al tepetate. Esta práctica permite lograr resultados similares a los observados en el tratamiento con veza como cultivo previo. Así, se debe recomendar no quemar los rastrojos ni retirarlos del campo.

El manejo previo del tepetate así como las abundantes precipitaciones acrecentaron la capacidad productiva de este substrato, la misma que se reflejó en rendimientos muy superiores a la media regional. Para lograr resultados similares con el manejo tradicional, sin aporte de materia orgánica, debe transcurrir un tiempo mayor.

Referencias bibliográficas

ETCHEVERS, J. D.; CRUZ, L.; MARES, J.; ZEBROWSKI, C., 1992 Fertilidad de los tepetates I. Fertilidad actual y potencial de los tepetates de la vertiente Occidental de la Sierra Nevada (México), en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 379-384.

ETCHEVERS, J. D.; LÓPEZ, R. M.; ZEBROWSKI, C.; PEÑA, D., 1992: Características químicas de tepetates de referencia de los Estados de México y Tlaxcala, México, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 171-177.

GONZÁLEZ, J. M., 1984: *Introducción de gramíneas y leguminosas establecidas en áreas degradadas para uso en conservación de suelos y producción de forraje en sistema asociado con maíz*, Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 296 p.

LÓPEZ, U., 1995: *El C, N y P de la biomasa microbiana en suelos con diversos manejos*, Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, 158 p.

OBRADOR, J. J., 1994: *Validación de parámetros de planta y clima que se utilizan en un modelo simplificado destinado a determinar dosis de fertilización de N, P y K para maíz*, Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, 120 p.

QUANTIN, P., ARIAS H.M.; ETCHEVERS, J. D.; FERRERA-CERRATO, R.; OLESCHKO, K.; NAVARRO, H.; WERNER, G.; ZEBROWSKI, C., 1993: *Terra* Vol. 11 (número especial: Tepetates de México, caracterización y habilitación para la agricultura), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, 72 p.

ZEBROWSKI, C.; PRAT, C.; ETCHEVERS, J.D.; ARIAS, H.M.; MIRANDA, M.E., 1992: *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, 572 p.

Manejo agronómico diferencial de la asociación maíz-haba en tepetate de quinto año de uso agrícola

Hermilio NAVARRO G., Diego FLORES

Abstract

An experiment to evaluate the productivity of an indurated volcanic soil (tepetate) *in its 5th year after amelioriation was conducted. Different agronomic managements on an association of maize and broad bean were studied in 1995. Results showed a diferential response to different agronomic management, depicting a strong influence of organic matter in the agroproductivity of both crops.*

Keywords: *Maize and Faba Association - Organic Matter - Synchrony of Flowering - Crop Efficiency and Productivity of the* Tepetate.

INTRODUCCIÓN

Los suelos volcánicos endurecidos son conocidos en México como «tepetates». En la región fisiográfica del eje neovolcánico, estos materiales han sido rehabilitados para destinarlos al cultivo de productos alimenticios. Se estima que en el país los tepetates ocupan una superficie superior a 3 millones de hectáreas (Navarro y Zebrowski, 1992). Los suelos volcánicos endurecidos presentan limitaciones físicas, químicas y biológicas que condicionan en gran medida su utilización con fines agrícolas (Arias, 1992).

Tales limitaciones cambian en función del tiempo de utilización del tepetate. Se plantea que la aptitud productiva de este substrato está determinada en gran medida por el número de años de su utilización con fines productivos, el tipo de año climático y el manejo específico durante el mismo. Además, existe un efecto residual del manejo agronómico durante el proceso de rehabilitación y otro de la oportunidad con que se ejecutaron las prácticas agronómicas del itinerario técnico durante el año de referencia.

Para el manejo del tepetate existen diversas prácticas agronómicas: la rotación de cultivos, la inoculación, la incorporación de abonos orgánicos y abonos verdes, la incorporación de paja y el retiro de la misma, varias modalidades de fertilización. Todas estas prácticas influyen en gran medida en la respuesta productiva de los cultivos. La aplicación de estiércol es un componente importante en la rehabilitación del tepetate, pues influye en diversas propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo, las mismas que en último término inciden, de manera directa o indirecta, favorablemente en la productividad agronómica (Volke *et al.*, 1993).

Con base en los elementos anteriores, en el protocolo experimental objeto de este trabajo se consideraron diferentes factores para explicar la evolución y aptitud productiva de un tepetate roturado, y en particular, se evaluaron diferentes manejos agronómicos de la asociación maíz-haba al cabo de 5 años de utilización agrícola, con el fin de determinar el potencial productivo del tepetate.

MATERIALES Y MÉTODOS

La experimentación se llevó a cabo en la comunidad de Santiago Tlalpan (municipio de Hueyotlipan, Tlaxcala, México; 19°20' de latitud norte y 98°20' de longitud oeste), localizada a 2.600 m.s.n.m. El experimento se estableció en una terraza de tepetate conocido localmente como amarillo, tipo fragipán, que corresponde a los tepetates t3 según la clasificación de Peña y Zebrowski (1992). La roturación del material cementado se realizó en 1991, en una superficie de 1.728 m^2.

En 1991, se aplicó a la mitad de las parcelas una cantidad equivalente a 40 t/ha de estiércol, utilizándose las restantes como referencia (sin materia orgánica). Al inicio del quinto año después de su roturación y explotación agrícola, en 1995, se repitió la aplicación de estiércol de bovino, a razón de 26,5 t/ha.

Las parcelas se sembraron en 1995 con una asociación maíz-haba; ambos cultivos son comunes y de gran importancia agroeconómica en la región central de México. La variedad de maíz empleada fue la criolla Cañuela que se caracteriza por su grano blanco y tiene preferencia local por su precocidad y su elevada productividad potencial. En el caso del haba se estableció la variedad V-35, genotipo mejorado por ICAMEX y proporcionado por este con fines de validación regional.

Los tratamientos empleados en este experimento fueron:

a. **Inoculación**: se inocularon las dos especies, el maíz con *Azospirillum* y el haba con *Rhizobium*;
b. **Starter**: consistió en la fertilización a la siembra con 15 y 60 kg/ha de N y P_2O_5;
c. **Inoculación + Starter**: combinación de los dos tratamientos anteriores;
d. **Fertilización**: se aplicaron 110 kg/ha de N y 60 kg/ha de P_2O_5 de la siguiente forma: todo el fósforo a la siembra; el N fraccionado: 36,7 a la siembra, 36,7 a la primera escarda y el resto a la segunda escarda,
e. **Testigo**

Además, el efecto aporte de materia orgánica se probó en cada uno de los tratamientos, de modo que en realidad la experimentación comprendió 10 tratamientos: a, b, c, d y e con aporte de 26,5 t/ha de estiércol (CMO) y a, b, c, d y e sin aporte de materia orgánica (SMO).

El diseño experimental fue factorial de 5 * 2 (tratamiento * materia orgánica) con tres repeticiones y un arreglo en bloques al azar. La unidad experimental fue de 4 x 4 m (16 m^2).

El establecimiento del protocolo experimental se inició con el barbecho, el paso de rastra y el surcado cada 0,80 m. La siembra se realizó del 4 al 6 de mayo de 1995 y las prácticas agrícolas fueron: dos escardas, control de la plaga conocida como «frailecillo» (*Macrodactillus mexicanus Burm*) y de la enfermedad del haba denominada localmente «mancha de chocolate» (*Botritys* sp.).

Se determinaron: los días hasta la emergencia, la densidad de población establecida, la velocidad de crecimiento durante el período de pre-floración (maíz-haba), la producción de materia seca a la floración y a la cosecha, el rendimiento de grano y los componentes del rendimiento para cada una de las especies.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cultivo de maíz

El año climático de 1995 se caracterizó por un retraso de las lluvias en relación a la fecha de siembra, que se iniciaron el 26 de mayo. Este retraso y el proceso de desecación que sufrió la semilla inoculada durante tres semanas hace suponer que la expresión agroproductiva de la inoculación se vio afectada, lo cual se ilustra más adelante.

La relación entre la sincronía de la floración masculina y femenina (diferencia de los días entre la ocurrencia de ambas) y la eficiencia reproductiva (relación mazorcas/plantas, expresada en porcentaje) se presenta en la figura 1. Esta destaca que, a medida que aumenta la diferencia en número de días transcurridos entre las floraciones, el número de mazorcas y la eficiencia reproductiva es sustancialmente menor.

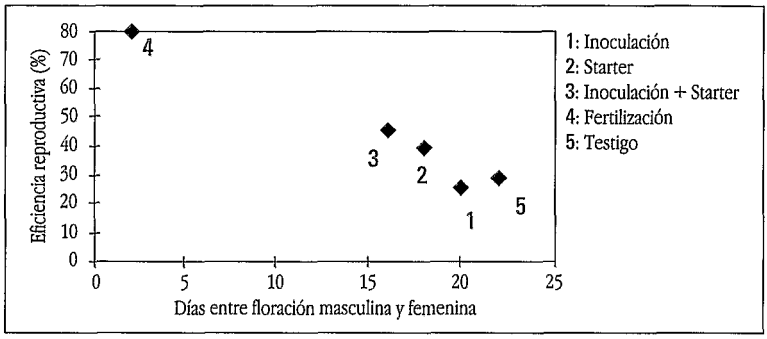


Figura 1 - Relación entre sincronía de las floraciones y eficiencia reproductiva del maíz en tepetate cultivado por 5 años y con diferentes manejos agronómicos

En este ámbito de variación, se observa que el tratamiento con fertilización mostró la mayor sincronía y la mejor eficiencia reproductiva. En contraste, la respuesta ante el resto de los tratamientos fue similar entre ellos, pero sensiblemente diferente a la del tratamiento con fertilización, esto es, una mayor asincronía asociada a una reducción de la eficiencia reproductiva. Esta última fue inferior al 50 %.

En la figura 2 se presenta la relación entre la sincronía de las floraciones y la eficiencia reproductiva del maíz, pero en este caso se consideró la interacción entre los manejos agronómicos y la aplicación de materia orgánica. Los tratamientos se agruparon de acuerdo a la respuesta. Cuatro de los cinco tratamientos sin materia orgánica, excepto la fertilización, presentaron una mayor asincronía de la floración, la misma que se asoció a una baja eficiencia reproductiva, mientras que los tratamientos con materia orgánica y el de fertilización sin materia orgánica presentaron una mayor sincronía entre las floraciones y consecuentemente una mayor eficiencia reproductiva.

En relación a los diferentes manejos, fue notoria la superioridad de la fertilización, con y sin materia orgánica, tanto por la mejor sincronía como por la mayor eficiencia reproductiva. Por su parte, los tratamientos con inoculación y testigo, ambos sin materia orgánica, fueron los más limitantes en cuanto a la expresión del potencial del maíz.

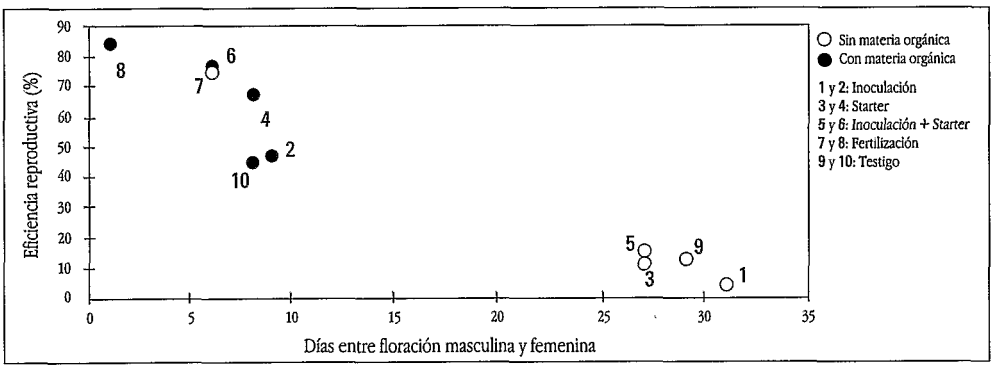


Figura 2 - Relación entre sincronía de floraciones y eficiencia reproductiva en la interacción manejo agronómico-materia orgánica, en maíz asociado con haba

La variación de la sincronía entre floraciones y de la eficiencia reproductiva se traducen en un importante efecto en la expresión agroproductiva del maíz (cuadro 1).

Tratamiento	Materia Orgánica	Granos/m²	Peso de un grano (mg)	Rendimiento de grano (kg/ha)	Materia seca aérea total (kg/ha)	Índice de cosecha
Inoculación	con	389,93 bc	300 a	1.105 bc	4.785 abc	0,2150 bc
	sin	50,16 c	164 a	106 c	1.739 c	0,0620 c
Starter	con	640,16 ab	325 a	2.181 ab	5.445 ab	0,3892 ab
	sin	60,94 c	186 a	170 c	2.253 bc	0,0625 c
Inoculación + starter	con	775,12 a	324 a	2.560 a	5.960 a	0,4158 a
	sin	113,24 c	202 a	299 c	2.606 bc	0,0770 c
Fertilización	con	812,84 a	353 a	2.848 a	7.231 a	0,3788 ab
	sin	732,66 a	326 a	2.379 ab	6.832 a	0,3359 ab
Testigo	con	385,75 bc	287 a	1.089 bc	4.376 abc	0,2353 abc
	sin	54,40 c	193 a	158 c	2.286 bc	0,0866 c

Valores con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey: $\alpha = 0,05$).

Cuadro 1 - Agroproductividad de maíz asociado con haba, con diferentes manejos agronómicos

En el componente granos/m² influyó de manera importante el tratamiento agronómico, al igual que el factor materia orgánica. Los tratamientos que incluían materia orgánica mostraron mayores valores de este componente, que aquellos sin materia orgánica, excepto el tratamiento con fertilización. El número de granos/m² se correlacionó alta y significativamente con la eficiencia reproductiva ($r = 0,97$), es decir que los tratamientos con mayor eficiencia reproductiva presentaron un mayor número de granos/m². El efecto de la materia orgánica fue notorio, excepto en el tratamiento con fertilización.

En el componente peso de un grano influyeron los diferentes manejos y la materia orgánica, al igual que lo hizo el tratamiento con fertilización en el rendimiento de grano. La diferencia en la producción de grano entre los tratamiento con materia orgánica y sin ella es menor en el caso del tratamiento con fertilización que en los demás tratamientos (inoculación, *starter*, etc.). El tratamiento con fertilización registró la mejor respuesta, seguido de la inoculación + starter y el starter, ambos con materia orgánica.

En la figura 3 se presenta la estrecha relación positiva existente entre la materia seca y la producción de grano (r = 0,94). Es notorio el efecto en la producción de los diferentes tratamientos combinados con la materia orgánica.

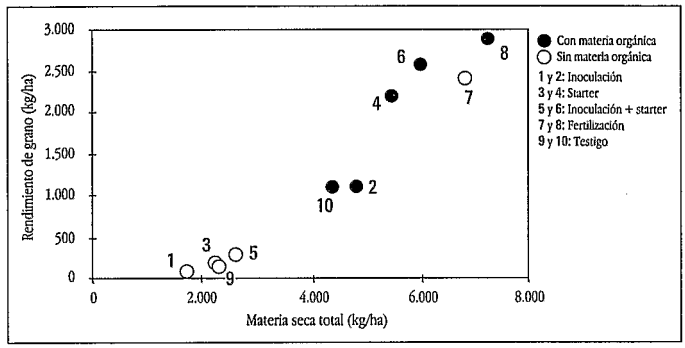


Figura 3 - Relación entre materia seca y rendimiento de grano de maíz, en la interacción manejo agronómico-materia orgánica

El índice de cosecha como indicador de eficiencia agroproductiva muestra claramente el potencial productivo de los tratamientos con y sin materia orgánica. En general, se destacan como los mejores tratamientos el starter, la inoculación + starter y la fertilización, todos con materia orgánica, además de la fertilización sin materia orgánica.

Un aspecto relevante a considerarse es que pese a ser el quinto año de uso agrícola, el tepetate aún presenta limitaciones de carácter nutrimental pues no satisface los requerimientos del cultivo de maíz para una adecuada expresión agroproductiva. Esto es evidente en el caso del testigo y de los tratamientos sin materia orgánica. Por lo tanto, es preciso señalar que la incorporación de materia orgánica es un potenciador de la productividad, así como la interacción de la materia orgánica con los diferentes tratamientos, que influyó notoriamente en el crecimiento y desarrollo del maíz.

Cultivo de haba

La relación entre el número de granos/m^2 y el rendimiento de grano de haba aparece en la figura 4. Estas dos variables se correlacionaron positivamente.

En el cultivo de haba se observaron tres tipos de comportamientos. En primer lugar, y a diferencia del maíz, el tratamiento con mayor número de granos/m^2 (promedio: 83 granos/m^2) y rendimiento de 1.306 kg/ha fue el testigo. En segundo lugar, con una producción intermedia, se presentaron la inoculación y el starter (promedio de 75 granos/m^2 y un rendimiento de 1.110 kg/ha). Los resultados más bajos se obtuvieron con los tratamientos fertilización e inoculación + starter: promedio de 54 granos/m^2 y rendimiento de 815 kg/ha. Los rendimientos reportados para maíz y haba son experimentales, se les puede aplicar un coeficiente de 0,8 para estimar los rendimientos comerciales.

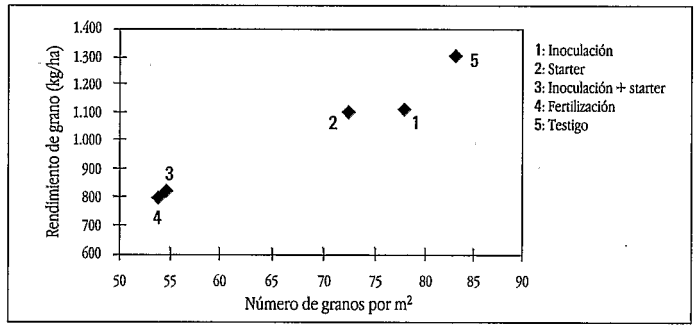


Figura 4 - Relación entre granos/m² y rendimiento de haba con cinco manejos agronómicos

Los resultados de la interacción manejo agronómico-materia orgánica se presentan en el cuadro 2.

Tratamiento	Materia Orgánica	Vainas/m²	Vainas/ planta	Granos/m²	Peso de un grano (g)	Rendimiento de grano (kg/ha)
Inoculación	con	56,2 a	15,5 a	112 a	1,72 a	1.904 a
	sin	22,4 b	8,3 a	45 a	1,27 a	322 d
Starter	con	35,6 ab	12,1 a	75 a	1,99 a	1.452, abc
	sin	32,8 ab	12,8 a	69 a	1,57 a	759 cd
Inoculación + starter	con	31,0 ab	11,0 a	60 a	1,74 a	1.019 bcd
	sin	20,2 ab	7,2 a	49 a	1,12 a	944 bcd
Fertilización	con	26,7 ab	9,4 a	49 a	1,74 a	853 cd
	sin	26,6 ab	9,8 a	58 a	1,29 a	756 cd
Testigo	con	58,6 a	16,2 a	122 a	1,70 a	2.089 a
	sin	32,8 ab	12,1 a	77 a	1,43 a	1.094 abc

Valores con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey $\alpha = 0,05$).

Cuadro 2 - Agroproductividad de haba asociada con maíz, con diferentes manejos agronómicos

Se observa la influencia positiva de la materia orgánica en los componentes del rendimiento, lo que a su vez se traduce en una elevada producción de grano. La diferencia mínima significativa en el rendimiento de grano fue de 1.003 kg, por lo que los 3 tratamientos con materia orgánica (testigo, inoculación y starter) y el testigo sin materia orgánica fueron estadísticamente similares. En condiciones opuestas se observan 6 tratamientos de los cuales 4 no incluyeron materia orgánica (inoculación + starter, starter, fertilización e inoculación) y 2 sí lo hicieron (inoculado + starter y fertilización). Una conclusión preliminar se refiere al efecto positivo de la aplicación de materia orgánica en la producción de grano, además del efecto negativo de la fertilización con o sin materia orgánica y la ninguna incidencia positiva de la inoculación. Los resultados anteriores muestran que el cultivo de haba, aun bajo condiciones más restrictivas de manejo, presenta una agroproductividad superior.

Maíz-haba

El análisis conjunto del comportamiento de las dos especies permitió determinar una respuesta diferencial de ambas a los manejos agronómicos evaluados. En la figura 5 se presentan los tratamientos menos limitantes para el maíz como la fertilización con y sin materia orgánica, y la inoculación + starter con materia orgánica, que mostró una mayor expresión biológica pero que influyó negativamente en la producción de grano de haba. Este resultado se explica, de acuerdo con el número de hojas y su estado de desarrollo, por una relación de competencia por la luz. En contraste, cuando los cultivos se sometieron a condiciones de manejo ligeramente restrictivas en cuanto a nutrición, el maíz presentó bajos rendimientos, pero el haba reveló un mayor potencial agronómico. Ejemplo de esta situación fueron los tratamientos con materia orgánica (testigo, starter + inoculación) y el testigo sin materia orgánica.

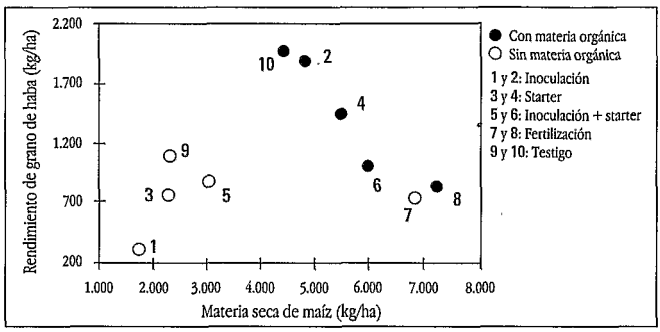


Figura 5 - Relación entre materia seca de maíz y producción de grano de haba en la interacción manejo agronómico-materia orgánica

En la figura 6 se ilustra la producción de grano de las dos especies sometidas a los diversos tratamientos, con y sin materia orgánica. Es notorio el contraste entre la respuesta del maíz y la del haba. En el maíz, la fertilización inorgánica fue la práctica agronómica que determinó el mejor comportamiento de este cultivo, mientras que en haba fue el testigo con materia orgánica. También se observa que el haba sin materia orgánica mostró superioridad productiva en la mayoría de los casos con respecto al maíz igualmente sin materia orgánica. Por último, el tratamiento en el que se midió la menor diferencia en la producción de grano, tanto de maíz como de haba, fue starter + materia orgánica, lo cual podría atribuirse al limitado efecto de la inoculación por la sequía postsiembra y en particular a un cierto efecto negativo de la misma en el rendimiento.

La producción total de grano de la asociación manejo agronómico-materia orgánica se presenta en el cuadro 3. Allí se aprecia nuevamente la notoria influencia de la materia orgánica. La diferencia en producción de grano en las dos condiciones de materia orgánica al interior de cada manejo agronómico fueron estadísticamente significativas, salvo en el caso de la fertilización. Estos mismos tratamientos son estadísticamente iguales y corresponden a una producción mayor.

Finalmente, cabe señalar que los tres tratamientos en que se utilizó materia orgánica en la combinación (starter, fertilización e inoculación + starter), presentaron los mayores resultados productivos cualitativamente, es decir entre 3,6 y 3,7 t/ha de grano. Este valor es, sin duda, un rendimiento aceptable en un tepetate de cinco años de uso

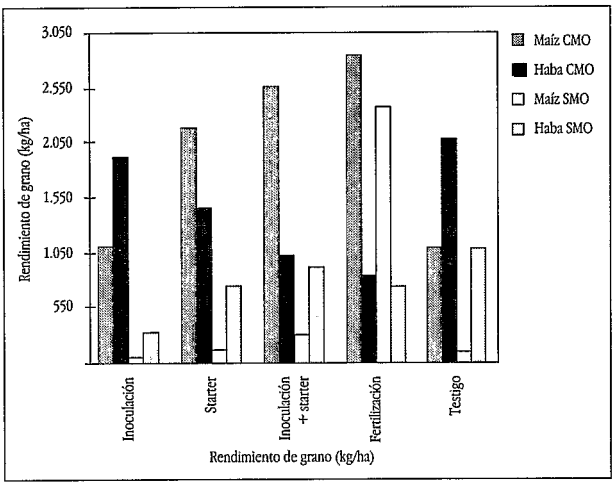


Figura 6 - Relación rendimiento de maíz-haba, con cinco tratamientos y dos niveles de materia orgánica

	Manejo agronómico				
Materia orgánica	Inoculación	Starter	Inoculación + starter	Fertilización	Testigo
con	3.009 a	3.703 a	3.578 a	3.701 a	2.824 ab
sin	429 c	928 c	1.355 bc	3.134 a	1.252 c

Valores con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha = 0,05$).

Cuadro 3 - Producción total de grano en la asociación maíz-haba, con diferentes manejos agronómicos y dos niveles de materia orgánica

agrícola. También se debe subrayar que el menor rendimiento cualitativo se obtuvo con el tratamiento de inoculación, lo cual confirma la inconveniencia de tal tratamiento en caso de presentarse un periodo de sequía posterior a él, e incluso anticipa un efecto negativo, si se lo compara con el resultado del testigo en condiciones similares.

CONCLUSIONES

La materia orgánica tiene un efecto significativo y positivo en la producción de grano en la asociación maíz-haba, excepto en el tratamiento con fertilización que no presentó diferencias según la aplicación o no de materia orgánica. Esto muestra la conveniencia económica de la utilización de uno solo de estos factores en un tepetate de cinco años de uso agrícola.

La competencia entre especies al interior de la asociación refleja dos tendencias diferenciales: cuando el maíz presenta rendimientos elevados, con o sin materia orgánica, los del haba son bajos; la otra tendencia tiene un comportamiento contrario.

La respuesta a los cinco manejos agronómicos con aplicación de materia orgánica muestra ser similar, incluyéndose en este grupo la fertilización inorgánica. Cabe también recordar que el menor rendimiento cualitativo correspondió a la inoculación, lo que plantea

la inconveniencia de tal tratamiento en caso de producirse un periodo de sequía posterior a él. No obstante, la inoculación, en otras circunstancias como las esperadas en el diseño del protocolo, debería tener un efecto potenciador en la producción.

Respecto a los cultivos, el maíz mostró la mejor respuesta ante tres tratamientos con aplicación de materia orgánica (fertilización, inoculación + starter y starter) y ante la fertilización sin materia orgánica. En haba, los mejores resultados se observaron en cuatro tratamientos, tres de ellos con materia orgánica (testigo, inoculación y starter) y el cuarto sin ella (testigo).

En relación a las variables de diagnóstico, sincronía entre floraciones y eficiencia reproductiva, el comportamiento de los cultivos frente a los tratamientos mostró dos grupos de respuesta: uno, con cuatro de los cinco tratamientos sin materia orgánica, excepto la fertilización, presentó la mayor asincronía asociada a una baja eficiencia reproductiva; el otro, con los cinco tratamientos con materia orgánica y el de fertilización inorgánica, presentó una mayor sincronía entre floraciones y, consecuentemente, una mayor eficiencia reproductiva.

Referencias bibliográficas

ARIAS, H., 1992. Rehabilitación de tepetates: una alternativa para la producción agropecuaria y forestal, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 309-317.

NAVARRO, H.; ZEBROWSKI, C., 1992: Análisis agronómico comparativo en tepetates, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 451-459.

PEÑA, D.; ZEBROWSKI, C., 1992: Caracterización física y minerológica de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 156-164.

VOLKE, V.; FRAUSTO, J.; MERINO, C., 1993: La materia orgánica del suelo como función de factores físicos y el uso y manejo del suelo, en *Terra*, Vol. 11 (número especial: Tepetates de México, caracterización y habilitación para la agricultura), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 85-92.

Análisis del comportamiento de cultivos en tepetate t3 incorporado a la agricultura de temporal, Texcoco (México)

Aurelio BÁEZ, Eduardo ASCENCIO,
Christian PRAT, Alfonso MÁRQUEZ

Abstract

The purpose of this study is to precise the conditions of agricultural reclamation of tepetate *in the eastern part of the Mexico valley (Texcoco). The* tepetate *is a compact and sterile material. The lack of nitrogen, carbon and the poor biological activity limit the possibility of plant development. But after the use of heavy machinery and terracing, it is possible, under certain conditions, to use this new soil for agriculture. From 1993 until 1996, we compared native soil and different treatments applied to the* tepetate *reclaimed, such as the deepness of the reclamation, the use of chemical/biological fertilisers, the monoculture/associated cultures, the tillage practices of the new soil on 6 different terraces of 700 m^2. One of our goals was to find the best ways to use the new* tepetate *soils as real agricultural soils.*

The conclusions complete those of previous works. It is necesary to use a cereal of small seeds (wheat, barley...) in association with a leguminous, especially the Medicago polimorfa *, the first year of cultivation. The use of corn is posible since the second year, but with a high quantity of fertilisers, especially of nitrogen. It is also important to supply those elements in two or three applications instead of one. It is always better to use association than monoculture. In the case of corn, the association with string bean is excellent, while it is possible but risky with red bean. The action of the manure is not very efective if it is not complemented at the moment of the seeding with some synthetical fertilisers. The best deep for* tepetate *reclamation is 40-45 cm. In fact, in this regions, the main problem is not really the condition of reclaiming of the* tepetates *but the poor quantities and the unpredictable distribution of precipitacions during the rainy season.*

Keywords: Tepetate - *Phæozem Vertic - Mexico - Tillage Systems - Mineral Fertilization - Organic Fertilization - Corn - String Bean* - Medicago polymorfa - *Bean - Barley - Soil Reclamation*

INTRODUCCIÓN

Los tepetates en México cubren, a lo largo del eje neovólcanico, una superficie superior a 30.000 km^2 (Zebrowski *et al.*, 1992). Estos materiales, de 10 a 40.000 años de edad, son tobas originadas de materiales piroclásticos. El afloramiento de estas capas

duras, compactas y estériles desde el punto de vista agrícola, se debe a la erosión hídrica, proceso que en su mayor parte ha sido inducido por el hombre desde épocas precolombinas (Navarro y Prat, 1996). En la actualidad, esta problemática conduce al abandono de las tierras por parte de los campesinos y a un mayor índice de agostadero de mala calidad que sigue favoreciendo la erosión. Para incorporar el tepetate a la agricultura es necesario roturarlo, lo cual implica un alto costo, ya que la única forma de hacerlo es con un buldózer. Por otra parte, la ausencia casi total de nitrógeno, fósforo y carbono, así como una baja actividad microbiana constituyen serias limitaciones agronómicas. Sin embargo, estas deficiencias pueden ser corregidas con fertilizantes químicos y/o orgánicos.

Aun cuando se conoce cierta tecnología para incorporar los tepetates a la agricultura, hay desconocimiento en cuanto al manejo agronómico para su pronta habilitación agrícola. Por esta razón, el programa de investigación UE-ORSTOM-CP-UAT-UG sobre rehabilitación de tepetates en México elaboró un protocolo experimental con base en experiencias de programas anteriores, para definir las condiciones de un manejo agronómico más adecuado que permita un aprovechamiento óptimo del recurso tepetate. Para ello, después de haber roturado un tepetate t3 aflorante, se efectuó un seguimiento agronómico durante 4 años (1993 a 1996) a fin de comparar el efecto de distintos modos de roturación y de manejo agronómico. Paralelamente a las evaluaciones agronómicas, se realizó un seguimiento de la erosión, de los estados de superficie y de la cobertura vegetal.

METODOLOGÍA

Características del tepetate

El tepetate del área de estudio presenta las características físico-químicas de un duripán (Peña y Zebrowski, 1992). Es un tanto calcáreo ($CaCO_3$ < 6 %), con un pH en agua de 7,7. No es fértil desde el punto de vista agrícola, pues contiene < 0,02 % de materia orgánica, muy escasas raíces, P Olsen < 2,5 ppm y N < 0,02 ppm. Tiene un espesor de 1 a 1,5 m.

En la comunidad de San Miguel Tlaixpan (Edomex), zona oriente del valle de México, se establecieron cinco terrazas experimentales (T2, T3, T4, T5 y T6) en un tepetate t3 roturado (cuadro 1). A partir de 1995, la T6 fue dividida en dos (T6a y T6b). La maquinaria empleada para esta labor fue un Caterpillar D7 de dos dientes. Se realizaron dos pasadas cruzadas y después se formaron las terrazas (80 x 20 m) siguiendo las curvas de

Tratamiento	Ref.	Área (m^2)	Sustrato	Profundidad * (m)	Pendiente (%)
Efecto profundidad roturación	T2	470	Tepetate roturado	0,60	4,7
Referencia monocultivo	T3	773	"	0,46	3,2
Efecto estiércol	T4	732	"	0,43	3,4
Efecto preparación de la tierra y plana (fina)	T5	792	"	0,44	2,5
Efecto preparación de la tierra (gruesa)	T6	733	"	0,40	4,4
Sin residuo a partir de 1995	T6b	419	"	0,40	4,4
Referencia suelo	T7	713	Suelo arcilloso	0,53	5,9

*: Profundidad promedio de roturación

Cuadro 1 - Características de las terrazas después de la roturación

nivel. Dos pasos de rastra afinaron la preparación del terreno. Se trazó además una terraza en suelo vértico (T7) como referencia para las mediciones agronómicas.

Características de las terrazas

Para los ciclos agrícolas de 1993 a 1996, se establecieron una serie de cultivos en diferentes condiciones cada año (cuadro 2). Se trataba de comparar los siguientes parámetros: asociación gramíneas + leguminosas vs. monocultivo, roturación normal vs. roturación profunda, aplicación de estiércol vs. abonos minerales, pendiente de 5 a 10 por ciento vs. pendiente plana y tepetate vs. suelo.

Ref.	1993	1994	1995	1996
T2	cebada + veza	maíz + haba + frijol	maíz + haba	cebada + medicago p.
T3	cebada	maíz	maíz	cebada
T4	cebada + veza	maíz + haba + frijol	maíz + haba	cebada + medicago p.
T5	"	"	"	maíz + haba
T6	"	"	"	"
T7	"	"	"	cebada + medicago p.

Cuadro 2
Condiciones de las terrazas de estudio de 1993-1996

Los cultivos

Para la selección de los cultivos, se tomó en cuenta que el maíz, los cereales de grano pequeño y los cultivos de haba y frijol cuentan entre las plantas más cultivadas por los agricultores que practican sistemas de producción tradicionales en las regiones donde se han llevado a cabo ensayos agronómicos con tepetate, en los estados de Tlaxcala y México. La semilla utilizada en el caso de la cebada fue la variedad «esmeralda», desarrollada por el INIFAP, tolerante frente a la sequía y que produce un rendimiento de 3,6 t/ha. En cuanto al maíz, el haba y el frijol, se emplearon semillas criollas utilizadas en los pueblos de los alrededores. Las semillas de Medicago polimorfa proporcionadas por el CIMMYT, fueron recogidas en la región.

Con el antecedente de que el cultivo de maíz no produce rendimiento de grano en tepetates recién roturados (Navarro y Zebrowski, 1992), se incluyó este cultivo hasta el segundo año. Por ello se sembró cereal de grano pequeño, como la cebada (se habría tenido el mismo resultado con el trigo, la avena, etc.).

Diseño experimental

Las terrazas se dividieron longitudinalmente en tres partes, identificándose la parte aguas arriba como A, la parte media como M y la parte aguas abajo como B. Esta división está relacionada con la diferencia de profundidad del tepetate roturado así como con la capacidad potencial de recibir más agua y más abonos por arrastre. Globalmente, la parte A es la menos profunda mientras que la B es la más profunda y la que recibe mayor cantidad de agua y abonos, y cada una de ellas representa aproximadamente el 10 % de la superficie total de cada terraza. La parte M corresponde al 80 % de la superficie, es relativamente homogénea y representativa del tratamiento correspondiente.

Para la determinación de los rendimientos, se llevó a cabo el seguimiento de la floración, la altura, la materia seca, la biomasa y el peso de 100 granos principalmente. Para la comparación entre tratamientos, se definió un muestreo aleatorio en cada parte.

En 1993 se cosecharon 4 pequeñas parcelas de 1 m^2 en cada terraza (1 en A, 2 en M y 1 en B) y se determinó el valor medio para cada bloque. En 1994 y 1995 se tomaron 8 pequeñas parcelas de 16 m^2 en cada terraza (2 en A, 4 en M y 2 en B) en T3, T4, T5, T5 y T7, mientras que en T2 y T6b se tomaron 1 en A, 3 en M y 1 en B. Por último, se determinó el valor medio para cada bloque.

Procedimiento de trabajo

Durante los años de experimentación, se preparó el terreno (chaponeada, rastra, surcado) con un tractor, mientras que las labores posteriores (limpieza) se efectuaron manualmente y/o con una yunta de caballos.

El cuadro 3 presenta la a composición de los estiércoles incorporados durante los tres ciclos agrícolas.

	1993		1994		1995	
	%	kg	%	kg	%	kg
Total de estiércol	100	40.000	100	20.000	100	20.000
Humedad	66	26.400	65	13.080	62	12.274
Peso seco	44	13.600	35	6.920	39	7.726
M,O	64	8.704	64	4.417	64	4.417
N	1,4	190,4	2,3	159,2	1,8	137,5
P	0,4	54,4	0,8	56,1	0,6	47,9
K	0,4	54,4	0,1	5,5	0,4	34
Ca	2,6	353,6	4,2	290,6	4,5	350,8
Mg	0,7	95,2	0,1	9	0,3	24
Fe	0,3	120	0,3	58	0,4	80
Na	-	-	0,5	31,1	0,4	33,2
		ppm		ppm		ppm
Cu	t	0,1	t	0,4	t	0,2
Mn	t	1,3	t	1,6	t	1,7
Zn	t	0,5	t	1,0	t	0,9

t: trazas, -: No se hizo el análisis.

Cuadro 3
Composición química del estiércol de bovino utilizado de 1993 a 1995

En 1993, se sembró al voleo la variedad de cebada «esmeralda». Se utilizaron 105 kg/ha por 21 kg/ha de veza común, y 150 kg/ha en T3 como monocultivo. La dosis de fertilización empleada fue de 80-60-00 aplicada en dos fracciones, una a la siembra y otra al 50 % de floración, en todas las terrazas. En T4 se incorporaron además 40 t/ha de estiércol húmedo de bovino.

En 1994, se sembró la asociación maíz azul + frijol + haba y maíz como monocultivo en T3. En las terrazas con asociación, la distancia entre matas fue de 33 cm. Se sembraron 3 semillas por hoyo de maíz y frijol y 2 semillas por hoyo de haba. En T3, la separación entre matas fue de 40 cm. Se sembraron 4 semillas por hoyo y posteriormente se hizo un aclareo dejando 3 plantas por mata. La fertilización empleada fue 70-60-00 aplicada en dos fracciones, una a la siembra y la segunda a la primera labor en todas las terrazas, salvo en T4 donde solamente se incorporaron 20 t/ha de estiércol semi-húmedo de bovino.

En 1995, se sembró la asociación maíz + haba, con un procedimiento similar al del año anterior, con la única diferencia de que la separación entre matas fue de 40 cm.

Seguimiento agronómico

En las áreas de muestreo se evaluaron los siguientes parámetros: número de matas y plantas, días hasta el 50 % de floración, altura de planta, peso de materia seca, peso de grano, numero de granos y biomasa aérea. Como humedad estándar se tomó el 14 %.

También se realizó un análisis comparativo entre los sistemas de cultivos asociados y el monocultivo, para lo cual se determinó el índice de eficiencia (IE) mediante la siguiente fórmula:

$$IE = A1/U1 + A2/U2 + \ldots$$

donde A corresponde al cultivo asociado y U al cultivo solo. Los valores de rendimiento que corresponden a los monocultivos fueron tomados de otras parcelas cultivadas a la par de las terrazas, en las mismas condiciones (Márquez *et al.*, 1995).

Cosecha

Las cosechas se efectuaron manualmente. La trilla de la cebada se realizó en parte con una trilladora manual y en parte con una trilladora mecánica (gracias a la ayuda del CIMMYT y del INIFAP).

Se determinaron dos tipos de rendimientos: por un lado, los relacionados con cada pequeña parcela donde se efectuaron los seguimientos agronómicos a lo largo del crecimiento del cultivo, y por otro, los correspondientes a cada parte A, M y B de cada terraza. De esta manera, se obtuvo el rendimiento estimado a partir de las pequeñas parcelas y el rendimiento real obtenido de forma directa. La comparación entre estos dos factores (rendimientos estimados y totales) permite medir el error experimental y la variabilidad de los resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1993

En 1993, la precipitación registrada fue de 421 mm, distribuida durante los meses de mayo a octubre que es la temporada agrícola (figura 1). Tal cantidad de agua corresponde a un año seco, pues normalmente en esta zona se registran volúmenes anuales de más de 700 mm. Durante mayo (época de siembra), apenas cayeron 17 mm por lo que no fue posible sembrar en ese mes. Después de la siembra, que se efectuó el 9 de junio, no hubo suficiente humedad en el terreno, lo que afectó la emergencia de las plantas y fue necesario efectuar una nueva siembra el 29 de junio cuando se normalizaron las condiciones climáticas. Entre los meses de julio y agosto, se presentó otro periodo de sequía en el cual durante 25 días cayeron apenas 35 mm y se registraron 12 días lluviosos.

Los rendimientos de cebada (cuadro 4) son más elevados en la T6 que en el testigo con suelo agrícola. En las demás terrazas (exceptuando la T2), los rendimientos son similares a los del testigo.

Con respecto a la veza (cuadro 5), es interesante anotar que el número de plantas no explica las diferencias de rendimientos. Ello se debe al tipo de crecimiento de esta leguminosa. Las tendencias en la producción de materia seca son las mismas que las

observadas en el caso de la cebada: T6 registra los mejores resultados, T2 y T7 los más bajos, mientras que en las demás terrazas, se obtienen resultados entre estos dos extremos.

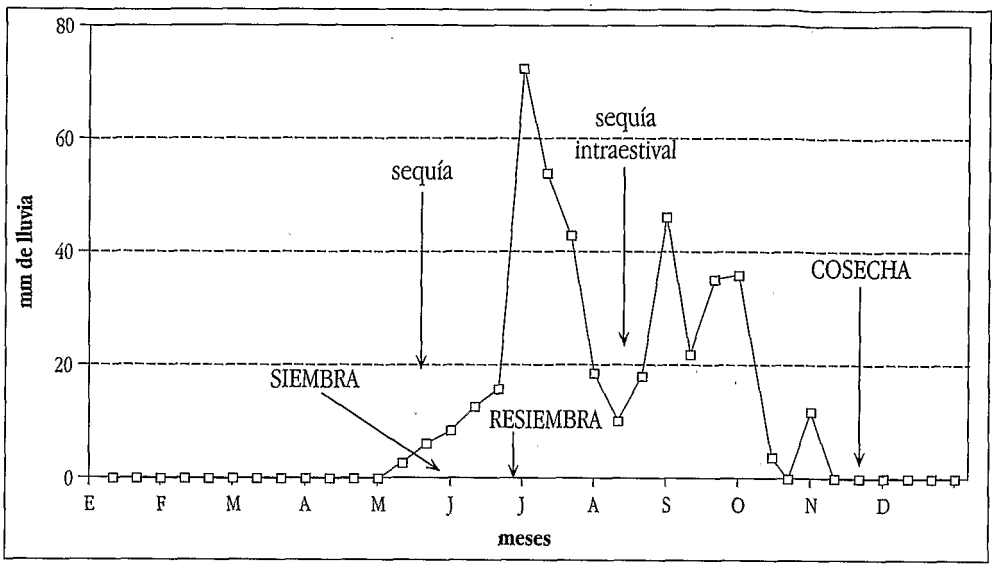


Figura 1 - Pluviometría durante 1993 (cada punto indica el cúmulo de 10 días)

Tratamiento	Ref.	Plantas/ m²	Tallos/ m²	Amac.	Días (50 % flor)	Altura (m)	Materia seca	Rend. estimado	Rend. real
							t/ha		
Roturación profunda + asoc.	T2	191	353	2,0	61	0,39	2,1	1,6	1,6
Roturación normal + monoc.	T3	245	429	1,8	58	0,53	3,5	2,7	2,0
Roturación normal + aso. + M.O.	T4	125	334	3,0	60	0,50	2,8	2,6	2,6
Roturación doble + asoc.	T5	132	275	2,3	58	0,57	2,9	2,5	2,2
Roturación normal + asoc.	T6	107	309	3,1	55	0,68	3,7	3,5	3,1
Testigo suelo	T7	152	305	2,1	57	0,45	2,3	2,2	2,5

Cuadro 4 - Resultados de la cebada obtenidos en las áreas de estudio en 1993

Tratamiento	Ref.	N° plantas/ m²	N° vainas/ m²	Materia seca (t/ha)	Rend. grano (t/ha)
Roturación profunda + asoc.	T2	31	83	0,2	0,15
Roturación normal + monoc.	T3	*	*	*	*
Roturación normal + aso. + M.O.	T4	30	187	0,5	0,39
Roturación doble + asoc.	T5	36	382	0,8	0,67
Roturación normal + asoc.	T6	42	399	1,1	0,88
Testigo suelo	T7	6	132	0,3	0,23

Cuadro 5 - Resultados de la veza obtenidos en las áreas de estudio en 1993

El cuadro 6 presenta los cuadrados medios y la significancia estadística a nivel de los tratamientos y los bloques, que permiten apreciar diferencias significativas entre las variables días hasta el 50 % de floración, altura de planta, rendimiento de grano y biomasa aérea. La comparación de medias según Tukey ($\alpha = 0,05$) reúne las diferencias estadísticas para la variable rendimiento de grano en dos grupos estadísticos: A incluye las terrazas T3, T4, T5, T6 y T7, y B solamente la T2.

Variables	Cuadrado medio	r^2	Coef. de variación	Nivel significativo tratamiento	Nivel significativo bloques	Media experimental
Cebada						
Días al 50% flor	139,24	0,84	4,98	0,007 **	0,001 **	83,50
Altura de planta (cm)	238,13	0,81	12,74	0,008 **	0,014 *	49,03
Peso paja (t/ha)	0,77	0,64	18,97	0,070 ns	0,170 ns	2,86
Rendimiento grano(t/ha)	0,84	0,70	20,19	0,025 *	0,270 ns	2,46
Biomasa áerea (t/ha)	2,77	0,67	19,05	0,050 *	0,200 ns	5,13
Peso 100 granos (g)	0,13	0,76	4,60	0,010 **	0,160 ns	3,62
Cebada + veza						
Biomasa áerea (t/ha)	6,15	0,79	17,54	0,005 **	0,110 ns	5,97

*: significativo, **: altamente significativo, ns: no significativo

Cuadro 6 - Cuadrados medios y significancia estadística para el conjunto de variables evaluadas

La relación existente entre los rendimientos reales y los estimados para los tratamientos es regular ($r^2 = 0,70$), mientras que entre los bloques es buena ($r^2 = 0,78$). No hay una tendencia clara de la producción de grano en función de la profundidad del suelo, ya que los valores más altos se presentan en cualquier bloque, aunque se registró una mayor frecuencia en las zonas bajas.

La variabilidad que se presenta al interior de cada terraza es la siguiente: T2 = 20 %, T3 = 29 %, T4 = 41 %, T5 = 20 %, T6 = 17 % y T7 = 20 %. T4 es la más heterogénea, lo que podría explicarse por la variación de la composición del estiércol así como por la dificultad de repartirlo de manera homogénea en la superficie de la terraza, debido a la estructura en bloques del estiércol. En cuanto a las variaciones en las demás terrazas, no se las puede atribuir en este caso a la variabilidad genética del cultivo, ya que este es seleccionado, sino a la variabilidad de las características de cada terraza, tales como pendientes, granulometría, compactación...

Estos resultados coinciden con los obtenidos en otros experimentos realizados por Márquez *et al.* (1992) en tepetates roturados t3 del estado de Tlaxcala, donde se obtuvieron coeficientes de variación del orden del 24 al 42 % en rendimientos de grano de trigo y haba.

Los rendimientos obtenidos a nivel general son buenos, pues la producción está por encima de la media nacional que es de 2 t/ha, pero es inferior a los datos de referencia de esta variedad (3,5 t/ha). Sin embargo, este último valor corresponde a ensayos en pequeñas parcelas experimentales. Pese a una producción excelente en la T6 y una bastante deficiente en la T2, no se pueden establecer claramente los efectos de los diferentes tratamientos en las terrazas.

1994

La precipitación en 1994 fue de 692,4 mm con lluvias constantes, en algunas ocasiones muy intensas; principalmente durante los meses de julio y agosto (figura 2). Durante la temporada agrícola, cayeron 630 mm, lo que corresponde a un año normal para esta zona.

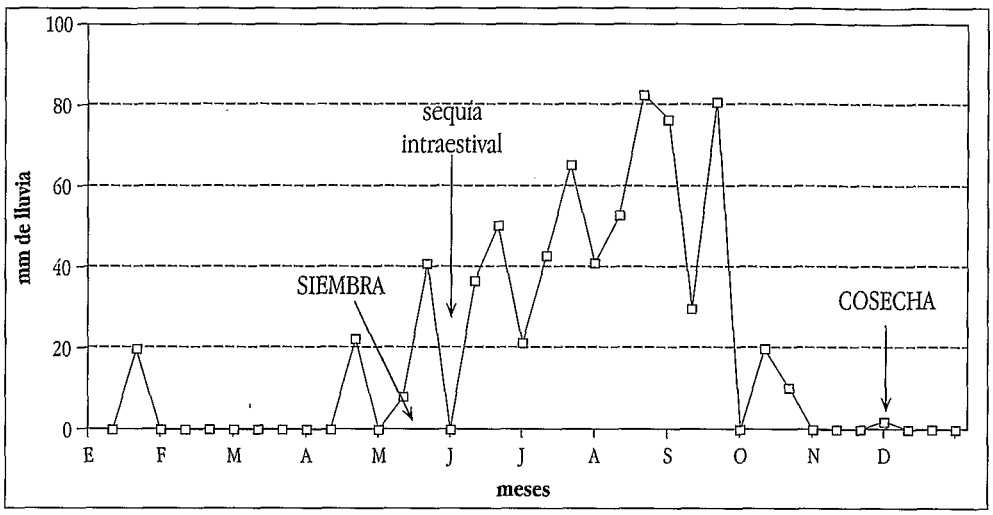


Figura 2 - Pluviometría durante 1994 (cada punto indica el cúmulo de 10 días)

La germinación de las plantas, que emergieron entre 10 a 15 días después de la siembra, fue relativamente homogénea. En cuanto al desarrollo de los cultivos, pese a que no se tomaron datos a la floración durante ese año, es notable que las plantas en T4 presentaron un desarrollo menor que en las demás terrazas (cuadro 7). En el caso de la T7, se pudo observar que en varias ocasiones, hubo áreas que fueron inundadas lo que provocó el pudrimiento de las plantas, en particular del frijol. Es importante señalar que una limpieza tardía de este cultivo provocó su enterramiento debajo de las adventicias. A

Ref.	Maíz	Frijol	Haba	Maíz	Frijol	Haba	Maíz	Frijol	Haba	Maíz	Frijol	Haba
	Plantas m^2			Altura m			Días al 50 % de flor			Materia seca (Paja) t/ha		
T2	2,3	1,2	3,4	1,8	-	1,32	-	-	-	3,10	0,13	1,93
T3	8,2	*	*	2,2	*	*	-	-	-	7,51	*	*
T4	2,9	1,5	2,9	1,3	-	1,36	-	-	-	1,18	0,08	1,21
T5	2,9	1,8	3,4	1,9	-	1,57	-	-	-	3,34	0,17	1,82
T6	2,9	1,2	4,2	1,9	-	1,49	-	-	-	3,61	0,12	1,98
T7	2,6	1,2	2,7	1,8	-	1,12	-	-	-	2,35	0,05	1,05

*: No existen por ser monocultivo. -: No se tomó este dato.

Cuadro 7 - Resultados obtenidos en las áreas de estudio en 1994

pesar del esfuerzo desplegado, las plantas fueron muy dañadas, lo que hace difícil formular conclusiones con respecto a este cultivo.

A nivel de las pequeñas parcelas, el comportamiento del haba es homogéneo, el de maíz regular y el de frijol sumamente heterogéneo debido al daño causado durante el manejo. La variabilidad al interior de cada terraza en relación a la producción total de grano es de: T2 = 16 %, T3 = 30 %, T4 = 52 %, T5 = 24 %, T6 = 26 % y T7 = 44 %. Como se puede observar, las más heterogéneas son T4 y T7, lo que se debe, en la primera, a una fertilización deficiente, y en la segunda, al exceso de humedad que provocó encharcamientos en algunas partes de la terraza y consecuentemente el pudrimiento de algunas plantas.

Los rendimientos de grano obtenidos en las pequeñas parcelas tienden, en la mayoría de los casos, a sobrestimar la producción en maíz y a subestimarla en frijol, mientras que en haba se aproximan más a la realidad (cuadro 8). La relación existente entre los valores estimados y los reales (r^2) es de 0,70 en maíz, 0,82 en frijol, 0,73 en haba y 0,80 para el rendimiento total.

Tratamiento	Ref.	Maíz		Frijol		Haba		Total	
		Real	Estimado	Real	Estimado	Real	Estimado	Real	Estimado
		t/ha							
Roturación + aso. + prof.	T2	0,86	1,06	0,13	0,13	1,21	1,28	2,20	2,47
Roturación + mono. + prof.	T3	1,88	1,74	*	*	*	*	1,88	1,74
Roturación + aso. + M.O.	T4	0,52	0,57	0,08	0,10	1,01	0,87	1,61	1,55
Roturació doble + asoc.	T5	0,81	1,29	0,17	0,19	1,19	1,32	2,17	2,80
Roturación + asoc.	T6	0,94	1,46	0,12	0,08	1,09	1,37	2,15	2,90
Testigo	T7	0,93	1,19	0,05	0,03	0,97	0,66	1,95	1,88
Proporción		1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	3/3	3/3

*: No existen por ser monocultivo

Cuadro 8 - Rendimiento de grano obtenido en 1994

En términos de rendimientos reales, en las asociaciones se obtiene una mayor producción en el cultivo de haba con alrededor de 1 t/ha, pero al comparar los tratamientos el comportamiento es similar. En maíz, salvo T4 que registra apenas media tonelada, también se tiene un comportamiento similar con rendimientos inferiores a 1 t/ha. Por último, el cultivo de frijol tuvo un rendimiento muy bajo con apenas unos cuantos kilos. Al compararse la producción total de grano por terraza, con excepción de T4 que registra media tonelada menos, las demás terrazas tienen un comportamiento similar. A nivel estadístico, no se encontraron diferencias significativas.

El rendimiento del cultivo de maíz solo (T3) se acerca a la media nacional (1,95 t/ha) —SARH, 1992— mientras que en asociación es un tanto menor a 1 t/ha. Sin embargo, en términos relativos, la producción es mayor en asociación ya que con una tercera parte del campo, se obtiene la mitad de la producción en monocultivo.

Se pueden hacer los mismos comentarios en el caso del haba: en 1/3 del terreno se logra obtener 1 t/ha, lo que está muy cerca de la media nacional que es de 1,33 t/ha.

En cuanto al frijol, su producción estuvo muy por debajo de la media nacional (0,9 t/ha) —SARH, 1992— con un rendimiento máximo de 0,17 t/ha. Eso se debe principalmente, como ya se señaló, a los daños por la limpieza tardía del cultivo.

1995

En 1995, la precipitación fue de 735 mm, con lluvias muy irregulares y periodos críticos de sequía durante la siembra y el crecimiento vegetativo (figura 3). Durante los meses de enero, marzo, abril, noviembre y diciembre, cayeron 190 mm fuera de la temporada agrícola. Por lo tanto, durante el ciclo agrícola se contó con menos de 545 mm, lo que corresponde a un año seco.

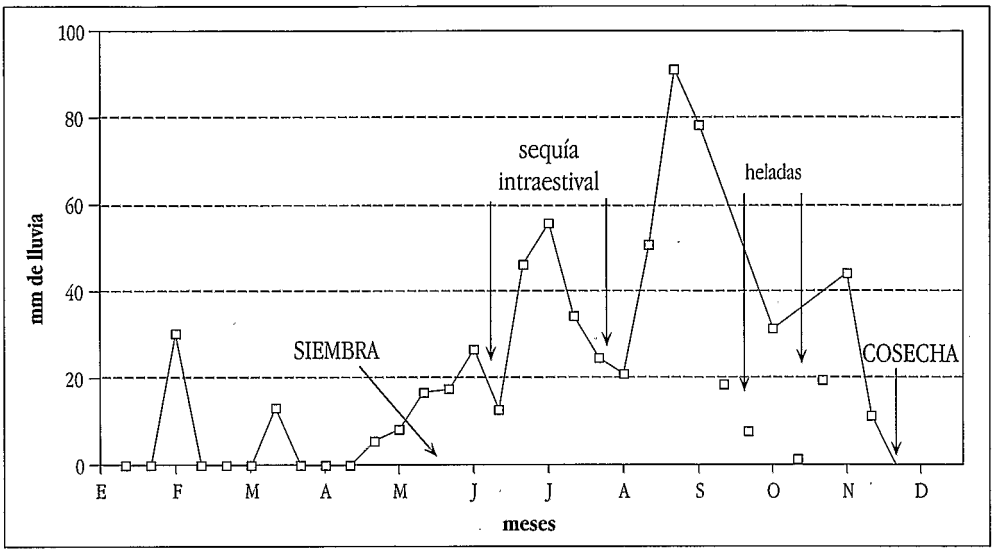


Figura 3 - Pluviometría durante 1995 (cada punto indica el cúmulo de 10 días)

Durante el mes de julio que normalmente es el más lluvioso junto con agosto, apenas se registraron 85 mm con 17 días de lluvia, de los cuales solamente 4 superaron los 10 a 15 mm. En septiembre, hubo otro período seco durante el cual solamente cayeron 13 mm en 7 días de lluvia.

También se presentaron 2 heladas a mediados de octubre, al momento en que el maíz se encontraba en su periodo de llenado de grano. Ello afectó la calidad del grano así como su peso, y por ende, los rendimientos.

Los resultados en 1995 muestran un desarrollo más rápido de los cultivos en T7, donde la emergencia de las plantas tuvo lugar 10 días después de la siembra, mientras que en las terrazas de tepetate, la emergencia ocurrió a los 25 días y de manera muy irregular. Este problema fue mayor en T4, donde las plantas tardaron 5 días más en emerger. En T7, el cultivo de maíz alcanzó el 50 % de floración masculina 74 días después de la siembra (cuadro 9), casi a la par de la floración femenina que llegó al 50 % solamente una semana más tarde. En las terrazas de tepetate, el 50 % de floración masculina ocurrió entre los 88 y 96 días, mientras que la floración femenina apenas se iniciaba en ese momento. La falta de coincidencia entre la floración masculina y femenina tuvo un impacto muy fuerte en términos de producción de granos. En haba, la floración se presentó casi a la par con la floración masculina en maíz.

Tratamiento	Ref.	Maíz Plantas/m²	Haba Plantas/m²	Maíz Altura (m)	Haba Altura (m)	Maíz Días al 50 % floración masc.	Maíz Días al 50 % floración femen.	Haba Días al 50 % floración	Maíz Paja (t/ha)	Haba Paja (t/ha)
Rotur. + asoc. + prof.	T2	2,7	1,4	1,86	1,16	90	105	92	3,1	1,1
Rotur. + mono. + prof.	T3	4,0	*	1,83	*	94	110	*	5,0	*
Rotur. + asoc. + M.O.	T4	3,3	1,4	1,76	1,23	96	111	93	2,7	1,2
Rotur. doble + asoc.	T5	4,2	1,4	1,96	1,30	89	105	92	3,4	1,3
Rotur. + asoc.	T6	3,7	1,4	2,06	1,22	87	103	91	2,6	1,4
Rotur. + asoc. sin paja	T6b	4,1	1,3	2,03	1,35	87	102	90	2,7	1,2
Testigo	T7	3,9	1,3	1,86	1,00	74	81	95	3,1	0,5

Cuadro 9 - Resultados obtenidos en las áreas de estudio en 1995

La relación existente entre los rendimientos estimados y los medidos es excelente ya que para el maíz se obtiene un r^2 de 0,88 y para el haba de 0,97. La variabilidad que se presenta al interior de cada terraza es la siguiente: T2 = 19 %, T3 = 27 %, T4 = 23 %, T5 = 26 %, T6 = 21 %, T6b = 15 % y T7 = 48 %. El importante valor en el caso de la T7 se debe a que las zonas A y B tuvieron rendimientos bajos, mientras la zona M presentó un rendimiento elevado. En cuanto a la variabilidad dentro de las demás terrazas, se sitúa en el mismo rango que en los años anteriores.

La comparación de medias según Tukey (α = 0,05) reúne las diferencias estadísticas para la variable rendimiento de grano en 3 grupos estadísticos: A incluye la terraza T7 como mejor tratamiento, B incluye T2, T5, T6 y T6b, y por último C incluye T4 como el tratamiento menos productivo. En el cuadro 10 se observa el nivel de significancia para las principales variables.

Variables	Cuadrado medio	r^2	Coef. de variación	Nivel significativo tratamiento	Nivel significativo bloques	Media experimental
Maíz						
N° plantas	0,88	0,68	14,6	0,05 *	0,13 ns	3,64
Altura de planta (cm)	0,33	0,68	5,33	0,04 ns	0,24 ns	1,93
Días al 50 % flor	126,15	0,90	3,48	0,00 **	0,02 **	87,05
Rendimiento grano (t/ha)	0,92	0,90	22,19	0,00 **	0,03 **	1,19
Peso paja (t/ha)	0,79	0,31	37,89	0,94 ns	0,24 ns	2,96
Haba						
N° plantas	4,01	0,85	13,27	0,00**	0,02 **	5,21
Altura de planta (cm)	0,64	0,93	4,58	0,00 **	0,00 **	1,24
Días al 50 % flor	13,26	0,65	2,41	0,14 ns	0,05 *	92,17
Rendimiento grano (t/ha)	0,04	0,89	13,3	0,00 **	0,32 ns	0,46
Peso paja (t/ha)	0,24	0,82	16,92	0,00 **	0,04 *	1,20
Maíz + haba						
Rendimiento grano (t/ha)	0,7	0,85	17,69	0,00 **	0,02 **	1,60

Cuadro 10 - Cuadrados medios y significancia estadística para el conjunto de variables evaluadas

Los rendimientos de grano en este año contrastan un tanto con los del año anterior, ya que el cultivo de maíz alcanzó un mayor rendimiento que el de haba (cuadro 11). En esta ocasión la terraza de referencia de suelo (T7) tuvo el mayor rendimiento, con el doble de producción que las demás. Al comparar los tratamientos de tepetate en maíz asociado (T2, T4, T5, T6 y T6b), se tienen rendimientos de grano muy similares que fluctúan alrededor de 1 t/ha, salvo en T4 que corresponde al tratamiento con materia orgánica y que rindió aproximadamente 40 % menos que los demás tratamientos de tepetate. En la T3 con monocultivo, el rendimiento de grano apenas superó en un 15 % a las otras parcelas de tepetate, pero representó un 34 % menos que la media nacional (1,95 t/ha) —SARH, 1992—. Esto muestra la ventaja de la asociación con relación al monocultivo.

Tratamiento	Ref.	Maíz		Haba		Total	
		Real	Estimado	Real	Estimado	Real	Estimado
		t/ha					
Roturación + aso. + prof.	T2	1,14	0,84	0,58	0,60	1,72	1,44
Roturación + mono. + prof.	T3	1,29	1,40	*	*	1,29	1,40
Roturación + aso. + M.O.	T4	0,61	0,82	0,44	0,48	1,05	1,30
Roturació doble + asoc.	T5	1,06	1,20	0,51	0,50	1,57	1,70
Roturación + asoc.	T6	0,97	0,72	0,44	0,41	1,41	1,13
Roturación + asoc. sin paja	T6 b	1,11	0,94	0,60	0,60	1,71	1,50
Testigo	T7	2,56	2,67	0,26	0,24	2,72	2,91
Proporción		1/2	1/2	1/2	1/2	1	1

*: No existen por ser monocultivo

Cuadro 11 - Resultados obtenidos en 1995

En el cultivo de haba, en términos absolutos, se obtuvo un 60 % menos que la media nacional (1,33 t/ha) —SARH, 1992—. Sin embargo, se trata de una proporción del 50 % de planta, lo que implica que en términos relativos, la producción de haba fue similar a los rendimientos nacionales. En T7, que presentó el menor rendimiento de haba, se detectaron problemas de pudrimiento en la base del tallo, así como un ataque de pulgón y una enfermedad llamada «mancha de chocolate». En las terrazas de tepetate, se produjeron periodos críticos de sequía durante el desarrollo del cultivo de haba, el mismo que presentó consecuentemente síntomas de deshidratación severa.

Los bajos rendimientos en T4 se debieron a un mal manejo. Se puede ver que los rendimientos son, en cultivos asociados, globalmente superiores a los de un monocultivo. Es difícil apreciar el efecto de tal o cual tratamiento, ya que los resultados son bastante similares.

Índice de eficiencia

Los resultados demuestran que con siembras en asociación se puede obtener mayor rendimiento de grano que en monocultivo (cuadro 12). Frecuentemente, la eficiencia supera en un 0,5 al índice correspondiente del monocultivo. En el peor de los casos, se logra obtener el mismo valor que en el monocultivo.

Salvo en el caso de T4 donde se presentaron a menudo problemas de manejo, esta síntesis muestra la gran variabilidad de resultados entre las terrazas de un año a otro. Por

ejemplo, mientras en 1993, T2 registrabaja el menor rendimiento, en 1994 presentaba el mayor. Se puede considerar entonces que no hay realmente diferencias entre los diferentes tratamientos estudiados.

Ref.	1993			1994				1995		
	Cebada	Veza	C+V	Maíz	Frijol	Haba	M+F+H	Maíz	Haba	M+H
T2	0,80	0,13	0,93	0,46	0,13	0,85	**1,44**	0,88	0,76	1,64
T3	1,00	*	1,00	1,00	*	*	1,00	1,00	*	1,00
T4	1,30	0,37	1,67	0,28	0,08	0,71	1,07	0,47	0,57	1,05
T5	1,10	0,61	1,71	0,43	0,17	0,84	**1,44**	0,82	0,67	1,49
T6	1,55	0,80	**2,35**	0,50	0,12	0,77	1,39	0,75	0,58	1,33
T6b								0,87	0,77	1,64
T7	0,81	0,21	1,02	0,49	0,05	0,68	1,23	1,99	0,34	**2,33**

* No existen por ser monocultivo

Cuadro 12 - Índice de eficiencia del rendimiento de los cultivos asociados vs. monocultivo

CONCLUSIONES

El tepetate es productivo desde su primer año de incorporación agrícola al cultivarse cebada asociada con veza. En efecto, se obtuvieron rendimientos superiores a la media nacional, aun durante un año seco con 421 mm de lluvias. Sin embargo es recomendable utilizar otra leguminosa menos agresiva que la veza ya que esta compite demasiado con la cebada. Una buena opción es el Medicago polimorfa (carretilla) ya que en otros ensayos realizados paralelamente a esta experiencia, mostró un comportamiento muy satisfactorio.

En el segundo año de cultivo, el rendimiento de maíz es regular y el de haba es excelente. No se pueden considerar los resultados del frijol, ya que los bajos rendimientos tienen su explicación en un manejo inadecuado y no en una repuesta negativa del tepetate cultivado.

En el tercer año, el rendimiento del maíz es excelente y el de haba regular.

Aunque podemos considerar una variación promedio del 20 % entre los valores de rendimiento en grano obtenidos en parcelas de 1 m^2 de una misma terraza, esta variación puede fluctuar entre el 15 y el 30 % en terrazas de un mismo tipo de suelo (T2, T3, T5 y T6). La variabilidad genética de los cultivos puede explicar en una pequeña parte estas fluctuaciones, pero ellas se deben más que todo a las variaciones de factores como pendiente, granulometría, compactación, etc. dentro de la misma terraza. Estos porcentajes de variación en cada terraza son del mismo orden que aquellos entre las terrazas. Además, las tendencias no siempre siguen el mismo patrón. Por ello, es bastante difícil determinar la influencia de un factor con relación a otro.

Así, retomando las variables de cada terraza y su influencia en los rendimientos, se observa que en lo que se refiere a la profundidad de roturación, no hay diferencias significativas. Pese a que una mayor profundidad de roturación proporciona un mayor reservorio de agua, las alturas y la distribución en el tiempo de las precipitaciones así como la formación rápida de costras en la superficie del suelo que limitan la infiltración, hacen que tal reservorio casi nunca se llene. En la medida de que una roturación a gran profundidad

cuesta un 30 % más que una normal y que no se observan grandes diferencias en la producción agrícola, se recomienda roturar a 40-45 cm.

En cuanto a los cultivos, los sistemas asociados de gramíneas con leguminosas son mucho más productivos que los sembrados en monocultivo.

El papel del estiércol no es muy claro ya que su acción es muy tardía y no alcanza a satisfacer plenamente las necesidades nutrimentales de los cultivos. Por ello, es necesaria la aplicación de fertilizantes minerales por lo menos al inicio del ciclo. Igualmente, las dosis de estiércol aplicadas son insuficientes como para poder suplir los requerimientos nutritivos de las plantas, en especial del maíz que es muy exigente. Sin embargo, aumentar las dosis de estiércol implica no solamente un aumento en los costos de transporte y preparación en el campo, sino la imposibilidad a abastecer a todos los agricultores debido a las cantidades que superan en mucho la producción.

No se observan diferencias en el rendimiento de un año a otro en el caso de la comparación entre incorporación o no de rastrojos al suelo. Ello se debe probablemente al hecho de que los cambios en el suelo obedecen a lentos procesos.

Asimismo, es difícil evidenciar el papel de la preparación de la terraza (pendiente, tamaño de los agregados) en los rendimientos.

En realidad, los factores climáticos tales como la altura de precipitación, y sobre todo, la distribución de las lluvias a lo largo del periodo de cultivo, así como las heladas (aunque de manera secundaria en relación con la pluviometría) son finalmente los factores que más influyen en el crecimiento de las plantas, en mucho mayor medida que aquellos relacionados con la preparación del tepetate recién roturado y de las terrazas. El caso de la terraza con suelo de referencia (T7) es ejemplar desde este punto de vista: presenta uno de los peores resultados en 1993 y el mejor en 1995. Obviamente, estas observaciones en cuanto al clima son válidas en la medida en que se respeten ciertos criterios en el manejo del cultivo, en especial una dosis de fertilización adecuada y bien distribuida en el tiempo.

Estos trabajos muestran que no es necesario roturar a una profundidad mayor a 40 cm, pero que sí es importante respetar dicho valor. El tepetate bien trabajado es productivo desde el primer año siguiendo las siguientes recomendaciones: 1) sembrar durante el primer año la asociación cebada + Medicago; 2) durante los dos o tres años siguientes, la asociación maíz + haba y eventualmente frijol; 3) aplicar dosis de fertilización de 100-80-00, de ser posible en tres fracciones: al momento de la siembra, al primer laboreo y al 50 % de floración; 4) incorporar los rastrojos de la cosechas para limitar el encostramiento (proceso que ocurre rápidamente con estos tepetates) que disminuye la infiltración y aumenta el escurrimiento y la erosión; 5) en caso de utilizarse estiércol, aplicar, al momento de su incorporación al suelo, una dosis complementaria de fertilizantes minerales.

Referencias bibliográficas

MÁRQUEZ R., A.; ZEBROWSKI, C.; NAVARRO, H., 1992: Alternativas agronómicas para la recuperación de tepetates, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 465-473.

MÁRQUEZ *et al.*, 1995: Rehabilitación agrícola de un tepetate café (t3). Caso II: Resultados de ensayos agronómicos en 1993 y 1994, en *XXVI Congreso de la Ciencia del Suelo.*

NAVARRO, H.; PRAT, C., 1996: Habilitación agrícola de los tepetates de los valles de México y de Tlaxcala, en *El campo mexicano: una modernización a marchas forzadas*, P. Bovin (editor), CEMCA-ORSTOM, México, p 253-291.

NAVARRO, H.; ZEBROWSKI, C., 1992: Análisis agronómico comparativo en tepetates, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 451-459.

PEÑA, D.; ZEBROWSKI, C., 1992: *Estudio de los suelos volcánicos endurecidos (tepetates) de las cuencas de México y Tlaxcala (México). Informe del mapa morfopedológico de la vertiente occidental de la Sierra Nevada*, anexo al informe final, Contrato CCE-ORSTOM N° TS2-0212, 101 p.

SARH, 1992: *Anuario estadístico de la producción agrícola de los Estados Unidos Mexicanos.*

ZEBROWSKI, C.; PRAT, C.; ETCHEVERS, J.; ARIAS, H.; MIRANDA, M.E., 1992: *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, 572 p.

Evaluación del cultivo de cebada (*Hordeum vulgare*) bajo dos sistemas de siembra en terrazas y en surcos a nivel

Rúsvel R. Ríos V.

Abstract

An evaluation of barley (Hordeum vulgare) *crops in terraces and levelled furrows under two sowing systems was carried in the Angamarquillo Pasaloma community, San Bartolomé de Pinlho parish, Ambato canton, province of Tungurahua (Ecuador). The soil was classified as a Durustoll. The slope of the field was very steep. It was planned to compare the efficiency of the two soil conservation techniques with no soil conservation (control) and the two sowing sytems, hand trowing (traditional) and in row (alternative) in the barley crop. A split plot experimental design in a 3 x 2 factorial arrangement was applied, in three replications.*

It was found that in the terraces the vegetative cycle of the barley was reduced in 11 days compared to the levelled furrows sowing, and in 29 days compared to the control ($P < 0,001$). In fact, the germination was significantly more precocious in the terraces.

In the same way, the plants sowed in the terraces were more vigorous, of better color, taller and with a minor incidence of plagues and diseases than those sowed in the levelled furrows and in the control.

The yield was significantly superior in the terraces (2.85 t/ha) compared to the production obtained in the levelled furrows (2.11 t/ha) and in the control (1.45 t/ha). There were no statistical differences between the sowing systems.

Keywords: *Ecuador* - Cangahua - *Conservation System*

INTRODUCCIÓN

El origen e inicio de la erosión de los suelos en el Ecuador data de la época Incásica, continuando el fenómeno hasta nuestros días. Entre los factores que determinaron el inicio de la degradación y deterioro de los suelos y la reducción de la superficie cultivable fue indudablemente la presencia de los conquistadores quienes introdujeron nuevas herramientas, costumbres de labranza y especies domésticas para ser utilizadas como animales de tracción en la preparación del suelo con fines agrícolas (Guevara, 1983).

La preparación de los suelos con arado de tracción animal hizo que la capa arable comience a sufrir una rápida remoción y ya en el siglo XVIII se reporta el afloramiento de cangahua, que es el material parental de la mayor parte de suelos de la región interandina, como producto del uso intensivo y del mal manejo de los suelos (Suárez, 1983).

En esa época, el clima fue un factor decisivo, pues se sabe que entre los años 1693 y 1723 se produjo la sequía más larga que se conoce y posteriormente sobrevinieron abundantes precipitaciones, lo que hizo que los suelos fueran arrastrados debido a la ausencia de vegetación por la sequía y sobrepastoreo, condiciones propicias para que se inicie la erosión (Guevara, 1983).

El hombre se ha covertido en el principal factor de destrucción. A través de la historia, ha dependido para subsistir de los recursos naturales en general. Desgraciadamente, por el uso indiscriminado e inadecuado de los mismos, los diferentes ecosistemas están desapareciendo, en algunos casos en forma acelerada (Ferran, 1959).

El trabajo presentado pretende demostrar que al realizar obras mecánicas de conservación de suelos como son las terrazas y los surcos en contorno, se puede incrementar la producción, mejorar y recuperar la fertilidad y lo más importante, detener la erosión.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio

El sitio donde se realizó el experimento está ubicado a 3.190 m.s.n.m., en la comunidad de Angamarquillo Pasaloma, parroquia de San Bartolomé de Pinllo, cantón Ambato, provincia de Tungurahua.

En esta región, de acuerdo a la clasificación de Thornthwait, el clima es de tipo isomésico húmedo.

Según el sistema de clasificación de Holdrige, basado en la realidad de la fisiología vegetal y que toma en cuenta la evapotranspiración real y potencial, corresponde a una zona de bosque húmedo montano.

La temperatura media anual es de 12 °C, la precipitación total anual de 500 mm, la humedad media relativa del 80 % y la nubosidad (en octavos) de 7/8.

Según los mapas elaborados por PRONAREG-ORSTOM (1974-1980), los suelos de la zona son Durustolls y Durandepts. Todos presentan un horizonte duro (duripán) a poca profundidad.

En pendientes muy fuertes, con alto grado de erosión, este duripán se encuentra a muy poca profundidad y a veces aflora a la superficie.

El duripán es denominado cangahua, término que se conoce en el vocabulario quichua-español desde la colonia. En 1738, Jorge Juan y Antonio de Ulloa, de la Misión Geodésica Francesa, hablan, refiriéndose a la cangahua, de la tierra con que hacen los adobes y los unen después.

El término «cangahua» fue definido geográficamente por primera vez por Teodoro Wolf en 1892 como una toba fina producto de la sucesiva descomposición de las andesitas, lavas y tobas, cuyas partículas finas fueron transportadas por el agua y especialmente por el viento. Los últimos trabajos (Vera y López, 1992; Hall y Mothes, 1997; Quantin y Zebrowski, 1997) muestran que la cangahua proviene esencialmente de caídas de proyecciones volcánicas.

En la región del experimento, la cangahua presenta un pH alcalino, su textura es franca, variando a arcillosa. Tiene varias tonalidades de colores, en condiciones secas es café 10 YR 8/3 y 10 YR 4/3, y en condiciones húmedas entre amarillo y café oscuro 10 YR 3/4. Los factores que influyen en la gama de colores gris-negra son el contenido de materia orgánica y la presencia de óxidos de hierro.

El trabajo se realizó en un terreno con pendiente muy fuerte, mayor al 50 por ciento.

Diseño experimental

El cultivo fue la cebada con dos sistemas de siembra (uno al voleo y el otro al chorro continuo). Se utilizó el diseño experimental de parcelas divididas en arreglo factorial 3 x 2 con cuatro repeticiones.

Se emplearon, por hectárea, 222,2 kg de 12-36-12 como fuente de nitrógeno, fósforo y potasio. Se procedió además a una aplicación de urea de 72,40 kg/ha a los 53 días de la siembra, aplicándola al voleo.

Se probaron, en comparación con un testigo, dos prácticas de conservación: terrazas en banco y surcos a niveles.

Trazado y construcción de terrazas en banco

Previo al trazado de las terrazas, se hizo un recorrido por el terreno para verificar si en la parte superior del lote existía una entrada de agua. Durante dicho recorrido, se decidió desviar el exceso de agua de las terrazas.

El ancho de la terraza y la altura del talud dependen de la pendiente (cuadro 1). Siendo esta del 57 por ciento en el experimento, se decidió construir terrazas de banco con una mesa de dos metros de ancho y un talud de 1,80 m de alto y 0,90 m de ancho.

Pendiente (%)	Altura del talud (m)	Ancho de la mesa (m)
12	0,60	6,5
15	0,65	4,5
18	0,70	3,7
22	0,75	3,2
25	0,80	2,5
28	0,90	2,2
35	1,00	2,3
40	1,20	2,2
45	1,70	2,1
50	1,80	2,0

Cuadro 1
Ancho de la mesa y altura del talud en la terraza, de acuerdo a la pendiente

Una vez trazadas las dos líneas a 2,90 m de distancia, se procedió a realizar el corte desde la mitad del espacio entre líneas hacia arriba hasta la primera línea; la tierra del corte se colocó de la mitad hacia abajo hasta la segunda línea. Se cortó en el borde interno hasta alcanzar una altura de talud de 1,80 m, lo que permitió extraer tierra para tener una mesa de 2,0 m de ancho. Para la protección del talud se utilizó pasto *ray grass* y pasto azul.

Trazado y construcción de surcos a nivel

Se calculó primeramente la pendiente máxima del lote, que en este caso fue del 65 por ciento, y desde allí se inició el trazado de los surcos-guía con pendiente nula para aprovechar al máximo el agua de lluvia. Como la pendiente era muy fuerte, los surcos se trazaron a una distancia de un metro entre sí, obteniéndose dos surcos por parcela principal. En la parte más alta del lote, se construyó una zanja o acequia de 0,80 m de ancho por 0,40 m de profundidad, con una pendiente a lo largo de la misma del 1,5 por ciento. La profundidad del surco fue de 0,20 m.

RESULTADOS

Crecimiento del cultivo

Se pudo observar que la cebada se desarrolló mejor en las terrazas de banco con el sistema de siembra al voleo, creciendo vigorosa, con un mayor número de macollos por planta, una espiga de longitud de 6,05 cm y mayor número de granos gruesos por espiga. El cultivo no presentó problemas fitosanitarios. Finalmente, se obtuvo una alta producción (2.818,51 kg/ha). La variable vigor de las plantas se determinó 30, 60, 90 y 120 días después de la siembra (cuadro 2), con base en una apreciación visual y según una escala de valores del 1 al 5.

Tratamiento*	Tsv				Tsch				Ssv				Ssch				tsv				tsch			
Vigor a los (días)	30	60	90	120	30	60	90	120	30	60	90	120	30	60	90	120	30	60	90	120	30	60	90	120
Repetición 1	5	4	5	5	5	4	4	5	3	3	1	2	3	3	1	2	3	3	2	1	2	2	4	3
2	4	5	5	5	4	5	5	5	3	4	3	3	4	3	1	2	3	2	2	2	2	1	3	2
3	4	5	5	5	5	4	4	5	4	3	2	2	4	3	2	2	4	3	3	3	1	2	2	2
4	4	4	5	4	4	4	4	5	4	4	3	3	4	3	2	2	3	2	3	2	1	2	2	1

*: T = terraza; S = surcos a nivel; sv = siembra al voleo; sch = siembra a chorro continuo

ESCALA DE VALOR

Vigor	*Clasificación*	*Detalle*
ninguno	1	plantas débiles
regular	2	el 25 % presenta buen aspecto
mediano	3	el 50 % presenta buen aspecto
bueno	4	el 75 % presenta buen aspecto
muy bueno	5	el 100 % presenta buen aspecto

Cuadro 2 - Valores de vigor de las plantas según los tratamientos y sistemas de siembra

Costos de construcción

Los costos son cuatro veces mayores en el caso de las terrazas que en el de los surcos a niveles, y estos últimos, a su vez, son tres veces superiores a los del testigo (cuadro 3).

Ingreso en sucres por obra de conservación y por hectárea

No hay una diferencia significativa de rendimiento entre los diferentes sistemas de siembra (al voleo y a chorro continuo) de tal manera que entre los diferentes tratamientos, los ingresos son parecidos.

Los mayores rendimientos e ingresos se obtuvieron en las terrazas. Les siguieron aquellos obtenidos en los surcos a niveles y finalmente en el testigo (cuadro 4)

Costo-beneficio

Para los diferentes sistemas de conservación, se hizo el cálculo del beneficio tomando en cuenta los mejores rendimientos obtenidos según el sistema de siembra (cuadro 5).

El valor del beneficio es negativo en el caso de la obra física de terrazas de banco porque el costo de construcción resulta muy elevado, pues se utiliza especialmente más

Práctica	Cantidad	Valor unitario (S/.)	Costo total (S/.)
Terrazas			
Jornales	446	15.000	6'690.000
Protección de talud (jormal)	25	15.000	375.000
Herramientas e insumos		600.000	600.000
Total			7'665.000
Surcos			
Jornales	89	15.000	1'335.000
Herramientas e insumos		220.000	220.000
Total			1'555.000
Testigo			
Jornales	26	15.000	390.000
Herramientas e insumos		100.000	100.000
Total			490.000

Cuadro 3
Costos por hectárea en sucres

Tratamiento	sistema de siembra	Rendimiento (kg/ha)	Valor unitario (sucres)	Ingreso total (sucres)
Terrazas	al voleo	2.818	1.576	4'443.099
	chorro continuo	2.367	1.576	3'730.392
Surcos a nivel	al voleo	1.759	1.576	2'772.184
	chorro continuo	1.885	1.576	2'971.971
Testigo	al voleo	1.330	1.576	2'097.084
	chorro continuo	1.304	1.576	2'055.104

Cuadro 4
Rendimientos e ingresos

Obras	Egresos (S/.)	Ingresos (S/.)	Beneficio (S/.)
Terrazas	7'665.000	4'443.099	-3'220.901
Surcos	1'555.000	2'971.971	1'416.971
Testigo	490.000	2'097.084	1'607.084

Cuadro 5- Costo / beneficio

mano de obra. Sin embargo, la alta producción que se alcanza en la primera cosecha cubre el 57,9 % del costo total, es decir que con 2 cosechas en un tiempo aproximado de un año se financia el costo total por hectárea de la construcción de las terrazas.

Es importante considerar además que, con un mantenimiento adecuado, la obra física de las terrazas de banco perdura por mucho tiempo.

CONCLUSIÓN

- Construir terrazas de banco en pendientes mayores al 20 por ciento permite reducir la velocidad de escorrentía de las aguas de lluvia y almacenar humedad para cualquier cultivo.
- Si la cangahua es muy dura y la mano de obra escasa, se pueden construir surcos en contorno, para que se siga absorbiendo humedad y la cangahua vaya suavizándose. Después de la primera cosecha se van uniendo los surcos y formándose terrazas.
- Aunque los surcos en contorno no son tan eficientes para el control de la erosión como las terrazas de banco, la producción correspondiente es mayor que el promedio anual nacional.
- La construcción de surcos a nivel en pendientes muy fuertes debe ser complementaria a otro tipo de prácticas de conservación de suelos como zanjas de desviación, borde de campo, barreras vivas con pasto y arbustos.

Referencias bibliográficas

FERRÁN LAMICHI, J., 1959: *Cebada, variedades cerveceras. Manual de cultivo. Mejora de cebada y fabricación de cerveza*, Aedos, Barcelona, 246 p.

GUEVARA, O., 1983: Perspectivas del Programa Nacional de Conservación de Suelos, en *Memorias del seminario «Políticas sobre conservación de recursos naturales renovables, en particular del recurso suelo»*, MAG, Quito, Ecuador, p. 2-10

HALL, M.; MOTHES, P., 1997: El origen y la edad de la cangahua superior, valle de Tumbaco, Ecuador. En este volumen.

QUANTIN, P.; ZEBROWSKI, C., 1997: Caractérisation et formation de la cangahua en Équateur, en este volumen.

SUÁREZ, E., 1983: La institucionalización de la conservación de los recursos naturales renovables en el Ecuador, en *Memorias del seminario «Políticas sobre conservación de recursos naturales renovables, en particular del recurso suelo»*, MAG, Quito, Ecuador, p. 1-7.

VERA, R.; LÓPEZ, R., 1992: Tipología de la cangahua, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 113-119.

Maíz bajo labranza reducida en un suelo volcánico endurecido (tepetate t3) rehabilitado en Tlaxcala, México

Ulrich Fechter-Escamilla, Francisco Tehózol, Primo Muñoz

Abstract

In Tlaxcala, México, there is a great demand for rehabilitation of degraded indurated volcanic ash soils (tepetates *t3). Conservation tillage in maize has been proven since many years to be able to reduce erosion, which is a severe problem in the rehabilitated material. In this study minimum tillage with and without cover crop has been tested on a rehabilitated* tepetate *of the t3 type. Because of lodging and water stress, minimum tillage could not reach the expected yield. The introduction of minimum tillage into the management of rehabilitated* tepetates *has to be accompanied by the use of lodging-resistant varieties and a higher water holding capacity of the rehabilitated horizon (more than 50 cm deep).*

Keywords: *Indurated Volcanic Ash Soils - Mexico - Reduced Tillage - Maize - Yield Response*

INTRODUCCIÓN

En México, el desarrollo y la aplicación de métodos de labranza conservacionistas en el cultivo de maíz han suscitado desde hace muchos años gran interés a nivel tanto de la investigación como de la extensión agraria. Esto se debe a dos razones principales: el maíz sigue siendo un sustento básico para las familias en las zonas rurales y al mismo tiempo es uno de los cultivos que más favorece la erosión hídrica. Por ello, requiere una atención especial con miras a reducir la erosión (CIMMYT, 1991). Esta necesidad es todavía mayor en terrenos de tepetate, que se han recuperado con un gran esfuerzo económico, debido al uso de maquinaria pesada. Los tepetates son suelos volcánicos que ocupan grandes extensiones de tierra en el altiplano de México y por su endurecimiento superficial no son o dejan de ser aptos para la agricultura. Con ayuda de maquinaria pesada se pueden convertir de nuevo en suelos fértiles y valiosos para los agricultores. Este tipo de trabajo se realiza en el estado de Tlaxcala desde hace más de 20 años con apoyo del gobierno federal y estatal (Calva, 1992).

Los rendimientos en estos terrenos recuperados han sido comparables o superiores a los de otros suelos de la región, lo que incita a una mayor integración de este tipo de suelo a la producción agrícola (Márquez *et al.*, 1992; Werner, 1992). Sin embargo, los resultados de

los estudios de la erosión en terrenos recuperados llevan a cuestionar la sustentabilidad de estas inversiones, debido a las altas tasas de erosión bajo el régimen pluvial muy erosivo prevaleciente en estas zonas (Baumann *et al.*, 1992)

Se han realizado varios estudios sobre el funcionamiento de sistemas económicos familiares que integran al tepetate como recurso. Se ha investigado además en detalle la historia de la degradación de los tepetates (Aliphat y Werner, 1994; Romero, 1992). Se han descrito nuevas tentativas de recuperación de tepetate, las mismas que han sido realizado en estas zonas para mejorar su situación económica (ver contribuciones al simposio «*Indurated Volcanic Ash Soils, Uses and Management*» del *15th World Congress of Soil Science* en 1994, Acapulco, México).

Tratando de completar estos esfuerzos, la Universidad Autónoma de Tlaxcala y la Universidad Justus-Liebig de Giessen realizan estudios del proceso erosivo en tepetates rehabilitados bajo uso agrícola. Parte de estos trabajos es la evaluación de la factibilidad de métodos de conservación en maíz en este tipo de suelo.

El objetivo del presente estudio es evaluar y analizar la respuesta de maíz en un tepetate rehabilitado a dos formas de labranza reducida (con y sin cobertura vegetal).

MATERIAL Y MÉTODOS

Con el fin de estudiar el comportamiento del cultivo de maíz bajo labranza reducida en un tepetate rehabilitado (t3, 6 años después de su rehabilitación), se diseñó en tres terrazas de campesinos (1.200, 1.200 y 1.500 m^2) —utilizadas paralelamente para medir la erosión (Fechter-Escamilla *et al.*, 1997)—, un ensayo mono-factorial con cinco repeticiones (bloques al azar de 10,4 m^2). A cada terraza se asignó un método diferente de labranza. En el siguiente cuadro se describen los tipos de manejo del suelo a compararse:

tratamiento	clave	labores	fertilización y herbicidas
labranza convencional	LT	aradura, rastra de discos, surcado, siembra con pala, dos aporques	160 kg. N/ha (NH_4SO_4) 90 kg. P/ha (Superfosfato-Triple)
labranza reducida con cobertura vegetal *Trifolium repens, ssp. enano*	LRccv	aradura, siembra de trébol al voleo, siembra de maíz con coa	160 kg. N/ha (NH_4SO_4) 90 kg. P/ha (Superfosfato-Triple) Dicamba 0.3 kg i.a./ha
labranza reducida sin cobertura vegetal	LRscv	aradura, siembra de maíz con coa	160 kg. N/ha (NH_4SO_4) 90 kg. P/ha (Superfosfato-Triple) Atrazin 2 kg i.a./ha

Cuadro 1 - Descripción de los tratamientos

El suelo es un *Anthrosol* originado de ceniza volcánica endurecida, toba 3, con las siguientes características:
pH: 7,5 (H_2O); $CaCO_3$: 1,6 % ; CIC: 15,3 me/100 g; Carbono-total: 0,16 %; P-Olsen: 1,3 ppm.

En las terrazas, el horizonte rehabilitado tiene una profundidad que oscila entre 30 y 70 cm y se encuentra sobre un sub-horizonte endurecido. El clima característico es semiárido con 5 meses húmedos como máximo y una temperatura promedio anual de 14 °C.

La variedad de maíz utilizada es una variedad local («criolla») de maíz blanco (conocido como «cañuelilla»). La siembra se realizó el 2 de mayo de 1995, a una profundidad de 12 cm, con una distancia de 80 cm entre los surcos, una distancia entre las matas dentro del surco de 50 cm y 3 granos de semilla por mata (población pretendida ≈ 45.000 plantas/ha).

Se llevó un registro de aparición de las principales etapas fenológicas, de la diferenciación floral, de la floración y de la madurez fisiológica. Además, se observó el número de plantas acamadas, el grosor y la altura del tallo al momento de la floración. Las observaciones se realizaron semanalmente en 260 plantas/tratamiento. En el estadio de madurez fisiológica se evaluaron la producción de granos, la producción de biomasa, el índice de cosecha, la altura de las plantas, el ancho y largo de las mazorcas, el número de granos por mazorca, y el peso de mil granos (PMG).

La humedad volumétrica se observó dos veces por semana con un sistema TRASE (*Time-Domain-Reflectometry, Soil Moisture Equipment*).

RESULTADOS

Crecimiento y desarrollo

La figura 1 (siguiente página) ilustra el crecimiento y desarrollo del cultivo junto con la oscilación de la humedad volumétrica.

Germinación y establecimiento de la población

La germinación fue muy dispareja debido a una grave falta de humedad desde la siembra hasta el 25 de mayo. La humedad volumétrica en el suelo durante esos 23 días posteriores a la siembra varió entre 8 y 15 % (con una densidad aparente de 1,15-1,20 g/cm^3). La germinación tardó hasta el 15 de junio. La población establecida a esta fecha varió entre 51.000 en LRscv, 54.000 en LRccv y 63.000 en LT. La germinación en LT empezó más tarde, resultando menos plantas muertas por sequía durante el período mencionado.

Crecimiento vegetativo

En el establecimiento del cultivo se ve claramente que LRscv es el más rápido en establecerse (79 días), mientras LRccv y LT alcanzaron su estadio de 10 hojas 105 días después de la siembra. Del día 72 hasta el 107 se puede observar un estancamiento en el desarrollo de las plantas en todos los tratamientos debido nuevamente a una falta de humedad aprovechable en el suelo.

El desarrollo de la altura de las plantas muestra una diferencia significativa entre los tratamientos. Mientras que al inicio de la temporada aquellas de LR crecieron más rápidamente que las de LT, durante la sequía de julio esta situación cambio drásticamente: las de LT desarrollan una mayor altura, seguidas muy de cerca por las de LRscv. La altura final de la variedad estudiada varió entre 200 y 250 cm (1 $DMS_{5\ \%}$ = 7 cm) [DMS: Diferencia Mínima Significativa].

El estudio del grosor (ver cuadro 2) del tallo a la altura de 30 y 60 cm al inicio de la floración masculina mostró el tallo más grueso (9,2 y 8,6 respectivamente) en LRscv. Esto permite deducir una mayor acumulación de biomasa en esta época. LT le sigue muy de cerca con 8,6 y 7,5 cm y muy lejos se observa el grosor de LRccv.

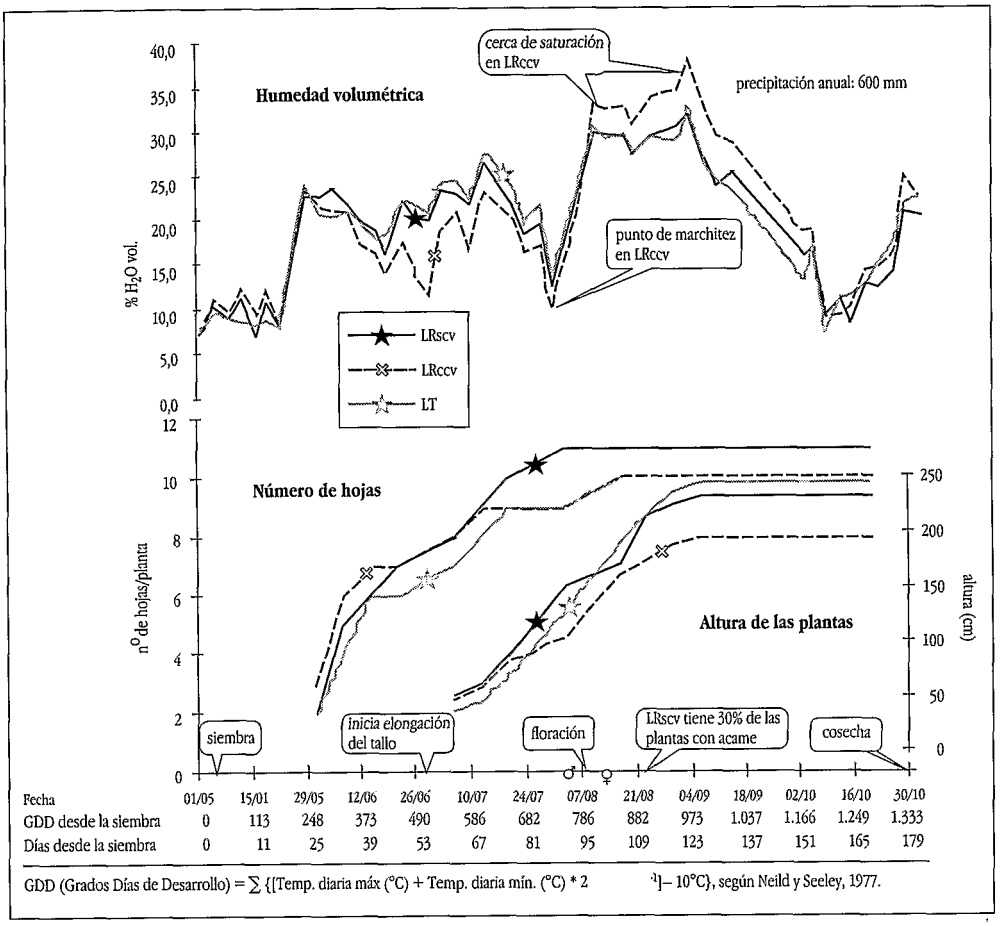


Figura 1 - Crecimiento y desarrollo del cultivo de maíz bajo diferentes labranzas, con la humedad volumétrica, durante el ciclo de 1995 en Santiago Tlalpan

Crecimiento generativo

La floración masculina se inició primero en LRccv, hacia principios de agosto (95 días después de la siembra) y en LT y LRscv a mediados de ese mes. Por el contrario, la floración femenina empezó primero en LT, luego en LRccv y se retrasó una semana en LRscv. Así, hubo un gran intervalo entre la floración masculina y femenina en LRscv.

La figura 2 ilustra el desarrollo del número de mazorcas.

La aparición de mazorcas se registró primero a medidados de agosto en LT y LRccv. En la primera fecha de registro, LRscv tenía significativamente menos plantas con mazorcas que LT y LRccv. Llama la atención que LRscv tenga mayor número de jilotes por planta. Debido a ello avanzó y alcanzó a los otros tratamientos en el número de jilotes por hectárea en la semana siguiente. Sin embargo, muchos de esos jilotes no llegaron a desarrollarse en la planta, lo que se expresa en la reducción del número de elotes por

Tratamiento	LRscv		LRccv		LT		DMS
	prom.	%	prom.	%	prom.	%	5 %
Producción de granos (t/ha)	2,06 a	66	2,03 a	65	3,1	100	0,58
Producción de paja (t/ha)	6,1 a	104	4	68	5,9 a	100	1,2
Indice de cosecha (IC)	0,26	74	0,34 a	97	0,35 a	100	0,048
N° de plantas con mazorca/ha	26.300	66	37.800 a	95	39.800 a	100	7.200
N° de mazorcas/planta	1,05 a	103	1,10 a	108	1,02 a	100	n.d.
Peso de mil granos (g)	334 a	103	293	90	324 a	100	34
Altura a la floración (cm)	232	95	193	79	244	100	7
Grosor del tallo a 30 cm de altura* (cm)	9,2	107	6,9	80	8,6	100	0,2
Grosor del tallo a 60 cm de altura* (cm)	8,6	115	6	80	7,5	100	0,2

Nota: promedios asociados a la misma letra en la misma fila no son diferentes significativamente
*: Medición al momento de la floración masculina

Cuadro 2 - Componentes del rendimiento del maíz bajo diferentes tipos de labranza, en un tepetate (t3) rehabilitado en 1995

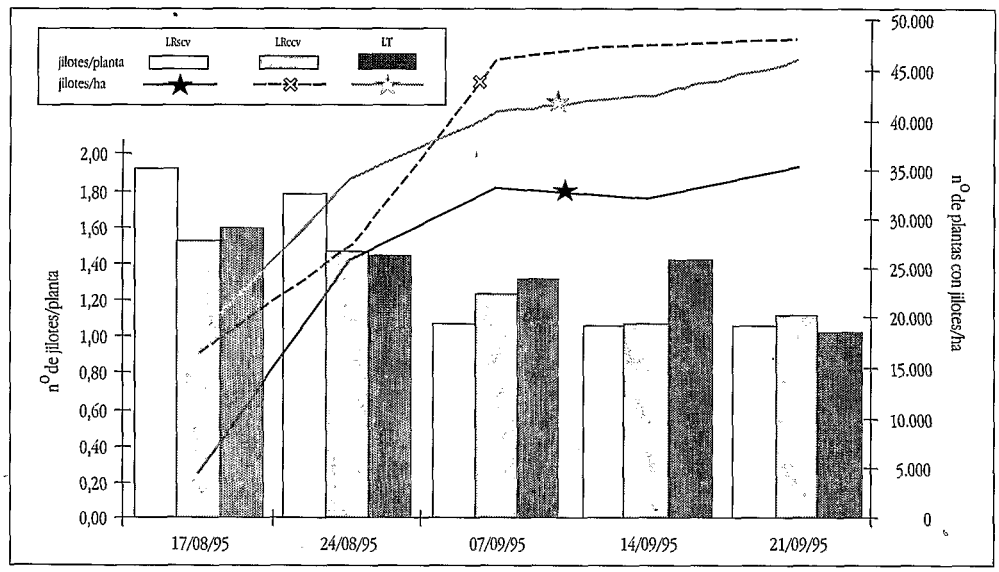


Figura 2 - Desarrollo de elotes y mazorcas en maíz bajo diferentes labranzas, durante el ciclo 1995 en Santiago Tlalpan

planta de 1,9 a 1,1. A finales de septiembre se encontró en cada tratamiento la misma cantidad, 1,05 mazorca por planta, valor esperado para esta variedad.

Adicionalmente, en LRscv se observó un retraso en el número de plantas con mazorcas al momento de la cosecha debido a un importante debilitamiento de las plantas

acamadas (50 % de todas las plantas), durante una fuerte tempestad a mediados de agosto. Esto no permitió desarrollar más mazorcas a partir de esa fecha y además provocó una muerte sucesiva de cerca del 30 % de las plantas con jilotes.

Rendimiento y sus componentes

El cuadro 2 presenta los componentes del rendimiento de cada tratamiento. El rendimiento de 3,3 t/ha bajo labranza tradicional muestra el gran potencial productivo del tepetate rehabilitado. El promedio de rendimiento en la zona (en la que predomina el maíz criollo) se establece en 2,7 t/ha. Las dos LR tienen un rendimiento mucho menor, de alrededor de 2 t/ha. Por otro lado, la producción de paja tiene una característica diferente a la de los granos: la mayor producción se observa en LRscv con 6,1 t/ha, muy cercana a la de LT (5,8 t/ha); la menor cantidad se produjo en Lrccv con 4 t/ha. Esto nos lleva a una gran diferencia en el índice de cosecha (IC) entre los tratamientos: 0,26 en LRscv y 0,34 en LT y LRccv.

La diferencia entre el testigo y los dos tratamientos de labranza reducida se deben a diferentes componentes del rendimiento de los granos. Mientras en LRscv el número de mazorcas desarrollados por hectárea fue muy bajo (27.000), en LT y en LRccv se desarrollaron 40.000 mazorcas/ha. Tal situación en LRscv se produjo aun cuando a mediados de agosto se registró allí el mayor número de elotes desarrollándose en este tratamiento. Esto se debe al acame de las plantas, que provocó una perdida sucesiva de plantas con mazorcas cosechables.

LRccv se distinguió de los otros tratamientos por un muy limitado número de granos por mazorca (170) y el menor peso de mil granos (290 g). LRscv presentó el mayor peso por mil granos: 330 g. El número de granos por mazorca en LT y LRscv fue de 240.

CONCLUSIONES

En el calendario (figura 1) se enfrentaron, durante el período de vegetación, 3 factores de estrés muy importantes para el desarrollo del rendimiento:

- falta de agua durante el período de germinación;
- falta de agua durante la sequía interestival (inicios de agosto);
- vientos fuertes que provocan acame.

Los dos últimos factores determinaron el rendimiento en los dos tratamientos de labranza reducida. La falta de agua durante la sequía interestival (canícula) provocó en LRccv un secado del suelo muy cercano al punto de marchitez debido a la mayor evapotranspiración por parte de la cobertura vegetal (maíz, trébol y en gran parte malezas). En LT y LRscv se observó cierto estancamiento en el desarrollo pero ninguna marchitez en las plantas.

Las fuertes tempestades con altas velocidades del viento es un fenómeno muy frecuente en esta zona. Por su altura y su enraízamiento superficial, la variedad usada es muy susceptible al acame. En LRscv se observó el mayor porcentaje (> 50 %) de plantas acamadas de todos los tratamientos. La labranza tradicional combate este problema con dos aporques que permiten enraizar adecuadamente la planta en el suelo. En LRccv, la resistencia al acame fue mayor por una menor altura de las plantas.

La labranza tradicional es el más eficiente tratamiento para resistir el estrés ambiental en estas zonas. El aporque, aunque tiende a aumentar la tasa de pérdida de suelo, es una medida eficaz para evitar el acame de las plantas.

Para poder introducir labranza reducida en maíz, es necesario usar variedades con una elevada resistencia al acame de raíz, gracias ya sea a una altura limitada, a una alta

resistencia de las raíces a las fuerzas de tracción o a un profundo enraízamiento. La hipótesis de que una siembra en matas de una sola planta redundaría en una mayor resistencia de las plantas al acame, no se ha podido comprobar hasta el momento. El estrés hídrico observado en labranza reducida con cobertura vegetal nos indica que este método requiere una mayor capacidad de almacenamiento de agua aprovechable, de 150 mm mínimo, lo que corresponde, en este material, a una profundidad de rehabilitación de por lo menos 55 cm.

Referencias bibliográficas

ALIPHAT, F. M.; WERNER, G., 1994: The Tepetates of the Mexican Highlands: Prehispanic and Modern Impact of Agriculture and Water Management, in *Transactions of the 15th World Congress of Soil Science*, Simposio ID-13, p. 528-540.

BAUMANN, J.; WERNER, G.; MUÑOZ, H.; VERA, A.; FLORES, G., 1992: Mediciones preliminares de la erosión hídrica en el bloque de Tlaxcala, México, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 347-357.

CALVA ORDUÑO, D., 1992: Rescate de tierras tepetatosas erosionadas en Tlaxcala, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 557-560.

CIMMYT, 1991: *Maize Conservation Tillage*, Training Working Document N° 7, México D.F.

MÁRQUEZ, A.; ZEBROWSKI, C.; NAVARRO, H., 1992: Alternativas agronómicas para la recuperación de tepetates, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 465-473.

NEILD, R. E.; SEELEY, M., 1977: Growing Degree Days Prediction for Corn and Sorghum Development and some Applications to Crop Production in Nebraska, in *Res. Bull. 280 Agric. Expt. Stn.*, Univ. Nebraska.

ROMERO CONTRERAS, A.T. 1992: Sistemas agrícolas de temporal y la erosión en Hueyotlipan, Tlaxcala, México, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 539-544.

Síntesis del tema 4
Erosión, conservación e hidrodinámica

Christian PRAT

INTRODUCCIÓN

Durante las dos últimas décadas, se han realizado varios estudios sobre erosión y rehabilitación de los suelos volcánicos endurecidos en México, Ecuador y Nicaragua.

Los resultados de los primeros estudios se presentaron en los dos primeros simposios sobre suelos volcánicos endurecidos realizados en México en 1991 (*Terra*, Vol. 10, número especial, 1992) y 1994 (*Transactions of the 15th World Congress of Soil Science*, Vol. 6a, 1994) así como en la síntesis, redactada por Paul Quantin, del programa cofinanciado por la Unión Europea de 1989 a 1991 en México (*Terra*, Vol. 11, número especial, 1993).

Dicho programa fue realizado en el estado de México por los equipos del ORSTOM y del CP así como en el estado de Tlaxcala por los equipos de la UAT y de la UG. Los trabajos se orientaban hacia estudios en parcelas tipo Wischmeier donde se midieron escurrimientos y sedimentos.

En el marco del segundo programa, los estudios se prosiguieron en México (en tepetate y suelo agrícola) con el objetivo de conseguir datos a nivel de parcelas campesinas, y se ampliaron al Ecuador en cangahua, y a Chile en andosol.

Salvo dos, los trabajos presentados en este simposio exponen los resultados obtenidos en el marco de los programas desarrollados con el apoyo de la Unión Europea.

LOS TRABAJOS PRESENTADOS

De las 12 presentaciones (una de Chile, 2 del Ecuador y 9 de México), 8 están relacionadas con lluvias naturales, 2 corresponden a estudios de la erosión con simulación de lluvia y 2 analizan la dinámica de los estados de superficie.

Estudios con lluvias naturales

En el **Ecuador**, De Noni *et al.* (*Ruissellement et érosion sur des parcelles de* cangahua *réhabilitée*) comparan métodos de conservación (pendiente de las terrazas, influencia de un murete filtrante en la parte baja de las parcelas, de una cobertura vegetal gracias a un cultivo realizado antes del inicio de la estación lluviosa) en parcelas de 100 m^2.

En **México**, en el estado de Tlaxcala:

- Baumann y Werner (*Erodibility of Volcanic Ash Soils in the Central Mexican Highlands*) presentan los resultados obtenidos durante el periodo 1991-1994, comparan la erosión en tepetate inicial, roturado con y sin cultivo, y en suelo agrícola en parcelas de 6 a 44 m^2.

- Fechter-Escamilla *et al.* (Erosión hídrica en un suelo volcánico endurecido) presentan los resultados de medidas realizadas en tres parcelas de 1.500 m^2 de tepetate cultivado con maíz según diferentes labores.

En el estado de México:

- Prat presenta un análisis detallado de las características de las precipitaciones de 1992 a 1995 en San Miguel Tlaixpan, donde se realizaron algunas de las experimentaciones.
- Prat *et al.* (Erosión y escurrimiento en parcelas de tepetate t3 en Texcoco) exponen los resultados obtenidos en San Miguel Tlaixpan en 8 parcelas de 500 a 1.800 m^2 incluyendo tepetate inicial y cultivado, así como suelo agrícola. El protocolo de experimentación tenía como finalidad probar los efectos de la profundidad del subsoleo, del tipo de preparación (fina o gruesa), de la pendiente de las terrazas, del tipo de cultivo y de las labores.
- Oropeza *et al.* (Uso de modelos matemáticos...) comparan, en San Miguel Tlaixpan, en 22 parcelas tipo Wischmeier, la susceptibilidad al escurrimiento y a la erosión de un tepetate inicial y un cultivado con diferentes tratamientos, con el propósito de afinar un modelo de predicción de la erosión.
- Ríos y Oropeza (Factores de la erosión y prácticas agronómicas...) presentan los resultados de ensayos realizados cerca de Texcoco, en 16 parcelas de 50 m^2 cada una, establecidas en un suelo sobreyacente al tepetate. Prueban el efecto de diferentes labores de cultivo (siembra en surcos, en plano, densidad de siembra) en la erosión.

En **Chile**, Oyarzún *et al.* (Evaluación de la erosión mediante parcelas experimentales...) exponen los resultados en pérdidas de suelo en un andosol cultivado con franjas alternadas de protección en parcelas de 100 m^2.

Experimentación con simulación de lluvia

La presentación de Rivera y Oropeza y aquella de Alcalá de Jesús y Oropeza corresponden a experimentaciones realizadas en México en parcelas de 7 m^2 a fin de establecer la relación entre intensidad de lluvia y erosión, en tepetate natural y roturado.

Dinámica de los estados de superficie

La presentación de Leroux y Janeau (Caracterización hidrodinámica de un suelo volcánico del Ecuador...) trata de un estudio realizado con simulador de lluvia en parcelas de 1 m^2 para determinar la influencia de la preparación del suelo (fina o gruesa) en el comportamiento hidrodinámico de la cangahua.

Aquella de Lauffer *et al.* (Organización superficial de los tepetates cultivados...) se refiere a la degradación de los estados de superficie de tepetate cultivado bajo la influencia de lluvias naturales. En ambos casos, el seguimiento de la evolución de los estados de superficie se realizó mediante el método del punto cuadrado.

RESULTADOS

Dada la variedad de metodologías y resultados, parece importante hacer primeramente una breve descripción de los equipos y métodos utilizados por los diferentes grupos de investigadores, mostrando sus ventajas y deficiencias, para realizar luego una síntesis de los principales resultados alcanzados.

Equipos y métodos

Análisis de los datos de precipitaciones y clima

En todos los estudios se tomaron globalmente los mismos parámetros principales que caracterizan a las lluvias. Los datos de precipitaciones registrados fueron analizados

y procesados con programas informáticos distintos en cada caso. Así, se obtuvieron la altura, la intensidad, la duración, el I_{30} (con lluvias ≥ 12,7 mm o con todas las lluvias), la energía cinética global (suma de las energías cinéticas de las intensidades constantes de una misma lluvia). Sin embargo, y debido a los tipos de lluvias intensas pero breves que ocurren, se revela necesario tomar en cuenta el I_5, el I_{10}, el I_{15} y el $I_{máx}$ para las interpretaciones, y dejar el I_{30} para comparaciones con otros estudios y no como única base de análisis de las lluvias. En la presentación de los datos de los diferentes equipos, hace falta a menudo precisar si se trata de todas las precipitaciones o solamente de las de la temporada de lluvia, si se habla de todas las lluvias o solo de las superiores a una cierta altura... Además, el uso de unidades diferentes no simplifica las comparaciones.

Escala de trabajo

Los trabajos se efectuaron a varias escalas:

- de 1 a 7 m^2 para parcelas de simulación de lluvia;
- de 44 a 100 m^2 para parcelas Wischmeier o «tipo Wischmeier»;
- de 500 a 1.800 m^2 para parcelas campesinas.

Equipos de medición

Para la simulación de lluvia, en el Ecuador se utilizó un simulador tipo ORSTOM en parcelas de 1 m^2, mientras en México se empleó el simulador tipo III desarrollado por la Universidad de Purdue (USA). Este segundo equipo, por su longitud de 7 m, permite tomar en cuenta parte de los efectos de concentración del escurrimiento, mientras que el simulador ORSTOM se limita al estudio de la degradación de los agregados y de la formación de las costras.

Para medir el escurrimiento y la erosión, en el Ecuador y en México (estado de México), se utilizó el sistema clásico de vertedor, partidor y pileta de captación, pero sin limnígrafo en el primer caso. En Tlaxcala, se empleó el mismo sistema durante el periodo 1989-1993, pero luego fue reemplazado por el de la rueda de Cochocton. Sin embargo, este no funciona con agua muy cargada de sedimentos pues estos obstruyen la apertura que permite captar la alícuota de escurrimiento y se sedimentan entre las aletas de la rueda, reduciendo su velocidad de giro, lo que imposibilita cualquier cálculo de los escurrimientos y de las cargas sólidas. En 1994, Fechter-Escamilla desarrolló y probó un sistema de medición basado en una pileta de captación conectada a una balanza electrónica de registro continuo de los escurrimientos y de sus cargas sólidas. En Chile, Oyarzún *et al.* construyeron un sistema automático de medición y de toma de muestras durante el escurrimiento, que funcionó correctamente con caudales de algunos l/s y unos cuantos gramos de carga sólida. Hay que aclarar que tal sistema permite medir el agua y su turbiedad, y no la carga sólida total del escurrimiento ya que cuenta con una pileta de captación de los sedimentos de fondo antes del muestreador. Por su automatización y bajo costo de fabricación (1.000 US$ + *datalogger* de 1.000 US$ al que se pueden conectar hasta 6 muestreadores) y en la medida en que puede ser adaptado para mayores caudales y aguas muy cargadas de sedimentos, podría ser el sistema más eficaz de los que se utilizaron.

Parámetros de los escurrimientos y erosión

Los parámetros estudiados fueron siempre el volumen de agua escurrida con su coeficiente Kr y la carga sólida. Los métodos para obtener estos datos fueron siempre la medición directa de la altura de agua en las piletas e indirecta mediante el procesamiento de limnigramas, para lo cual cada equipo de investigación utilizó un programa informático distinto.

En cuanto a la carga sólida, hay que diferenciar el caso de las parcelas pequeñas tipo Wischmeier de las terrazas grandes. En el primer caso, las cantidades consideradas son del orden de algunos kilos, mientras que en el segundo, se trata mínimo de un centenar. Se debe anotar que en los ensayos efectuados en el Edomex, siempre se tomaron y procesaron todos los sedimentos recolectados, lo que representa una tarea sumamente dura. Por ello, el sistema de medición desarrollado en Tlaxcala es muy interesante ya que no obliga a recoger los sedimentos sino que se los mide directamente a medida que se acumulan en la pileta. Desgraciadamente, como aún existen serios problemas en cuanto a la calibración y durante los eventos excepcionales, es necesario seguir afinando el sistema.

Es importante anotar que casi nunca se habla en los trabajos de la precisión de las mediciones y tampoco de la representatividad de los registros, pese a que se trata de puntos clave en el análisis de los datos. En el caso de los partidores, la calibración es tan fundamental como delicada de realizar y fuente de error.

Principales resultados

Precipitaciones

Según la clasificación de Koeppen, el clima en Fundo Paillahuinte (Chile) es templado muy lluvioso, en el Ecuador es de tipo templado ecuatorial de montaña con régimen ústico subhúmedo en La Tola y subárido en Cangahua y en los dos sitios de México, es templado tropical subhúmedo.

Las lluvias son muy irregulares tanto en duración como en altura y consecuentemente en intensidad. Además, hay importantes variaciones de un año a otro y dentro de un mismo año. La pluviometría presentó valores mínimos y máximos a lo largo de los 6 años de estudio en el Ecuador (626-1.049 mm). En 5 años, en el Edomex, tales valores fueron de 397 a 768 mm y en 4 años en Tlaxcala, de 663 a 803 mm. En Chile, el promedio anual es cercano a 4.000 mm.

Más del 50 % de las lluvias tienen una duración inferior a 30 mn. Por ello, el I_5, el I_{10} o el I_{15} son mejores parámetros que el I_{30} en el cálculo y establecimiento de la relación intensidades/coeficientes de escurrimiento/cantidad de sedimentos arrastrados. Sin embargo, Baumann en Tlaxcala y Oropeza en la estación San Miguel establecieron una buena relación entre EI_{30}, escurrimiento y pérdida de suelos.

La altura es menor a 5 mm en el 80 % de las lluvias y se ubica entre 5 y 10 mm en el 10 %. Por ello, según Wischmeier, para tener un R de referencia, más vale calcular el R anual con base tanto en el total de la energía de todas las lluvias como en las lluvias $\geq$ 12,4 mm.

Alrededor de 10 lluvias (de 150 al año) generan el 80 % de los escurrimientos y arrastre de sedimentos en los diferentes sitios de estudio.

El R_{us} anual es de 100 a 200 en México y en el Ecuador. Sin embargo, del lado oriental de la Sierra Madre (Tlaxcala), las precipitaciones son mayores ($R_{us} \approx 200$) que del lado occidental (Texcoco, Edomex) —$R_{us} \approx 100$—. Esta situación se reproduce en el Ecuador entre La Tola ($R_{us} \approx 200$) y Cangahua ($R_{us} \approx 100$). En ambos países, se trata de valores relativamente moderados en comparación con otros tipos de clima tropical en el planeta.

Erosión y escurrimientos

Durante los últimos 4 años en México, el máximo de escurrimiento y erosión ocurrió siempre en agosto, después de haber presentado un primer pico de intensidad en

junio. En el hemisferio sur, dicho máximo se produce en los meses de marzo/abril y octubre/noviembre.

Los resultados en parcelas de Wischmeier en el Edomex en particular, muestran variaciones importantes (multiplicación por 2 y hasta 3) de una parcela a otra, lo que muestra la necesidad de las repeticiones y la dificultad de hacer buenas mediciones con este tipo de parcelas de tamaño reducido que amplifica cualquier particularidad. Sin embargo, se pudo comprobar que en tepetate roturado desnudo y no surcado, el Kr (45 a 36 %) y la erosión (25 a 30 t/ha/año) en 1995 y 1996, son comparables a los medidos en 1991 (45 % y 22 t/ha/año). En tepetate cultivado con trigo, el Kr (15 a 16 %) y la erosión (2 a 3 t/ha/año) son notablemente superiores a los encontrados en un cultivo de maíz en surcos en 1991 (5 % y 1 t/ha/año). En este último caso, es normal y evidente, ya que ancho reducido de las parcelas Wischmeier impide el escurrimiento lateral. Así, datos obtenidos con esta metodología no son válidos, en comparación con lo que ocurre en la realidad, con parcelas de tipo campesino.

En parcelas campesinas ($\geq$ 100 m^2) establecidas en México, la cantidad de sedimentos arrastrados es relativamente baja, de 1 a 10 t/ha, pero esos valores casi se duplican en Tlaxcala (Tlalpan), con un Kr similar, debido a un clima más agresivo.

En el Ecuador, los resultados muestran una erosión con valores también bajos (10 t/ha/año), cercanos a los encontrados en México, mientras que el Kr es mucho menor y las pendientes mucho más fuertes.

En Chile, tanto los escurrimientos como la erosión son insignificantes (porcentajes muy limitados y algunos kilos al año), lo que muestra que los andosoles, bajo las condiciones de estudio, son muy permeables.

Si se comparan los resultados entre parcelas de diferentes tamaños, se puede observar que, globalmente, las tendencias son las mismas y las respuestas a los principales eventos también. Lo que cambia es la amplitud e intensidad de las repuestas registradas. Así, en el tepetate en su estado natural, el escurrimiento y la erosión son dos veces myores en una parcela de 1.800 m^2 que en una de 44 m^2, la cual a su vez presenta valores de Kr y E tres veces superiores a las tasas medidas en parcelas de 6 m^2. En cuanto al tepetate cultivado en cebada, la diferencia entre terrazas de 700 m^2 y de 44 m^2 es aún mayor ya que alcanza el triple. Es probable que estas diferencias se deban a la longitud de la pendiente, pues en el caso de las terrazas más grandes, hay mayor escurrimiento y concentración de agua, lo que favorece un mayor arrastre de sedimentos. Aquí se ven los límites de los estudios con pequeñas parcelas, y más que todo, el error de extrapolar estos datos al nivel de parcelas campesinas y de cuencas enteras.

Cultivo de los suelos volcánicos endurecidos y erosión

Las tasas de erosión en los tepetates desnudos son relativamente moderadas (de 10 a 30 t/ha), mas el solo hecho de roturarlos aumenta considerablemente la erosión, la misma que es 2 a 7 veces superior (Baumann y Werner, Fechter-Escamilla *et al.*), pese a una reducción del escurrimiento debida a una mayor infiltración. Este aumento de la erosión es tanto más importante cuanto más fina es la preparación del suelo (Leroux et Janeau). Ella se incrementa con el trabajo del suelo y con el tiempo, debido al desmenuzamiento de los agregados y a la formación de costras (Rivera y Oropeza, Prat *et al.*).

Los trabajos de binazón rompiendo las costras favorecen la infiltración y disminuyen por lo tanto el escurrimiento. Sin embargo, tienen un efecto contrario si no se realizan a una profundidad suficiente o se efectúan en suelo demasiado húmedo, lo que propicia entonces la formación de costras.

Todos los autores mostraron que la erosión en los tepetates cultivados es mucho menor que la de los tepetates trabajados pero dejados al desnudo. En efecto, llega a ser inferior a aquella de los tepetates en su estado inicial.

Oropeza *et al.* demostraron que el efecto de la cobertura vegetal es superior al de una malla protectora, de allí el interés de realizar una siembra densa (Ríos y Oropeza). Prat *et al.*, al igual que Lauffer *et al.* muestran también la ventaja de una asociación de cultivos, en particular maíz-haba, con relación a un monocultivo, y el efecto positivo de los cultivos en surcos en comparación con los realizados en plano.

Con el fin de probar diferentes labores de cultivo frente a la erosión, Fechter-Escamilla *et al.* compararon, en un cultivo de maíz, la labranza tradicional (en surcos) y una labranza mínima con y sin cobertura vegetal intercalada. La erosión fue de 5 t/ha en el caso de la labranza tradicional, de 5,5 t/ha con una labranza mínima, pero solo de 2 t/ha en el experimento labranza mínima más cobertura vegetal intercalada. La labranza mínima aumenta el escurrimiento pero muy poco la erosión y la cobertura intercalada reduce considerablemente estos dos parámetros. Sin embargo, la compartimentación de los surcos (contreo) se reveló como la mejor protección contra la erosión. En efecto, el escurrimiento fue apenas del 4 % y la erosión casi nula (Prat *et al.*).

Por otro lado, los métodos de conservación probados en el Ecuador mostraron que los muretes filtrantes de cangahua son tan eficaces como la pendiente débil. Asimismo, un precultivo permite asegurar una cobertura vegetal al inicio de las lluvias.

CONCLUSIONES

Dados la diversidad de metodologías aplicadas por los equipos de investigación y de formas de presentación de los datos, asi como el carácter incompleto de los análisis de los resultados, resulta difícil llegar a conclusiones definitivas con base en el conjunto de trabajos presentados dentro de este tema. Sin embargo, esta situación revela la importancia de uniformizar las metodologías y de utilizar, para las mediciones del escurrimiento y la erosión, un aparato de registro automático, como el desarrollado en Chile o el sistema de partidor conectado a una balanza electrónica, empleado en Tlaxcala.

Los resultados de los seguimientos de los estados de superficie han demostrado el interés de tales experimentos, los cuales, unidos a las mediciones de la erosión en parcelas, contribuyen a explicar la dinámica de los fenómenos erosivos.

Los experimentos llevados a cabo confirman asimismo la importancia de rehabilitar los suelos volcánicos endurecidos aunque no fuera sino porque la erosión en esos materiales es menor una vez cultivados. La erosión en parcelas cultivadas puede ser controlada mediante modos de cultivo cuya eficacia se ha demostrado (contreo en el caso del maíz, asociaciones de cultivos, etc.), algunos de los cuales deben sin embargo aún ser investigados.

Como la mayor parte de la erosión se debe a algunas precipitaciones particularmente fuertes, cabe protegerse de este tipo de eventos excepcionales mediante la realización de obras de conservación, tales como terrazas de pendiente reducida o, de manera menos costosa (ver tema 5), terrazas de formación lenta.

Ruissellement et érosion sur des parcelles de *cangahua* réhabilitée (période 1994-1996)

Georges De Noni, Marc Viennot, Germán Trujillo, Edmundo Custode

Abstract

In the highlands of Ecuador, the response to an increase in alimentary needs leads to extend cultivable lands. Under these conditions, the reclamation of the pyroclastic hardened volcanic soils by mechanical works is a vital necessity. However the new soil material which has been roturated and disagregated, presents such a susceptibility that it becomes important to protect it against erosion.

In order to offer sustainable alternatives, experimental studies have been undertook in two experimental stations located in the interandean valley next to Quito (2,500 - 2,900 m), in a subhumid to subarid climate with two dry seasons (2 to 4 months).

The field experiment was carried out during 2 cultural years, in small runoff plots where daily runoff, erosion and rain have been measured. In oat plots, conservative cultural practices have been tested: a cover with a pre-irrigated oat, a flat terrace, a pervious check dam with cangahua *blocks, in comparison with a reference plot.*

On the reference plot, results showed that erosion and runoff were important despite a weak erosivity ($80 < R_{us} < 100$); moreover, erosion hazards might occur at any time during the year. The cover effect was important and increased according to the development of the oat. As far as erosion was concerned, weak erosion was observed between the treatments but these differences were significant when compared to the reference plot; the behaviour of the runoff was complex.

The technique using pervious check dams with cangahua *blocks must be recommended for the good results it gave, its low cost and the easy acceptation by peasants.*

Keywords: *Hardened Volcanic Soils* - Cangahua - *Field Experiments* - *Erosion, Reclamation* - *Conservation* - *Highglands* - *Ecuador*

INTRODUCTION

Entre 1986 et 1991, une opération de recherche menée par l'ORSTOM et le MAG (DNA) avait permis d'évaluer les pertes en eau et en sol dans des situations agricoles représentatives de la *Sierra* et de son piedmont occidental, grâce à des parcelles de ruissellement de 100 à 1 000 m^2 de surface groupées dans des stations. L'efficacité de mesures conservatrices, facilement acceptables par le paysannat et peu coûteuses en

argent et en travail (De Noni *et al.*, 1986, 1990, 1997), avait également été testée, notamment dans les stations de La Tola et Cangahua.

Par la suite, entre 1994 et mai 1996, une nouvelle opération a été lancée, dans le cadre d'un contrat de l'Union Européenne (UE) passé entre l'ORSTOM et l'Université Centrale de Quito, pour étudier les problèmes de susceptibilité à l'érosion que pose la *cangahua* réhabilitée après avoir été pulvérisée et émiettée.

L'objectif de cette communication est de présenter, sur la base de données obtenues sur des parcelles de ruissellement au cours de ces deux années, un bilan des pertes en eau et en sol, et de pouvoir ainsi juger de l'efficacité de quelques aménagements dans ces parcelles.

Pour mener à bien cette étude, il a été décidé de reprendre les parcelles suivies entre 1986 et 1991 et de les adapter au nouvel objectif, afin de conserver le bénéfice des résultats acquis.

La station de La Tola est située au pied d'un petit édifice volcanique (Ilaló), à 2 500 m d'altitude et à une quinzaine de kilomètres à l'est de Quito ; celle de Cangahua, se trouve au nord de cette même ville, à 80 km environ, à 2 900 m d'altitude, au pied des premiers contreforts internes de la cordillère Orientale.

PROBLÉMATIQUE DE LA *CANGAHUA*

La *cangahua*, est une formation volcanique indurée. Elle résulte de l'altération de matériaux pyroclastiques (cendres, lapilli) qui caractérisent la région centrale, montagneuse et volcanique du tiers nord de l'Équateur appelée *Sierra* (figure 1). On ne l'observe qu'entre 1 600 et 3 200 m d'altitude et est associée à un climat tempéré

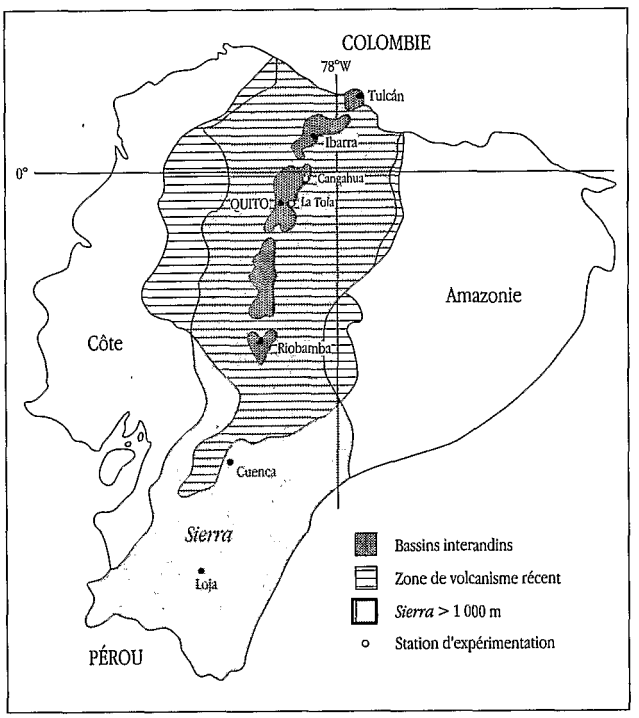


Figure 1
Carte de localisation des stations de La Tola et de Cangahua

relativement sec : pluviométrie moyenne annuelle inférieure à 800 mm (figure 2), marquée par 2 saisons sèches qui provoquent un fort déficit hydrique (Custode *et al.*, 1992). Dans le bassin de Quito cette formation n'affleure qu'après le décapage des horizons supérieurs qui la coiffent. Elle est normalement surmontée d'un sol argileux noir, humifère à propriétés vertiques. Ce sol d'excellente fertilité peut disparaître sous l'effet de l'érosion en faisant apparaître la *cangahua* qui est stérile en l'état. Mise à l'affleurement, la *cangahua* devient l'une des composantes majeures des paysages de la *Sierra*.

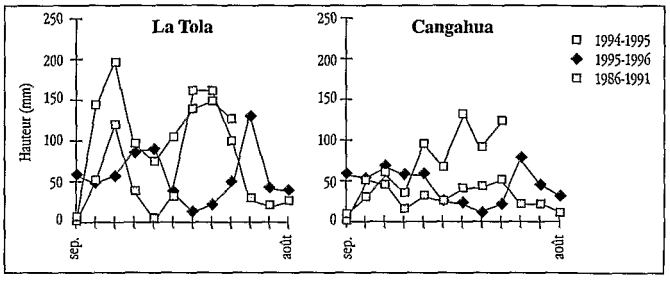


Figure 2
Hauteur mensuelle de pluie en 1994-1995, 1995-1996 et 1986-1991 (La Tola et Cangahua)

Dans la région des deux stations, l'érosion s'est initiée dans le sillon interandin à la rupture de pente entre les grands versants andins et le fond du bassin, dans des zones où l'activité agricole est menée de façon précaire sur des terres fortement sollicitées par le petit paysannat local. L'érosion s'est amplifiée, il y a un siècle, sous l'action conjuguée de l'accroissement de la population et de la demande alimentaire et se poursuit sur les versants avec le front de colonisation.

Selon une évaluation (Almeida *et al.*, 1994), la surface concernée par la *cangahua* atteint 20 % des terres cultivables de la *Sierra* du nord et du centre. La réintégration au domaine agricole des *cangahuas* indurées, est donc une nécessité impérieuse. Des expériences menées en Équateur et des études réalisées au Mexique (Zebrowski *et al.*, 1992) montrent que la réhabilitation des *cangahuas* est techniquement possible à condition de passer par des opérations manuelles ou mécaniques de défonçage et d'émiettement qui visent à rompre la cohésion du matériau induré et à le diviser. Le matériau ainsi formé jouit de propriétés physiques nettement plus favorables ; cependant son affinement se traduit par une telle susceptibilité à l'érosion hydrique, que la durabilité et la productivité du néo-sol ne sont pas assurées. Cette susceptibilité va de pair avec une grande pauvreté en matière organique de la *cangahua* indurée.

LES STATIONS DE MESURES DE LA TOLA ET DE CANGAHUA

Le dispositif

Les parcelles de ruissellement ont été aménagées après avoir nettoyé la surface du sol jusqu'au matériau induré qui a été lui-même défoncé sur 40 cm puis pulvérisé par une charrue à disques.

La station de La Tola comporte 4 parcelles de ruissellement de 100 m^2 (10 m x 10 m), reliées chacune par un canal à un système de cuves successives qui permettent de recueillir et de mesurer les eaux et les sédiments entraînés. Il s'agit des parcelles suivantes :

P1 parcelle avec une pente de 12 à 15 pour cent,
P2 parcelle avec une pente de 12 à 18 pour cent, avec une préculture irriguée, installée avant les pluies pour obtenir un effet de couverture,
P3 parcelle avec une pente de 12 à 14 pour cent et un muret filtrant de blocs de *cangahua* en bas de pente pour réduire l'érosion,
P4 parcelle (terrasse) de pente très faible (0 à 2 pour cent).

La parcelle irriguée (P2) a été semée en avoine (mise en place à la mi-septembre 1994) pour tester l'effet couverture d'une préculture. Cependant, du fait du type d'irrigation pratiquée (simulation de l'irrigation par aspersion avec un tuyau d'arrosage), cette parcelle montre une fonte importante des agrégats et la naissance d'une croûte structurale qui ont majoré le ruissellement. Sur le reste des parcelles, l'avoine a été mise en place en décembre et a montré une levée et un développement médiocres car la sécheresse de Noël s'est poursuivie jusqu'en mars. Les pluies sont alors arrivées sur une surface anormalement peu couverte. L'année culturale suivante, en 1995, les semis d'avoine ont normalement levé mais ont été ravagés par le passage d'un troupeau.

La station de Cangahua est constituée de 3 parcelles :
P1 parcelle témoin avec une pente de 15 pour cent,
P2 parcelle avec une pente de 15 pour cent, avec une préculture irriguée installée avant les pluies pour obtenir un effet de couverture,
P3 parcelle avec une pente de 15 pour cent et un muret filtrant de blocs de *cangahua* en bas de pente pour réduire l'érosion.

À Cangahua il n'y a pas de parcelle plane simulant l'aménagement en terrasse.

Les conditions climatiques

Pour les deux sites étudiés, le climat est de type tempéré isomésique (*Soil Taxonomy*) : température moyenne annuelle de l'ordre de 13 °C à Cangahua et légèrement inférieure à 15 °C à La Tola, sans variation significative des températures moyennes mensuelles (Pourrut, 1983, 1994). Les amplitudes diurnes des températures sont en revanche importantes tout au long de l'année.

Malgré des températures moyennes relativement basses, l'ETP est nettement supérieure aux pluies annuelles, particulièrement à Cangahua, de juin à août, en saison estivale, quand l'ensoleillement est fort et que le pouvoir évaporant de l'air est élevé alors que les précipitations sont réduites. Les réserves en eau du sol s'épuisent, l'alimentation hydrique des cultures annuelles n'est plus assurée sans apport d'eau complémentaire, ce qui correspond au régime d'humidité ustique tel qu'il a été défini par la *Soil Taxonomy*. Tous les 2 ou 3 ans cette situation de stress hydrique apparaît également en janvier ; elle a prévalu en 1994-1995.

Les pluies sont comprises entre 400 et 800 mm selon les années. Elles débutent en septembre (période de préparation des terres) et sont importantes en octobre et novembre (semis). Elles baissent et s'interrompent parfois en décembre et janvier puis reprennent en mars avec des valeurs élevées en avril et mai. Elles se terminent au début de juin (récolte du maïs, fève...). La saison sèche, qui démarre alors, n'est marquée que par quelques orages qui tombent sous forme de grêle et qui ne contribuent guère à l'alimentation hydrique des sols et des cultures.

Les courbes de répartition mensuelle des pluies (figure 2) illustrent quelques caractères importants :

- une irrégularité interannuelle importante puisque sur les 7 années d'observation, la

pluie moyenne annuelle a été de 685 mm à La Tola, les minimums et maximums ayant été de 626 et 1 049 mm. À Cangahua ces paramètres ont été respectivement de 535, 452 et 657 mm ;

- une grande disparité régionale. Ainsi, les 2 stations, bien que distantes de moins de 50 km, montrent des différences très significatives : sur les 2 années culturales d'observations, à La Tola de septembre 1994 à août 1995 et de septembre 1995 à août 1996, les précipitations ont été normales en 1994-1995 et très excédentaires en 1995-1996, tandis qu'à Cangahua, elles ont été fortement déficitaires en 1994-1995 et presque normales en 1995-1996.

L'analyse des pluviogrammes des 285 pluies enregistrées dans la station de La Tola et des 243 enregistrées durant la même période à Cangahua, montre que les petits événements sont majoritaires (tableau 1).

Hauteurs de pluie (mm)	La Tola		Cangahua	
	fréquence	%	fréquence	%
0 - 4	174	61,1	178	73,3
5 - 9	49	17,2	41	16,9
10 - 14	20	7,0	13	5,3
15 - 19	20	7,0	5	2,1
20 - 24	12	4,2	5	2,1
25 - 29	5	1,8	1	0,4
30 - 34	3	1,1	0	0,0
35 - 39	0	0,0	0	0,0
40 - 44	1	0,4	0	0,0
45 - 49	1	0,4	0	0,0
50 - 54	0	0,0	0	0,0
55 - 59	0	0,0	0	0,0
60 - 64	0	0,0	0	0,0
total	285	100,0	243	100,0
max	47,0		26,6	

Intensités de pluie (mm/h)	La Tola		Cangahua	
	IM15	IM30	IM15	IM30
0 - 4	127	145	33	44
5 - 9	35	29	16	11
10 - 14	14	9	5	6
15 - 19	5	10	3	6
20 - 24	9	7	5	3
25 - 29	9	3	1	0
30 - 34	5	2	2	0
35 - 39	6	1	2	0
40 - 44	2	0	2	0
45 - 49	0	0	1	0
50 - 54	1	0	0	0
55 - 59	1	0	0	0
60 - 64	1	0	0	0
total	215	206	70	70
max	63,2	38,6	48,0	24,0

Tableau 1 - Hauteurs et intensités maximales de pluie en 15 et 30 minutes (1994-96) Stations de la Tola et de Cangahua

En ne retenant que les pluies supérieures à 10 mm pouvant donner lieu à un ruissellement et à des pertes en terre, on voit que seulement 20 % d'entre elles répondent à ce critère d' « efficacité » (62 pluies à La Tola qui représentent 64 à 68 % de la pluie annuelle et 24 pluies à Cangahua, soit 27 et 48 % de la pluie annuelle).

La Tola est nettement plus arrosée que Cangahua, les pluies y sont plus nombreuses et les hauteurs d'eau journalières nettement plus fortes.

Les pluviogrammes donnent également des indications sur les intensités maximales de pluies (IM) qui sont le reflet de l'agressivité climatique. Nous avons également classé ces intensités mesurées en 15 et 30 minutes et exprimées en millimètres par heure.

Il est difficile de comparer les intensités de La Tola à celles de Cangahua car pour cette dernière, les enregistrements sont particulièrement incomplets. On remarque que plus de 50 % des événements présentent des intensités faibles (moins de 5 mm/h en 15 mm). À La Tola, 3 pluies dépassent 50 mm/h (la plus forte valeur est de 63,2 mm/h en 15 mn), tandis qu'à Cangahua toutes les intensités de pluies sont inférieures à 50 mm/h (la plus forte intensité est de 48 mm/h en 15 mn). Ces valeurs d'intensité sont très modestes pour une région située en zone équatoriale, mais conformes à celles mesurées en zone montagneuse protégée des influences océaniques. Il s'agit donc d'un climat peu agressif, où toute proportion gardée, le climat de La Tola est plus agressif que celui de Cangahua. L'indice d'érosivité R_{us} calculé est de l'ordre de 100 à La Tola et de 80 à Cangahua.

On remarque que l'érosion est provoquée par un faible nombre d'événements que nous qualifierons de majeurs (tableau 2), plus particulièrement à La Tola où 5 pluies représentant seulement 8 % du total annuel sont responsables de 35 à 50 % du ruissellement et de 60 à 82 % de l'érosion tandis qu'à Cangahua 14 % des pluies ont provoqué 43 à 70 % du ruissellement et 58 à 70 % de l'érosion.

			Parcelle1		Parcelle 2		Parcelle 3		Parcelle 4	
		pluie mm	ruiss. l/ha	ER kg/ha	ruiss. l/ha	ER kg/ha	ruiss. l/ha	ER kg/ha	ruiss. l/ha	ER kg/ha
Tumbaco	quantité	78,8	121 170	22 566	183 524	9 007	185 415	10 943	205 390	6 774
	% tot. an	8,4	34,9	82,1	31,9	73,8	52,2	81,1	34,9	59,6
Cangahua	quantité	75,4	60 981	2 655	41 247	1 322	38 947	833		
	% tot. an	13,8	47,2	64,3	35,8	57,8	43	69,2		

Tableau 2 - Contribution des 5 pluies les plus intenses au ruissellement et à l'érosion La Tola et Cangahua (1994-1996)

Ceci est tout à fait conforme aux résultats antérieurs (De Noni, Viennot 1986, 1992). Il confirme que dans la montagne andine, la lutte contre l'érosion passe surtout par un bon contrôle des quelques événements majeurs.

LES RÉSULTATS

Mise en forme des données

Elle consiste, par une analyse critique des résultats, à faire correspondre, pour chacune des parcelles et en retournant aux documents originels, les pluies avec les événements érosifs. Cette opération, relativement facile pour La Tola où nous disposons de la plupart des valeurs d'intensité maximales (IM 15 et IM 30), s'est révélée beaucoup plus délicate à Cangahua où les lacunes sont nombreuses. Il manque en particulier toutes les intensités de 1994 et 1995.

Il est regrettable que les terres de fond aient été négligées quand elles représentaient moins de 300 g et que les périodes estivales n'aient pas fait l'objet d'un suivi plus régulier. Dans ce cas, il y a donc eu surévaluation des sédiments en suspension par rapport aux sédiments de fond. Néanmoins, cette incidence est mineure considérant que les résultats montrent que leur contribution est réduite dans le bilan total de l'érosion. Heureusement, les fortes érosions, qui constituent l'essentiel du phénomène, ont bien été

prises en compte. En règle générale, les suspensions ont été regroupées avec les sédiments de fond.

D'autre part, en raison de l'imprécision des mesures dans les bacs servant à recueillir le ruissellement, le calcul peut donner des valeurs de ruissellement nulles alors qu'il y a eu érosion mais cette dernière n'est pas suffisamment forte pour modifier les résultats finaux. Nous avons cependant préféré les conserver.

La station de La Tola

Le tableau 3 montre les résultats de pluie, de ruissellement, de coefficient de ruissellement et d'érosion pour les années 1994-1995 et 1995-1996 que l'on comparera avec ceux de la période 1986-1991 (tableau 4), obtenus sur deux types de parcelles : une parcelle cultivée selon le mode traditionnel (pertes en eau et en terre élevées) et une parcelle cultivée améliorée par des mesures destinées à limiter l'érosion (pertes en eau et en terre faibles).

Bien que les données soient incomplètes, les résultats globaux annuels mettent en évidence la faiblesse de la pluie, en particulier les 3 derniers mois de 1994 durant lesquels le ruissellement et l'érosion sont presque nuls.

mois	pluie (mm)	Parcelle 1			Parcelle 2			Parcelle 3			Parcelle 4		
		Qr (m^3/ha)	Kr mois (%)	Er (m^3/ha)	Qr (m^3/ha)	Kr mois (%)	Er (m^3/ha)	Qr (m^3/ha)	Kr mois (%)	Er (m^3/ha)	Qr (m^3/ha)	Kr mois (%)	Er (m^3/ha)
septembre	5,6												
octobre	52,8												
novembre	119,6												
décembre	38,8	3,3	0,8	-			-						-
janvier	4,9												
février	31,8			-			-			-			-
mars	161,3			1,4	8,8	0,5	0,9			0,7	15,8	1,0	0,6
avril	161,6	17,9	1,1	0,8	18,1	1,1	0,3	0,3	-	0,3	20,5	1,3	0,3
mai	100,1	21,4	2,1	1,2	19,8	2,0	10,0			0,6	43,6	4,4	1,3
juin	27,6			-			0,1			0,1	2,0	0,7	0,2
juillet	20,2												
août	26,1												
1994-1995	750,4	42,6	0,6	11,3	46,7	0,6	2,2	0,3	0,0	1 651,7	81,9	1,1	2,4
septembre	7,2												
octobre	146,4	21,1	1,4	19,3	14,4	1,0	5,3			6,3	25,6	1,7	4,1
novembre	200,9	6,2	0,3	1,5	32,1	1,6	1,7			1,5	19,0	0,9	0,8
décembre	96,8												
janvier	75,3			-			-			-			-
février	104,0			-	17,0	1,6	0,1			-	12,6	1,2	0,1
mars	141,1	1,5	0,1	0,1	52,3	3,7	0,2	1,5	0,1	0,1	51,6	3,7	0,4
avril	150,0	216,5	14,4	1,5	280,6	18,7	2,3	19,4	13,0	3,7	253,5	16,9	3,2
mai	127,5	58,8	4,6	1,4	132,4	10,4	0,3	68,0	5,3	0,2	144,1	11,3	0,4
1995-1996	1 049,2	304,2	4,6	24,0	528,7	8,1	10,0	355,1	4,4	11,9	506,5	7,7	9,0
moyenne	898,8	173,4	1,9	17,7	287,7	3,2	6,1	177,7	2,0	831,8	294,2	3,3	5,7

- : valeur non nulle

Tableau 3 - Moyennes mensuelles et annuelles, du ruissellement, du coefficient de ruissellement et de l'érosion. La Tola (1994-1996)

		Parcelle cultivée améliorée	Parcelle cultivée traditionnelle
Pluie (mm)	moyenne 1986-1991	685	
Ruissel. (m^3/ha)		146	417
KR (%)		2,1	6,1
Érosion (t/ha)		4,4	19,3

Tableau 4
Moyenne annuelle du ruissellement et de l'érosion (1986-1991)
La Tola

L'année 1995 se caractérise par des séries d'observations presque complètes et par des pluies nettement excédentaires (985 mm) alors que la sécheresse de 1994 s'est poursuivie jusqu'au mois de mars.

Pour l'année 1996, les observations s'interrompent à la fin du mois de mai. En ne considérant que les 5 mois d'observation, 1996 se place déjà parmi les années exceptionnelles par les valeurs du ruissellement et de l'érosion. En effet, ces valeurs dépassent celles observées entre 1986 et 1991 sur les parcelles cultivées améliorées et atteignent même celles des parcelles cultivées témoins.

En 1994 le seul mois où l'éroion est notable est celui de décembre qui est cependant nettement moins pluvieux que celui de novembre. Sur un sol remanié et émietté, le ruissellement et l'érosion ne peuvent se déclencher qu'après le développement de croûtes superficielles.

En 1995, la couverture végétale, qui s'est bien développée grâce aux pluies automnales de 1994, va progressivement perdre son effet protecteur au cours des 3 mois (décembre à début mars), durant lesquels les pluies ne dépassent pas 40 mm (5 mm seulement en janvier). Cependant, les fortes pluies de mars vont être sans effet érosif car elles peuvent s'infiltrer et reconstituer les réserves hydriques du sol. Les pluies d'avril et de mai, bien qu'égales ou inférieures à celles de mars, initient un ruissellement qui représente plus de 50 % du total annuel mais moins de 15 % de l'érosion (la parcelle P3 continue de ne pas ruisseler).

La saison des pluies d'automne débute en octobre. Le sol commence par perdre son état motteux de surface. Le 17 quand il est suffisamment humecté, débute le ruissellement et surtout l'érosion. Plus de 50 % des pertes annuelles se produisent durant le seul mois d'octobre où les terres sont le plus sensibles à l'érosion. Néanmoins, l'érosion affiche des valeurs admissibles : la perte est équivalente à une couche de 2 mm de sol. En novembre, les pluies sont maximales et le ruissellement reste élevé, mais les pertes en terre s'amenuisent avec le développement de la végétation (une avoine) qui sera malencontreusement pâturée à la fin du mois. La faible érosion de décembre est due à une préparation des terres en période de faibles pluies.

Durant le début d'année 1996, le ruissellement augmente avec l'accumulation de pluie. Il atteint un maximum en avril puis décroît, mais durant cette période excessivement pluvieuse, l'érosion reste moyenne.

L'analyse des résultats du tableau 5 montre que seul un petit nombre de pluies donne lieu à un ruissellement notable.

La parcelle P1 (pente de 12-15 pour cent sans aménagement) est celle qui ruisselle le moins avec la P3 (pente de 12-15 pour cent avec un muret de blocs de *cangahua*). Paradoxalement, la P2 (12-15 pour cent avec irrigation et culture précoce) et surtout la P4 (terrasse presque plane) donnent lieu à un fort ruissellement. Ces parcelles se caractérisent

en effet à la fois par un plus grand nombre d'événements ruisselants et par un coefficient de ruissellement supérieur pour chacune des pluies.

	P1	P2	P3	P4
nombre de pluies	19	23	16	30
m³/ha	340	570	350	590
classement	1	3	2	4

Tableau 5 - Ruissellement sur les parcelles La Tola (1994-1996)

Les périodes ou semaines pluvieuses, au cours desquelles les pluies se succèdent journellement, provoquent des ruissellements exceptionnels : en 1995, la 3e décade de mai et la 3e décade d'octobre, et en 1996, la 2e décade d'avril et la dernière décade de mai. Le processus étant amorcé, il peut se poursuivre avec des pluies inférieures à 10 mm/h sur les parcelles les plus ruisselantes. À partir du 20 mars 1996, les parcelles saturées réagissent à presque toutes les pluies.

Si le ruissellement est élevé, l'érosion est beaucoup plus limitée (tableau 6).

	P1	P2	P3	P4
nombre d'événements érosifs	3	3	3	4
tonnes/hectare	27	12	13	11
classement	4	2	3	1

Tableau 6
Erosion sur les parcelles
La Tola (1994-1996)

En 1995, P1 est la parcelle qui a donné lieu, pour une seule pluie (25 octobre 1995), à la plus forte érosion (19 t/ha), tandis que les 3 autres ont eu un meilleur comportement et des résultats globalement semblables. Mais en 1996, avec des différences faibles, ce sont les parcelles P3 et P4 qui s'érodent le plus.

Pour préciser les liaisons entre d'une part, la pluie (P), la quantité ruisselée (R), le coefficient de ruissellement (KR %), l'intensité maximale en 15 et 30 minutes (IM 15, IM 30) et, d'autre part, l'érosion (E) — somme des suspensions et des terres de fond — pour chaque parcelle, nous avons calculé les coefficients de corrélation linéaire.

Il ressort que les corrélations entre E et P, IM 15, IM 30 sont relativement faibles tout en étant du même ordre de grandeur. Avec R, les corrélations sont plus satisfaisantes sauf pour P2 où les conditions de simulation de l'irrigation ont dégradé les états de surface. En ce qui concerne le coefficient de ruissellement, celui-ci est une mauvaise variable explicative sauf sur la P3. La faiblesse des corrélations sur la P2 et la P4 exprime que l'effet couverture du sol ou l'absence de pente agissent en limitant non seulement le ruissellement mais encore sa capacité de transport (compétence).

Ces résultats montrent que:

- le contrôle des événements exceptionnels est important ;
- P2 et surtout P4 montrent des valeurs de coefficient anormalement élevées dans une zone écologiquement déficitaire. On ne peut que préconiser une meilleure technique d'irrigation par aspersion pour limiter les phénomènes de réarrangements superficiels qui ferment des sols et permettent le ruissellement ;
- P4 est une parcelle qui s'inonde et se sature. Sa structure fragile se détruit anormalement vite. Il y aurait lieu de lui donner un peu de pente et de procéder à des sarclages

après chaque période pluvieuse importante ce qui est tout à fait réalisable à partir de février quand les pluies reprennent avec une végétation bien installée.

La station de Cangahua

L'analyse des résultats fait ressortir que la première saison pluvieuse de l'année 1994-1995 est à peu près inexistante et qu'elle n'a donc provoqué ni ruissellement ni érosion. Les résultats sont répertoriés dans le tableau 7 et comparés à ceux de la période 1986-1991 présentés dans le tableau 8, comme cela a été fait pour la station de La Tola.

Les 3 derniers mois de 1994 bien que normalement pluvieux, et les 2 premiers de 1995 ne montrent ni érosion ni ruissellement notables (tableau 7).

mois	pluie (mm)	Parcelle 1			Parcelle 2			Parcelle 3		
		Qr (m^3/ha)	Kr mois (%)	Er (m^3/ha)	Qr (m^3/ha)	Kr mois (%)	Er (m^3/ha)	Qr (m^3/ha)	Kr mois (%)	Er (m^3/ha)
septembre	5,6									
octobre	52,8									
novembre	119,6									
décembre	38,8	2,2	1,3		1,7			2,9	-	
janvier	4,9									
février	31,8									
mars	161,3	6,0	1,5	0,2	6,0	1,5	0,1	6,0	1,5	0,1
avril	161,6	5,0	1,1	-	4,5	1,0	0,1	5,0	1,1	-
mai	100,1	23,4	4,5	1,1	21,9	4,2	0,6	19,4	3,7	0,6
juin	27,6	17,0	7,8	0,4	7,0	3,2	0,2	5,0	2,3	0,1
juillet	20,2									
août	26,1									
1994-1995	750,4	53,7	1,5	1,7	41,1	1,1	1,0	38,3	1,0	0,8
septembre	7,2									
octobre	146,4	5,8	1,6	0,1	16,5	1,9	-	5,3	1,5	-
novembre	200,9									
décembre	96,8	10,0	2,8		10,0	2,8	-	3,0	0,8	-
janvier	75,3	8,2	0,8	0,2	4,9	0,5	0,1	4,9	0,5	-
février	104,0	7,1	1,0	0,1	2,1	0,3	0,4	1,1	0,2	-
mars	141,1	6,7	0,5	0,1	2,7	0,2	-	3,2	0,2	-
avril	150,0	5,2	0,6	0,3	3,4	0,4	-	10,0	1,1	0,1
mai	127,5	32,7	2,6	1,5	16,6	1,3	0,7	24,9	2,0	0,2
1995-1996	1 049,2	75,6	1,1	2,4	46,1	0,7	1,3	52,3	0,8	0,4
moyenne	898,8	64,6	1,2	2,1	43,6	0,6	1,1	45,3	0,9	0,6

- : valeur non nulle

Tableau 7 - Moyennes mensuelles et annuelles du ruissellement, du coefficient de ruissellement et de l'érosion. Cangahua (1994-1996)

Le ruissellement débute en mars et se poursuit jusqu'au début du mois de juin mais l'érosion reste faible. Celle-ci n'apparaît qu'en mai et en juin avec une période de pluies régulières durant laquelle elle représente les 3/4 des pertes annuelles. La saison pluvieuse 1995-1996 débute en octobre mais n'est marquée par aucun événement important. l'année 1996 démarre sans qu'il y ait eu de véritable « été de Noël ». Les 4 premiers mois donnent lieu chacun à un ruissellement de 5 à 10 m^3 selon les parcelles, tandis que le dernier mois

d'observation (mai) fournit, pour une pluviosité comparable, un ruissellement équivalent à ces 4 mois réunis. L'érosion correspondante est faible (2 t/ha) pour la parcelle P 1. La moitié de cette quantité intervient pendant le seul mois de mai.

À Cangahua, où la période d'observations ne comprend que des années de pluviosité inférieure ou égale à la normale sans événement exceptionnel, le ruissellement et l'érosion sont faibles.

Ils sont inférieurs à ceux de La Tola (5 fois moins de ruissellement et 2 fois moins d'érosion). Les pluies capables de les déclencher sont comprises entre 7 et 23 mm/h et sur toute la période d'observation, seules quelques pluies sont efficaces et capables de donner lieu à un ruissellement supérieur à 1 m^3.

La parcelle P2 (irriguée, à démarrage précoce des cultures) est celle qui ruisselle le moins suivie de près par la P3 (pente de 15 pour cent avec muret de *cangahua*). La P1 (pente de 15 pour cent sans aménagement) montre que les événements ruisselants sont à peine plus nombreux mais un peu plus importants.

L'érosion est très réduite ce que montre le tableau 8 dans lequel on a choisi de ne comptabiliser que les érosions supérieures à 0,5 t/ha.

		Parcelle cultivée améliorée	Parcelle cultivée traditionnelle
Pluie (mm)	moyenne 1986-1991	535,5	
Ruissel. (m^3/ha)		9	65
KR (%)		0,2	1,2
Érosion (t/ha)		0,3	3

Tableau 8
Moyenne annuelle du ruissellement et de l'érosion Cangahua (1986-1991)

	P1	P2	P3
Nombre de pluies	17	16	16
Ruissel. (m^3/ha)	129	87	91
Classement	3	1	2

Tableau 9
Ruissellement sur les parcelles. Cangahua (1994-1996)

	P1	P2	P3
Nombre d'événements érosifs	3	1	1
t/ha	4	3,3	1,2
Classement	3	2	1

Tableau 10
Erosion sur les parcelles. Cangahua (1994-1996)

Encore ici on peut souligner l'efficacité de l'aménagement avec des blocs de *cangahua* pour limiter l'érosion.

Les relations liant les différents paramètres de l'érosion sont très ténues et comme dans le cas de La Tola, c'est le coefficient de ruissellement qui explique le moins mal l'érosion. Ceci étant et en excluant P2 compte tenu d'un protocole particulier, les corrélations sont plus satisfaisantes entre E et IM 15, IM 30 qu'entre E et P.

Malgré le manque de résultats significatifs à Cangahua. on peut affirmer que le traitement P3 est le plus efficace pour réduire l'érosion. À Cangahua, l'expérience prouve que l'érodibilité des sols est assez forte et qu'il pourrait être judicieux de considérer les pluies à partir de 7 mm/h.

CONCLUSION

La *cangahua* réhabilitée montre une forte susceptibilité à l'érosion hydrique malgré une agressivité climatique modérée (R_{USA}) de 80 à 100 et des pentes de 15 pour cent. À La Tola, une érosion moyenne annuelle de 19 t/ha a été observée sans aménagement anti-érosif, mais elle est seulement de 7,5 t/ha avec pré-irrigation, de 8 avec muret et enfin de 6,5 avec des terrasses. À Cangahua, l'érosion est beaucoup plus faible : seulement de 2,2 t/ha sans aménagement, de 1,2 avec pré-irrigation et de 0,5 avec murets.

Le ruissellement total est deux à trois fois plus élevé à La Tola où la capacité d'entraînement de l'eau (ruisselée/érosion) est nettement plus importante et les aménagements favorisant la formation de croûtes structurales montrent les plus forts taux de ruissellement sans entraîner pour autant une augmentation de l'érosion. Ces résultats confirment ceux obtenus durant la période 1986-1991 sur ces mêmes sites.

À La Tola et à Cangahua, les résultats montrent que les aménagements choisis réduisent de façon significative l'érosion ; le facteur varie de 2 à 5 selon leur nature, l'année et la station. Il est plus difficile de limiter le ruissellement qui est le moteur de l'érosion. Ce sont donc les aménagements favorisant l'infiltration qui sont utiles et avant tout, ceux qui assurent une structure stable et ouverte en période pluvieuse. Dans les zones délicates, les bandes enherbées absorbantes peuvent remplir ce rôle. En conclusion c'est l'aménagement de type P3, avec muret de *cangahua*, qui semble le plus intéressant car à la fois efficace et peu coûteux : de l'ordre de 600 FF la première année en incluant frais d'installation et d'entretien. Ce coût est divisé par 3 les années suivantes. En conséquence, ces 2 années d'observation confirment les travaux antérieurs : il semble bien que ce type

Referencias bibliográficas

ALMEIDA, G.; DE NONI, G. *et al.*, 1984: Los principales procesos erosivos en Ecuador, PRONAREG-PRONACOS-ORSTOM, Quito, 31 p. + 1 mapa a escala 1:1'000.000.

CUSTODE, E.; DE NONI, G.; TRUJILLO, G.; VIENNOT, M., 1992: La cangahua en el Ecuador: caracterización morfo-edafológica y comportamiento frente a la erosión, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 332-346 .

DE NONI, G.; TRUJILLO, G.; VIENNOT, M., 1986: L'érosion et la conservation des sols en Équateur, dans *Cahiers ORSTOM*, Série Pédologie, Vol. XXII, 2, p. 235-245.

DE NONI, G.; VIENNOT, M.; TRUJILLO, G., 1989-1990: Mesures de l'érosion dans les Andes de l'Équateur, dans *Cahiers ORSTOM*, Série Pédologie, Vol. XXV, N° 1-2, Paris, p. 183-196.

DE NONI, G.; VIENNOT, M.; TRUJILLO, G., 1997: *L'homme, la montagne et l'érosion des sols cultivés. Cas des Andes équatoriennes (Amérique du Sud)*, ORSTOM Montpellier, 200 p, 16 cartes, 20 tab., 38 fig., annexes (sous presse).

POURRUT, P., 1983: Los climas del Ecuador. Fundamentos explicativos, en *Documentos de investigación*, N° 4, CEDIG-ORSTOM, Quito, p. 8-43.

POURRUT, P., 1994: *L'eau en Équateur, Principaux acquis en hydroclimatologie*, ORSTOM, Paris, 147p.

ZEBROWSKI, C.; PRAT, C.; ETCHEVERS, J.; ARIAS, H.; MIRANDA, M. E., 1992: *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, 572 p.

Erodibility of Volcanic Ash Soils in the Central Mexican Highlands

Jürgen BAUMANN, Gerd WERNER

Abstract

Erodibility of two reclamated tepetates, *one Chromic Cambisol and three hardened* tepetates *was calculated as average soil loss per EI_{30}-erosivity unit according to the USLE after four years (1991 - 1994) of erosion measurements. The* tepetates *are characterised by a low to very low erodibility having K-factors between 0,13 and 0,02. The K-factors for the reclamated* tepetates *amount between 0,27 and 0,32. They indicate a medium erodibility compared with the Cambisol having a K-factor around 0,09. A good relation between erodibility and aggregate stability measured with the percolation method was found.*

Keywords: *Soil Loss - Rainfall Erosivity - K-factor - Erodibility - Aggregate Stability - Percolation Method*

INTRODUCTION

Considering land reclamation measurements like deep loosening of hardened volcanic ash soils estimation of erodibility provides basic information for further landuse and adequate management system planning. Moreover it can lead to a better understanding of the erosion dynamics and processes in a specific region. Pla Sentis (1994) stated that there is a lack of basic climate and soil related data in tropical regions, both in quantity and quality, which are required for reliable assessment of risks of crop production under certain climatic conditions. Concerning the susceptibility of a soil to erosion, the K-factor of the USLE is derived both from direct soil loss and rainfall measurements. It is a quantitative measure of soil loss. Although the K-factor can be estimated using a nomogram or the equation developed by Wischmeier *et al.* (1971) soil erodibility is most accurately determined by direct soil loss measurements with natural rainfall (Lal, 1988). The erodibility of soils in the tropics varies widely. An overview done by Lal (1984) showed K-factor values from nearly 0 to as high as 0.67.

The following paper presents results of a research work conducted in the state of Tlaxcala in the Central Mexican Highland, concerning the erodibility of *tepetates* (indurated volcanic ash soils) and reclamated *tepetates* in comparison to a widespread Cambisol. The soil loss was measured on erosion plots under natural rain over a four year period between 1991 and 1994. This provided a data base between 80 and 140 erosive events. In view of the time consuming erosion measures under natural rainfall conditions

many attempts were undertaken to estimate erodibility of soils by simple tests (Bergsma, 1986, Bryan, 1976). Although soil erodibility is affected by many soil properties, textural and structural characteristics seems to be the most important factors (Roemkens *et al.*, 1986). Two aggregate stability indices were tested and compared with the results (K-factors) obtained by erosion measurements.

SITE DESCRIPTION

The state of Tlaxcala (3,914 km^2) is situated in the eastern section of the Central Mexican Highland. The southern area of the state forms part of the valley of Puebla-Tlaxcala. It is separated from the valley of Mexico by the Sierra Nevada. The northern boundary of the valley is marked by the blocks of Tlaxcala and Huamantla which cross the state in west-east direction. The blocks reaches hight of about 2,550 - 2,700 m.a.s.l. They form the center of the state. All sites where investigations were conducted are located in this area. The climate is characterized by a summer rainy season extending from May to October. The average annual rainfall is about 600 mm - 700 mm. With a mean annual temperature of 15 - 17 °C and 5-6 humid months the climate is semiarid (Lauer & Stiehl, 1973). The soils are often characterized by pedogenetic silica-acid enrichment in the subsoil. The formation of so called *tepetates* result from the exposure of the silica-rich subhorizon at the surface after erosion of the topsoil. The exposed subsoil harden irreversible. More than 15 % of the surface of the state is covered by these indurated volcanic ash soils. For about 20 years the government of Tlaxcala is reclamating *tepetates* by deep-loosening under a land reclamation program.

MATERIALS AND METHODS

Erosion studies were conducted on three sites in the block of Tlaxcala. Runoff and soil loss under natural rainfall were measured on two reclamated *tepetates*, three *tepetates* and an Chromic Cambisol. Rainfall was measured with 24-hour-recording rain gauges. The scale of the register-stripes was 16 mm/h and 8 mm/1 mm rain amount. Erodibility was calculated as the average soil loss per EI_{30}-erosivity unit according to the USLE (Wischmeier & Smith, 1978). The following erosion plots were installed:

Site

Tlalpan:	2 plots on a reclamated Tepetate (22 m * 2 m, Wischmeier standard): **TR1/bare fallow**, **TR1/maize**
	1 plot on a hardened tepetate: **T1** (3 m * 2 m)
El Carmen:	2 plots on reclamated Tepetates (22 m * 2 m, Wischmeier standard): **TR2/bare fallow**, **TR2/maize**
	1 plot on a hardened tepetate: **T2** (3 m * 2 m)
Matlalohcan:	2 plots on a Chromic Cambisol: **CAM/bare fallow** (Wischmeier standard), **CAM/natural vegetation** (10 m * 2 m)
	1 plot on a hardened tepetate: **T3** (6 m * 2 m)

Particle size analysis

10 g of a humus and carbonate free soil sample was pretreated twice with dithionite/citrate (Mehra & Jackson, 1960) for deferration. Subsequently the samples were washed with deionised water in a centrifuge (5,000 rpm). The air dried samples were dispersed by shaking overnight with 25 ml of 0,4 N sodium-hexametaphosphate (Calgon). The particle size fractions between 2 mm - 0,02 mm were obtained by wet

sieving. For the pipett analysis (fractions < 0,02 mm) a pH of 8,2 was adjusted with 0,01 N sodium hydroxide.

Aggregate stability

- The **percolation method** according to Sekera & Brunner (1943) is mainly known and used in Germany. Modified by Becher & Kainz (1983) the method became a renaissance within the last ten years. Air dried aggregates with diameter from 1 to 2 mm were placed in a glass tube (length: 10 cm; diameter: 15 mm) and percolated with deionised water at a pressure of 20 cm water column. The percolation was interrupted after 10 minutes. The hight of percolation rate was taken as a measure for aggregate stability, whereas a high percolation rate indicate a high aggregate stability.
- The water stability of soil aggregation was evaluated by the **wet sieving method** according to Hartge & Horn (1989). The results were expressed as the change of the weighted medium diameter of the aggregates (Δ WMD). Here, low values indicated a high aggregate stability.

Statistical analysis

The relation between precipitation/erosivity parameters and soil loss were described by correlation and regression analysis. The following parameters were tested:

- rain amount, rainstorm energy, rainstorm peak intensity, maximum 10-, 15-, 20- and 30- minutes-intensities.
- products of rainstorm energy and intensities (EI_{10}, EI_{15}, EI_{20}, EI_{30}, R-factor according to Wischmeier (1978).
- AI_{1m} erosivity index according to Lal (1976).

The analysis was done by the statistic program COSTAT (CoHort Software, 1990).

RESULTS AND DISCUSSION

Erosion studies

Soil loss in t/ha on the different erosion plots, annual precipitation and annual erosivity measured in the four year period from 1991 to 1994 are shown in table 1.

The annual rain erosivity (EI_{30}) varied from 110 N/h to 390 N/h. In spite of these low to medium values individual high erosive storms occured. These storms are characterized by high EI_{30}-values and/or high intensities (rain amount: 62 mm; EI_{30}: 155 N/h; peak intensity: 162 mm/h). For storms with rain amount > 15 mm the peak intensities varied from 11 mm/h to 162 mm/h. The highest 30-minutes-intensity of an individual storm was 91 mm/h.

Semiarid regions are characterized by an extreme variability of rainfall in time and space. Both in rain amount as well as in rain erosivity the variability of high erosive storms can cause great differences at very small distances (Renard & Simanton, 1975). In 1994 on the Tlalpan site the most erosive storm with a rain amount of 67,1 mm had a erosivity of 147,4 EI_{30}-units (N/h). At a distance of about 1 km the same storm produced 43,1 mm with an erosivity of only 52,0 EI_{30}-units (N/h). Although the annual rain amounts from 1991 to 1993 on site 1 (Tlalpan) and site 2 (El Carmen) varied only little, the annual EI_{30}-values were clearly different (table 1).

Soil loss occured mainly during high erosive storms and storms over a period of several days as a consequence of erosive rainfall accumulation. For example, in 1991 at

plots		1991	1992	1993	1994
TR 1 (bare fallow)	(t/ha)	128	106	109	71
TR 1 (maize)	(t/ha)	26	2	0.5	0.9
T1 (Tepetate)	(t/ha)	43	57	37	32
rain amount	(mm)	803	793	663	719
EI_{30} (all events)	(N/h)	376	272	211	434
EI_{30} (events > 12,5 mm)*	(N/h)	301	196	151	390
TR 2 (bare fallow)	(t/ha)	90	104	76	63
TR 2 (maize)	(t/ha)	24	5	25	0.8
T2 (Tepetate)	(t/ha)	7	8	11	9
rain amount	(mm)	779	758	642	627
EI_{30} (all events)	(N/h)	253	182	289	221
EI_{30} (events > 12.5 mm)*	(N/h)	157	110	257	149
CAM (bare fallow)	(t/ha)	49	43		
CAM (maize)	(t/ha)	0.3	0.1		
T3	(t/ha)	9	8		
rain amount	(mm)	775	678		
EI_{30} (all events)	(N/h)	424	412		
EI_{30} (events > 12.5 mm)*	(N/h)	369	370		

* Σ EI_{30} (N/h) for storms with rain amount > 12.5 mm: erosivity according to Wischmeier

Table 1 - Soil loss (t/ha), annual rain amounts (mm), annual erosivity (EI_{30} in N/h) at three sites (Tlalpan., El Carmen, Matlalohcan) in the block of Tlaxcala

the Tlalpan site three rain accumulations caused 92 % (maize), 82 % (bare fallow) and 69 % (*tepetates*) of total annual soil loss. Over a period of one week five storms each of 20 mm and more were registered, although in the whole rainy season only seven storms greater 20 mm occured. These five storms caused 64 % (maize), 58 % (bare fallow) and 49 % (*tepetate*) of soil loss. Nonetheless there is a high «interstorm variability» in the sense of Romero-Díaz *et al.* (1988) regarding the erosive efficacy of individual storms.

Statistical anlaysis

Calculation of regression equation is based on a linear relation between the variables. By graphical presentation it is possible to test how the equation is fitted to the data. For the bare plots as well as for *tepetates* the graphs showed that the equations were fitted by an accumulation of data points in the intersection of x-axis and y-axis and some few data points in the middle and upper part of the graph (figure 1).

As a consequence, both the x-data and the y-data were logarithmically transformed on the assumption of an exponential relation like y = axb (Köhler *et al.*, 1984) between erosivity and soil loss. Figure 2 show that the logarithmically transformed data are well described by the linear equation.

On the bare fallow plots as well as on the tepetates soil loss was best correlated with the EI_{30}, EI_{20}, EI_{15} and EI_{10} erosivity indices (table 2). The correlation coefficents for these indices showed only small differences. In contrast, on the plot with natural

vegetation soil loss was most better explained by the peak intensity of storms (I_{max}: r = 0.677). On the maize-plots combined energy-intensity and simple intensity parameters did not show great differences.

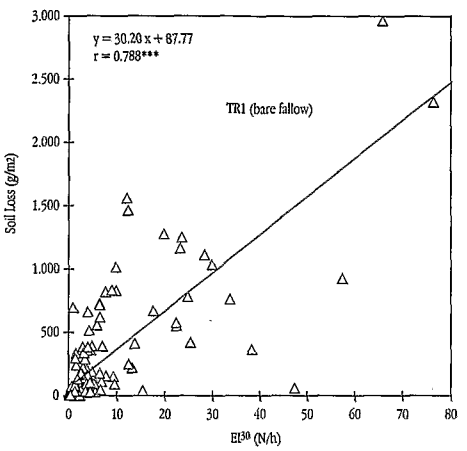


Figure 1 - Pearson correlation coefficient r and regression equation for the relation: EI_{30} ↔ soil loss on the TR1 bare fallow plot

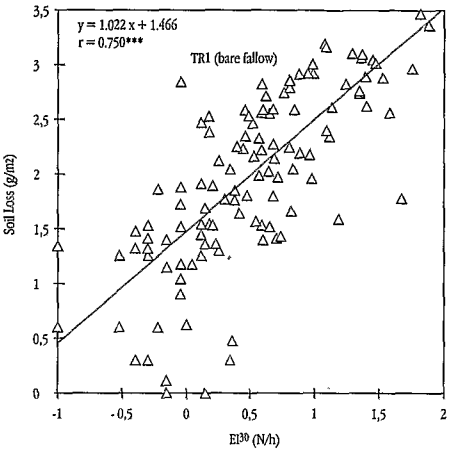


Figure 2 - Pearson correlation coefficient r and regression equation for the relation: log EI_{30} ↔ log soil loss on the TR1 bare fallow plot

Table 2
Pearson correlation coefficients (r) for the relation EI_{30} ↔ soil loss, and exponential regression equations, obtained by retransformation of the linear equations (figure 2)

soil loss (y) ↔ EI_{30} (x)			
plot	r	equation	n
TR1/bare fallow	0.750	$y = 29.24\ x^{1.022}$	117
TR1/maize	0.529	$y = 2.71\ x^{0.728}$	47
TR2/bare fallow	0.805	$y = 22.38\ x^{1.15}$	129
TR2/maize	0.445	$y = 2.824\ x^{0.946}$	40
CAM/bare fallow	0.790	$y = 9.571\ x^{0.943}$	81
CAM/natural vegetation	0.442	$y = 0.729\ x^{0.309}$	28
T1	0.834	$y = 17.21\ x^{0.921}$	140
T2	0.701	$y = 6.053\ x^{0.691}$	124
T3	0.725	$y = 5.395\ x^{0.632}$	92

Texture

Particle size analysis of volcanic ash soils results very difficult because of the content of amorphic substances like allophan and silic acid. Complete dispersion of these substances are often very difficult. So the interpretation of texture depends largely on the method used for pretreatment. Therefore Miehlich (1985, 1991) tested various pretreatment methods which try to disperse soils rich in amorphic substances. Of the methods

compared treatment with Na-hexametaphosphate after Moll (cited in Grez, 1977) yielded in the best results. Miehlich himself proposed a method to overcome the specific difficulties by removing the amorphous substances with 0,5 N sodium-hydroxide prior to dispersion. Considering the *tepetates* (toba-sediments) he obtained clay contents between 36 and 64 % by his own method, whereas clay contents after the method of Moll ranged from 20 to 48 %. This is in accordance to our own results presented in table 3. The texture of TR1 is a silt loam whereas the texture of TR2 is a loam. The Chromic Cambisol has a sandy loam texture.

	sand (0.063 - 2 mm)				silt (0.063 mm - 0.002 mm)				clay
	coar.	med.	fine	total	coar.	med.	fine	total	
TR1	0.7	12.5	24.9	38.1	15.9	11	8.1	35	26.9
TR2	4.9	14.4	25.6	44.9	16.3	10.8	6.3	33.4	21.6
CAM	0.6	19.4	42.4	62.4	16.7	5.8	3.5	26.7	11.5

Table 3
Particle size distribution (%) of the fine earth (< 2 mm)

Erodibility (K-factors) and aggregate stability

The K-factors determined after 4 years of measuring soil loss and rain erosivity are presented in table 4. According to the classification system of Goldsmith (1977) the reclamated *tepetates* are characterized by a medium erodibility, whereas the K-factor for the Chromic Cambisol indicates a low erodibility.

	Erodibility	number of erosive events (n)	Aggregate stability	
	K-factor*		percolation rate (ml)	Δ WMD
TR1	0.27	117	307	3.38
TR2	0.32	129	176	3.00
CAM	0.09	81	1,392	1.29
T1	0.13	140		
T2	0.03	124		
T3	0.02	92		

*: US-units (ton * acre * hour)/(acre * tonf * inch) (Foster et al., 1981)

Table 4
Erodibility (K-factors) and aggregate stability

Erodibility of *tepetates* amounts low to very low. Compared to T2 and T3 the higher K-factor of T1 may be explained by the great variation according to physical properties like strength, bulk density, hydraulic conductivity and cementation grade of different *tepetate* types (cited in Baumann, 1996).

Various authors reported that aggregate stability is often a good index to describe the susceptibility of soils to erosion (Bernard *et al.*, 1989; De Ploey & Poesen, 1985; Egashira *et al.*, 1983; El Swaify & Dangler, 1977; Jaieyoba & Ologe, 1990). The own results indicated a good relation between erodibility and aggregate stability. Here, the results of wet sieving method as well as percolation method show a significantly higher aggregate

stability of the Chromic Cambisol in comparison to the reclamated *tepetates* (table 4). Between the *tepetates* only the results of the percolation method indicated a higher stability of TR1, which is in accordance to the grade of K-factors. Especially for medium textured soils with a high susceptibility to slaking the percolation method obtained good results (Hövelmann & Franken, 1993; Sigrist *et al.*, 1994). Results from investigations on aggregate stability for different soils in North Cameroon (Breuer, 1994) showed a good correlation between percolation stability and texture. The most labile soil with a percolation rate of 1,480 ml was a Alfisol with a sandy loam texture.

CONCLUSION

Regarding land use recommendations for reclamated tepetates management must take into consideration effective erosion control measures in spite of their erodibility. Estimation of K-factors is based on a relatively high number of erosive events. Although Roose (1980) proposed that erosion measurements with natural rainfall in tropical regions should be conducted at least over a period of five years, it can be stated that the susceptibility to erosion of *tepetates* is higher than of the Cambisol. In view of the good relation between erodibility and aggregate stability further investigations should be done with the aim to estimate erodibility of volcanic ash soils in the state of Tlaxcala by a simple test like the percolation method.

Statistical analysis showed that Wischmeier EI_{30}-factor is a good parameter to characterize rainfall erosivity in the studied area. Nevertheless soil loss under natural vegetation is better explained by simple intensity parameters.

References

BAUMANN, J., 1996: *Die Wirkung der Tieflockerung auf Erodierbarkeit und Ertragspotential verhärteter Vulkanascheböden im Staat Tlaxcala/Mexiko*, Boden und Landschaft, Bd. 10, 208 p.

BECHER, H. H.; KAINZ, M., 1983: Auswirkungen einer langjährigen Stallmistdüngung auf das Bodengefüge im Lößgebiet bei Straubing, *Zeitschrift für Acker und Pflanzenbau*, 152, p. 152-158.

BERGSMA, E., 1986: Development of Soil erosion by Simple Tests, in *Soil erosion in the European Community - Impact of Changing Agriculture*, Chisci, G. & Morgan, R. P. C. (Editors), A. A. Balkema, Rotterdam, Boston, p. 213-223.

BERNARD, M.; SCHWERTMANN, U.; BREUER, J.; KNOBLOCH, C., 1989: *Erodibility of selected tropical soils. Soil Erosion Studies in the Humid Tropics of Nigeria and Cameroon*, Unpublished Paper, Institut für Bodenkunde der TU München-Weihenstephan.

BREUER, J., 1994: *Soil Conservation Studies in the Sudan-sahelian Savanna of Northern Cameroon*, Final report to GTZ and IITA, 63 p.

BRYAN, R.B., 1976: Considerations on Soil Erodibility Indices and Sheetwash, in *Catena*, 3, p. 99-111.

DE PLOEY, J.; POESEN, J., 1985: Aggregate Stability, Runoff Generation and Interrill Erosion, in *Geomorphology and soils*, Richard, K. S., Arrett, R. R. & Ellis, S. (Editors), p. 99-120.

EGASHIRA, K.; KAETSU, Y.; TAKUMA, K., 1983: Aggregate Stability as an Index of Erodibility of Ando Soils, in *Soil Sci. Plant Nutr.*, 29, p. 473-481.

EL SWAIFY, S. A.; DANGLER, E. W., 1977: Erodibilities of Selected Tropical Soils in Relation to Structural and Hydrologic Parameters, in *Soil Erosion: Prediction and Control*, SCSA Special publication No. 21, Ankeney, Iowa, p. 105-114.

FOSTER, G. R.; MCCOOL, D. K.; RENARD, K. G.; MOLDENHAUER, C. W., 1981: Conversion of the Universal Soil Loss Equation to SI Metric Units, in *J. Soil Water Cons.*, 36, p. 355-359.

GOLDSMITH, P.F., 1977: A Practical Guide to the Use of the Universal Soil Loss Equation, Unpublished BAI Techn. Monogr. (34 p.), in LANDON, J.R., 1991: *Booker Tropical Soil Manual. A Handbook for Soil Survey and Agricultural Land Evaluation in the Tropics and Subtropics*, Longman, Hong Kong.

GREZ, R., 1977: *Nährelementhaushalt und Genese von Böden aus vulkanischen Aschen in Südchile*, (Tesis de doctorado, Universidad de Freiburg), Freiburger Bodenkundl. Abhandl., Heft 6, Freiburg im Breisgau, 117 p.

HARTGE, K. H.; HORN, R., 1989: *Die physikalische Untersuchung von Böden*, Stuttgart, 175 p.

HÖVELMANN, L.; FRANKEN, H., 1993: Einfluß von Fruchtfolge und Bodenbearbeitung auf die Stabilität oberflächennaher Bodenaggregate rekultivierter Böden aus Löß. Mitteilgn, in *Dtsch. Bodenkundl. Ges.*, 72, p. 127-130.

JAIYEOBA, I. A.; OLOGE, K. O., 1990: Soil Erodibility Measurements in Nigeria, in *Z. Geomorph. N.F.*, 34, p. 307-312.

KÖHLER, W.; SCHACHTEL, G.; VOLESKE, P., 1984: *Biometrie. Einführung in die Statistik für Biologen und Agrarwissenschftler*, Heidelberger Taschenbücher, Bd. 234, Springer, Berlin und Heidelberg, 255 p.

LAL, R., 1976: Soil Erosion on Alfisols in Western Nigeria, III. Effects of Rainfall Characteristics, in *Geoderma*, 16, p. 389-401.

LAL, R., 1988: Erodibility and Erosivity, in *Soil erosion research methods*, LAL, R. (Editor), Soil and Water Conservation Society, Ankney, Iowa.

LAL, R., 1990: *Soil Erosion in the Tropics. Principles and Management*, McGraw-Hill Inc., New York, 580 p.

MIEHLICH, G., 1991: *Chronosequences of Volcanic Ash Soils*, Hamburger Bodenkundl. Arbeiten, 15, 207 p.

PLA SENTIS, I., 1994: Soil Degradation and Climate-induced Risks of Crop Production in the Tropics, in *Transactions of the 15th Congr. ISSS*, Acapulco, México, Vol. 1, p. 163-188.

RENARD, K. G.; SIMANTON, J. R., 1975: Thunderstorm Precipitation Effects on the Rainfall-Erosion Index of the Universal Soil Loss Equation. Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest, in *American Water Resources Association. Proceedigs of April 11-12 Meeting*, Tempe, Arizona, 5, p. 47-55.

ROEMKENS, M.; PRASAD, S. N.; POESEN, J., 1986: Soil Erodibility and Properties, in *Trans of the 13th Congr. ISSS*, Hamburg, Vol. 5, p. 492-503.

ROMERO-DÍAZ, M. A.; LÓPEZ-BERMÚDEZ, F.; THORNES, J. B.; FRANCIS, C. F.; FISHER, G. C., 1988: Variability of Overland Flow Erosion Rates in a Semiarid Mediterranean Environment under Mattoral Cover. Murcia, Spain, in *Catena Suppl.*, 13, p. 1-11.

SEKERA, F.; BRUNNER, A., 1943: Beiträge zur Methodik der Gareforschung, in *Z. Pflanzenernähr. Bodenkde.*, 74, p. 169-212.

SIGRIST, S.; SCHAUB, D.; PFIFFNER, L.; BERNER, A., 1994: Einfluß unterschiedlicher Anbauintensitäten auf Regenwurmbesatz und Erodierbarkeit eines Lößbodens der NW-Schweiz, in *Aktuelle Bodenforschung in der Schweiz*, BGS Dokument, 5, p. 19-24.

WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C. B.; CROSS, B. V., 1971: A Soil Erodibility Nomograph for Farmland and Construction Sites, in *J. Soil Water Cons.*, 26, p. 189-193.

WISCHMEIER, W. H.; Smith, D. D., 1978: *Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning*, USDA Agriculture Handbook No. 537, Washington, 58 p.

Erosión hídrica en un suelo volcánico endurecido (tepetate t3) en el bloque de Tlaxcala, México

Ulrich Fechter-Escamilla, Andrea Vera, Gerd Werner

Abstract

This study identified the erosion rate in farmers' fields of rehabilitated volcanic ash soil (tepetate *t3) after 6 years. The fields have been managed in an optimum manner. The observations were accompanied by continuous registers of erosion determining parameters like surface roughness or volumetric water content. Different tillage techniques for maize were compared: traditional tillage and reduced tillage with and without vegetative cover. The soil erosion rate varied between 3.7 t/ha in reduced tillage without vegetative cover, 3.0 t/ha in traditional tillage, and 2.3. t/ha in reduced tillage with vegetative cover. These rates can be considered minimum reachable rates, with optimum terrace design and post-management. This is confirmed by the fact that the year studied was relatively poor in erosion with a R-factor of 167 N/h.*

Keywords: *Erosion - Indurated Volcanic Ash Soils - Mexico - Reduced Tillage - Maize*

INTRODUCCIÓN

En México abundan suelos degradados de tipo tepetate, que se originaron de cenizas volcánicas y en ello influyó la erosión hídrica. Esta dejó en la superficie un horizonte endurecido que apenas permite un desarrollo mínimo de la vegetación natural y por consiguiente impide el uso agrícola. Con un subsoleo profundo, utilizando maquinaria pesada, este suelo puede ser recuperado, creándose un *anthrosol* con condiciones óptimas para la agricultura. El beneficio que puede obtenerse de estas operaciones de rehabilitación depende, además de las circunstancias socioeconómicas, de los siguientes factores:

- La productividad del suelo recreado está ligada a varios factores como la profundidad enraizable, la capacidad de almacenamiento de agua, la actividad edáfica y microbiana y el balance de nutrientes. Estas características son determinadas por la naturaleza del material rehabilitado, la calidad del subsoleo y finalmente el uso posterior a la rehabilitación.
- Después de la rehabilitación, se enfrentan nuevamente procesos de degradación, como la erosión hídrica o el endurecimiento (*hard setting*), cuyo efecto en la productividad es muy importante para la utilidad de las acciones de rehabilitación.

Partiendo de la hipótesis de que la erosión hídrica es el principal proceso de degradación, que pone en peligro la sustentabilidad de las acciones de rehabilitación, se están realizando estudios del proceso erosivo en tepetate rehabilitado en el estado de Tlaxcala (Baumann *et al.*, 1992). Como el maíz, cultivo principal en esta zona, tiende a fomentar la erosión, desde hace varios años se ha intentado desarrollar en él acciones de conservación. En el presente estudio se analiza el proceso erosivo en un tepetate (t3) rehabilitado bajo labranza tradicional y reducida con y sin cobertura vegetal. Los efectos en la productividad se presentan en Fechter-Escamilla (1997).

MATERIAL Y MÉTODOS

En Santiago Tlalpan (municipio de Hueyotlipan), el sitio experimental está localizado en el bloque de Tlaxcala. Las parcelas de escurrimiento se encuentran sobre un tepetate t3 rehabilitado seis años atrás. Se formaron terrazas de 1.200 a 1.500 m^2 de superficie con una profundidad entre 35 y 70 cm y una pendiente diagonal del 3 por ciento. La nivelación de las terrazas es óptima con bordos bien estabilizados. Se estableció una población de maíz de 45.000 plantas/ha en surcos a una distancia de 80 cm.

Las mediciones se hicieron en cinco lotes de tepetate t3 rehabilitado y en un lote de tepetate t3 desnudo:

	Tratamientos		Area (m^2)	Clave
1	Tepetate desnudo	ningún manejo	6	TC
2	Tepetate rehabilitado sin vegetación	aradura y tres veces control de maleza con herbicida	44	TCR/sv
3	Tepetate rehabilitado con vegetación, cultivo de maíz tradicional	aradura, surcado, siembra de maíz cruzando la pendiente con pala, dos aporques	44	TCR/cv
4	Tepetate rehabilitado, labranza tradicional, cultivo de maíz	aradura, surcado, siembra de maíz en surcos con pala, un aporque	1.200	LT
5	Tepetate rehabilitado, labranza reducida sin cobertura vegetal, cultivo de maíz	aradura, siembra de maíz directa con coa, control de maleza con herbicida	1.200	LRscv
6	Tepetate rehabilitado, labranza reducida con cobertura vegetal, cultivo de maíz con Trifolium repens, ssp. enano	aradura, control de maleza con herbicida, siembra de trébol al voleo, rastra niveladora, siembra de maíz directa con coa	1.500	LRccv

Nota: la pendiente de los lotes 1 a 3 es del 9 por ciento.

Cuadro 1 - Descripción de las parcelas de escurrimiento

Las primeras tres parcelas (tipo Wischmeier) están equipadas con piletas de concreto para captar el afluente y los sedimentos, y las parcelas grandes lo están con vertedores tipo H, limnígrafos y contenedores de volteo con partidores para captar el afluente y la pérdida de suelo (Fechter-Escamilla *et al.*, 1995). El sitio cuenta con dos pluviógrafos de tipo Hellmann, de registro diario. El análisis de los pluviogramas se realiza en gran parte (energía, EI_{30}, etc.) según Wischmeier y Smith.

La humedad volumétrica se midió con un TRASE-System (Soil Moisture Equipment Ltd.) según el método de *Time-Domain-Reflectrometry* (Skaling, 1992) dos veces a la semana en 9 puntos al azar con 2 repeticiones en cada uno. La rugosidad de la superficie fue medida semanalmente con un «punto cuadra», utilizando 100 clavos o *pins* por m^2 en puntos definidos en la superficie (Potter *et al.*, 1990). Las medidas fueron tomadas hasta una altura del maíz de 70 cm., pues con una altura superior era imposible, mediante ese método, continuar los trabajos de medición. La rugosidad se expresa —discrepante de Potter *et al.*, 1990— en el porcentaje en que el área de la superficie irregular sobrepasa al área de la base.

RESULTADOS

Descripción general del régimen pluvial y su erosividad

El régimen pluvial es típico de la zona: la distribución de las lluvias mostró dos intervalos de poca precipitación en mayo y a fines de julio (sequía interestival) como se puede apreciar en la figura 1. Esto se observó también en los años anteriores. Agosto es el mes con mayor precipitación.

Cuadro 2
Clasificación de las lluvias en Santiago Tlalpan

clases de eventos pluviales	número de eventos	suma de precipitación	EI_{30} a	EI_{30} b
0 - 4,9 mm	55	77,4	0,1	6,4
5 - 9,9 mm	23	172,0	16,1	36,3
10 - 14,9 mm	8	102,0	41,0	43,1
15 - 19,9 mm	5	88,9	19,1	19,1
20 - 24,9 mm	4	90,0	32,6	32,6
25 - 29,9 mm	1	28,1	17,5	17,5
30 - 34,9 mm	0	--	--	--
35 - 39,9 mm	1	38,2	42,8	42,8
suma	97	596,6	169,3	197,8

Nota: EI_{30} incluye eventos mayores a 12,7 mm o 12,7 mm/h.
EI_{20} incluye todos los eventos.

Al igual que en los años anteriores (Baumann *et al.*, 1996), el mayor número de eventos de lluvia se encuentra en la primera clase (0,1 a 5 mm). También se observa que el 41 % de la precipitación total ocurrió en seis eventos mayores de 20 mm. Al mismo tiempo, estos seis eventos contribuyeron en aproximadamente un 50 % a la erosividad, es decir al factor R (= suma anual del EI_{30}, según Wischmeier y Schmidt) del año 1995. Por otro lado, causaron entre el 60 y el 65 % del afluente y de la pérdida de suelo del año en las tres parcelas grandes (cuadro 3). Esta relación es diferente en las parcelas de tipo Wischmeier: en TC, el 43 % de la pérdida ocurrió en los eventos mayores de 20 mm, en TCR/sv, el 51 %, y en TCR/cv el 67 %.

En la figura 1 se han combinado los datos de la humedad volumétrica, la lámina de precipitación y el afluente, para compararlos con la lámina de infiltración de la época más erosiva que duró de julio hasta mediados de septiembre.

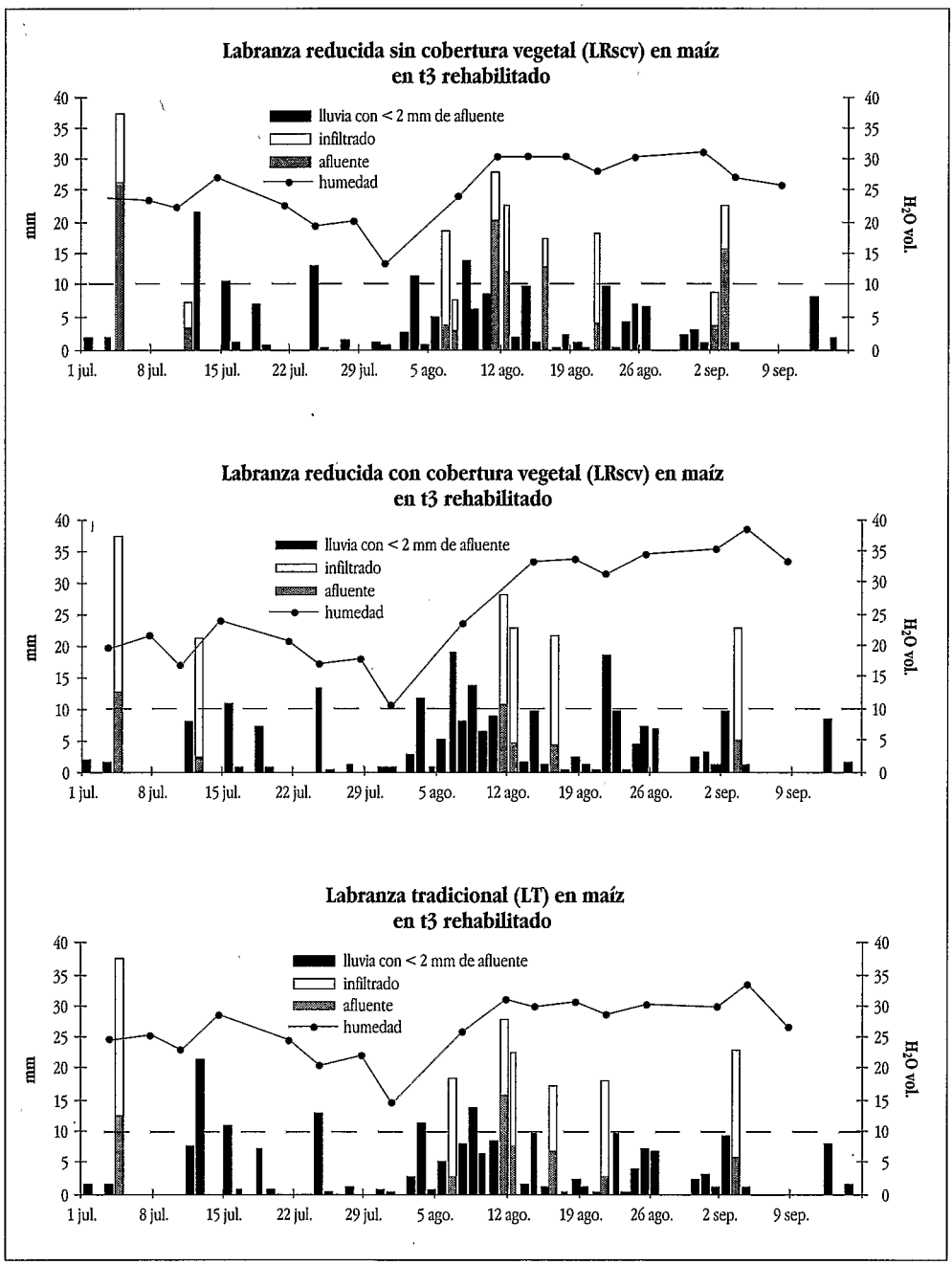


Figura 1 - Relación entre precipitación, afluente, infiltración y humedad volumétrica (0-30 cm) en tres diferentes tratamientos de maíz en tepetate (t3) rehabilitado

Cuadro 3
Afluente y pérdida de suelos provocados por eventos mayores de 20 mm

	afluente		pérdida	
	mm	% del año	t/ha	% del año
LRscv	84	64	2,4	64
LRccv	35	66	1,5	64
LT	46	61	1,7	57
TC	116	64	7,5	43
TCR/sv	90	64	35,2	52
TCR/cv	6	57	0,7	66

Se puede observar claramente que el afluente de LRscv sobrepasa al de los otros tratamientos. El menor afluente se observa en LRccv y en medio de ellos se encuentra el de LT. En cuanto al contenido de agua, en LRccv se observan dos extremos: durante la sequía interestival, esta parcela se acerca más al punto de marchitez con menos del 9 % de H_2O, mientras que después del período de mayor precipitación está más cerca del punto de saturación, es decir por encima del 35 % de H_2O. A pesar de este alto contenido de agua, en la LRccv no se observaron afluentes en los últimos eventos de lluvia de agosto. Por el contrario, las parcelas LRscv y LT, con menor contenido de agua (28-30 %), muestran afluente en los últimos eventos a fines de agosto.

De estas observaciones se deduce que la humedad del suelo no determina directamente el afluente de eventos erosivos.

Rugosidad de la superficie

El siguiente gráfico (figura 2) muestra la diferencia en la rugosidad de los tres tratamientos del cultivo de maíz. LT, que tiene la mayor rugosidad, la aumentó aún más del 8 al 15 de junio debido al primer aporque. Esta rugosidad de la superficie se mantiene apenas hasta el 29 de junio. Es interesante anotar que en este intervalo se registraron únicamente

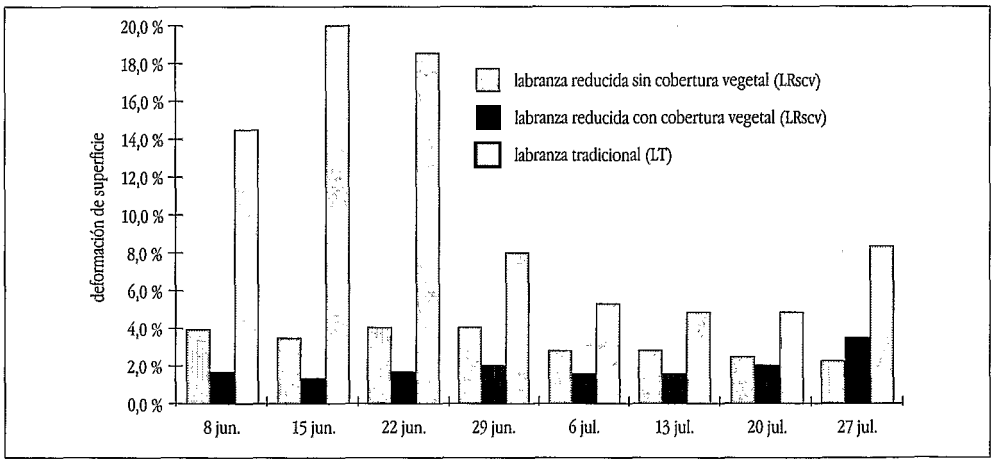


Figura 2 - Rugosidad en las parcelas grandes de medición de erosión en Santiago Tlalpan (1995)

dos lluvias muy ligeras que causaron poco afluente. Sin embargo, debido al asentamiento que provocaron, el aguacero del día 4 de julio no tuvo un efecto significativo en la rugosidad de la superficie. Cabe mencionar que a fines de julio, este tratamiento sin otra labor aumentó la rugosidad al igual que el tratamiento de LRccv. Esto indica el inicio de una formación de canalillos durante el evento anterior a esa fecha, el mismo que no provocó afluente pero sí creó «erosión» en forma de reestructuración de la superficie.

LRscv sí muestra una reacción al aguacero del día 4 de julio pues perdió rugosidad en esa fecha. La tendencia general de LRscv durante el resto del año es la disminución paulatina de la rugosidad, limitada ya al inicio del ciclo.

La parcela LRccv no muestra cambios significativos en la rugosidad durante el período de medición. Además es el tratamiento con la menor rugosidad de la superficie, lo que se debe a la siembra de trébol al voleo cubierto con una ligera rastra niveladora.

Dada la importancia de los eventos extremos (cuadro 3), se analizarán los eventos mayores que provocaron más de 2 mm de afluente, al menos en una de las parcelas grandes.

Análisis de los eventos más erosivos y comparación de los tratamientos

LRscv muestra la mayor cantidad de pérdida de suelo con 3,7 t/ha, mientras que en LRccv se registra la menor (2,3 t/ha) y LT se encuentra entre las dos con 3 t/ha. En el cuadro 4 se observa en detalle cómo se constituyen estas pérdidas en los 5 eventos más erosivos del año: al inicio de la temporada, LRscv y LRccv superan significativamente a LT en pérdida de suelo. Pese a que en LRccv se registró menos afluente que en LT y LRscv, esa parcela alcanzó el 4 de julio la misma pérdida de suelo (0,7 t/ha) que LRscv, mientras que LT solo perdió 0,4 t/ha. La pérdida mínima de LT en esa fecha se debe probablemente a la alta rugosidad de su superficie (figura 2), lo que proporciona mayores espacios de re-sedimentación durante el evento erosivo.

Llama la atención el hecho de que el 11 de agosto LT tiene la mayor pérdida de suelo con 0,7 t/ha y 16 mm de afluente, dato que se acerca mucho al de la pérdida en LRscv. En esta fecha, las zonas de re-sedimentación ya han sido rellenadas y esto podría explicar el aumento relativo de la pérdida de suelo en LT. A partir de esa ocasión, se ve que, de los tres tratamientos, LRccv muestra la menor pérdida de suelo. El efecto de la cobertura vegetal aparece ahora en su plenitud reduciendo el afluente y la pérdida de suelo.

La misma relación entre los tratamientos del 11 de agosto se observa el 3 de septiembre, pero a un nivel menor de pérdida de suelo (≈ 0,2 t/ha), a pesar de un mayor EI_{30} (≈ 20 N/h) observado en esa última ocasión.

Comparando los tratamientos del 12 y 16 de agosto con un EI_{30} de 5,4 y 7,9 respectivamente, se observa que la misma lámina de afluente con un EI_{30} superior provoca menor pérdida de suelo en los tres tratamientos. Después de los eventos fuertemente erosivos del 11 y del 12 de agosto, para el día 16 se redujo probablemente la cantidad de material erosionable. La relación pérdida de suelo/unidad EI_{30} aumenta al inicio de la temporada hasta el 11 de agosto, y a partir del 16 comienza a disminuir. En las parcelas Wischmeier se observa una relación constante entre EI_{30} y pérdida de suelo, que se mantiene constante en TC y disminuye durante toda la temporada en TCR/sv. En TCR/cv no se observó tendencia alguna.

CONCLUSIONES

El régimen pluvial se caracteriza por una reducida erosividad con un factor R entre 169 y 197. En las parcelas grandes, los eventos de alta erosividad provocaron la mayor

	caracterización de las lluvias más erosivas							parcelas grandes t3 rehabilitado			parcelas tipo Weischmeier t3		
	cantidad mm	duración min.	I_{30} mm/h	ECT kJ/m²	EI_{30} N/h	I_5 mm/h	I prom. mm/h	LRscv	LRccv	LT	desnudo	t3 rehabilitado s/v	c/v
4 jul. 1995	38,2	453	47,6	0,90	42,8	114,3	5,1	pérdida total en t/ha					
subevento 1	29,2	61	45,5	0,80	34,6	105,5	28,7	26,9	12,8	12,4	30,9	20,0	1,00
subevento 2	6,9	152	4,7	0,10	0,5	4,7	2,7	afluente total en mm					
subevento 3	2,1	238	1,3	0,02	0,0	1,8	0,5	0,73	0,67	0,37	3,59	18,64	0,26
11 ago. 1995	28,1	809	26,7	0,66	17,5	81,0	2,1	pérdida total en t/ha					
subevento 1	24,6	81	26,7	0,61	16,3	81,0	18,2	20,8	10,5	15,8	16,2	18,4	0,7
subevento 2	3,3	718	1,8	0,04	0,1	3,2	0,3	afluente total en mm					
								0,65	0,41	0,74	1,16	7,79	0,08
12 ago. 1995	22,7	759	11,8	0,46	5,4	40,4	1,8	pérdida total en t/ha					
subevento 1	5,9	30	11,8	0,15	1,7	40,4	11,8	12,8	4,8	7,8	17,5	16,3	0,5
subevento 2	15,2	213	11,3	0,29	3,3	14,1	4,3	afluente total en mm					
subevento 3	1,5	72	2,5	0,02	0,1	7,6	1,3	0,35	0,12	0,21	0,37	1,73	0,01
16 Ago. 1995	17,7	297	19,4	0,41	7,9	47,9	3,6	pérdida total en t/ha					
subevento 1	9,6	21	19,2	0,24	4,6	47,9	27,4	13,4	4,5	6,7	17,1	10,1	5,0
subevento 2	5,2	81	10,4	0,12	1,2	30,4	3,9	afluente total en mm					
subevento 3	2,4	56	3,6	0,04	0,2	6,5	2,6	0,05	0,18	0,17	0,99	1,43	0,35
3 sept. 1995	23,6	90	34,3	0,62	21,2	100,7	15,7	pérdida total en t/ha					
subevento 1	16,7	22	33,3	0,46	15,3	100,7	45,5	16,1	4,9	5,9	20,6	18,0	0,5
subevento 2	5,1	9	10,2	0,13	1,3	41,5	34,0	afluente total en mm					
subevento 3	1,5	12	3,0	0,03	0,1	8,3	7,5	0,25	0,12	0,22	1,68	4,13	0,01
sumas	130,3			3,04	94,9			90,0	37,5	48,5	102,2	82,8	7,7
								2,03	1,50	1,71	7,79	33,72	0,71
suma del año	596,6			8,29	169,3			132,2	53,0	76,0	315,1	204,0	11,6
								3,72	2,34	3,00	17,31	66,61	1,06

Cuadro 4 - Análisis de las lluvias más erosivas con afluentes y pérdidas de suelo eb los lotes de medición de Santiago Tlalpan (1995)

parte de la pérdida anual de suelo, que osciló entre 2 y 4 t/ha. La mayor erosión se observó en maíz con labranza reducida sin cobertura vegetal y la menor en labranza reducida con cobertura vegetal. Los datos obtenidos en parcelas Wischmeier y en las parcelas de campesinos se diferencian considerablemente en su comportamiento en los eventos más erosivos. La humedad del suelo al inicio del evento erosivo no puede explicar satisfactoriamente la diferencia entre los afluentes de los diversos tratamientos.

La tasa de erosión en este año no es alarmante. El principal medio de disminuir aún más la pérdida de suelo en el sistema del cultivo de maíz, consiste en un mejoramiento de la cobertura vegetal. Una reducción de la intensidad de la labranza no resultó exitosa.

Referencias bibliográficas

BAUMANN, J.; WERNER, G., 1997: Erodibility of Volcanic Ash Soils in the Central Mexican Highlands, en este volumen.

BAUMANN, J.; WERNER, G.; MUÑOZ, H.; VERA, A.; FLORES, G.F., 1992: Mediciones preliminares de la erosión hídrica en el bloque de Tlaxcala, México, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 347-354.

FECHTER-ESCAMILLA, U.; FLORES, G.F.; MUÑOZ, P.; TEHÓZOL, F.; VERA, A., 1995: Un método para la medición de erosión en parcelas grandes con un gran contenido de fragmentos, en zonas con intensidad extrema de precipitaciones, en *Investigación edafológica en México 1992-1995, Memorias del XXVI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*, S. Tovar, J. L. Ordaz, L. Quintao (editores), Cd. Victoria, Tamaulipas, México, p. 131.

FECHTER-ESCAMILLA, U.; TEHÓZOL, F.; MUÑOZ, P., 1997, Maíz bajo labranza reducida en un suelo volcánico endurecido (tepetate t3) rehabilitado, en Tlaxcala, México, en este volumen.

POTTER, K. N.; ZOBECK, M. A.; HAGEN, L. J., 1990: A Microrelief Index to Estimate Soil Erodibility by Wind, in *Transactions, American Society of Agricultural Engineers*, 33 (1), p. 151-155.

SKALING, W., 1992: TRASE: A Product History, in *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice*, Topp, G.C.; Reynolds, W.D.; Green R.E. (Editors), SSSA Special Publication Number 30, Madison, Wisconsin, USA.

Análisis de las características de las precipitaciones de 1992 a 1995 en San Miguel Tlaixpan (Texcoco, México)

Christian PRAT

Abstract

In the UE-ORSTOM-CP-UAT-UG research program about rehabilitation of Mexican tepetates, *one of the problems is to control soil erosion and productivity of these new soils. The caracterization of rainfall in relation to its occurrence, quantity, energy, etc. is fundamental. This paper shows the results of the analysis of 4 years of precipitations measured with a pluviograph on the study area, and the processing of these data with softwares pertaining to ORSTOM (PLUVIOM and ARES).*

In spite of the short time of the registrations, we could show that the climate is C(w1)(w) —subhumid temperate with an ustic hydric regime in the classification of Kœppen modified by G. Benavides, as other authors have previously showed, but the total precipitation level for the agricultural season is much lower than what was considered: 620 mm/year instead of 700-800 mm/year. With this amount of water, we cannot really expect a very corn high production.

In relation to the agressivity of the rain, all the rains give a total value of a $R_{us} \approx$ *150, wich is a medium value in comparison with other types of climate throughout the world. Only 16 events have higher than 10 mm, representing 50 % of the total water of the year and 80 % of the* R_{us}. *Due to the very brief duration of the rains, the maximum intensity during 5, 10 or 15 minutes should be taken as a reference instead of 30 minutes to calculate the R coefficient. The variability of the events is very high during the same year and between years, difficulting the comparison of agronomic studies.*

Keywords: *Sub-humid Temperate Climate - Rain Characteristics - Rain Agressivity - Mexico Valley*

INTRODUCCIÓN

En el marco del programa de investigación UE-ORSTOM-CP-UAT-UG sobre la rehabilitación de los tepetates en México (Quantin, 1994) se está desarrollando un estudio sobre las condiciones de habilitación a la agricultura de nuevos suelos formados a partir de un tepetate t3 roturado. En tal estudio, se consideran propuestas para limitar la erosión de esos suelos, pero es necesario adecuar dichas propuestas a las características del clima. Por ello,

se realizó un detenido análisis de los parámetros de erosividad de las lluvias. Además, hasta la fecha no se había efectuado para esta zona un tipo de estudio tan detallado al respecto.

METODOLOGÍA

La zona de estudio se encuentra en San Miguel Tlaixpan (Edomex), aproximadamente 15 km al este de Texcoco. Está localizada en la parte oriental de la cuenca de México, a nivel de los 98° 47' 55" de longitud norte y 19° 29' 53" de latitud oeste. La altitud es de 2.555 m.s.n.m.. Su clima, según la clasificación de Koeppen modificada por García B. (1979), es de tipo C(w1)(w), es decir templado subhúmedo, con un régimen de humedad ústico (Peña y Zebrowski, 1992).

Las lluvias se registraron en un pluviógrafo mecánico Stevens, de amplitud 1 x 1 y de rotación diaria, manejado por el Área de Física de Suelos del Colegio de Postgraduados de Agrociencias. Pese a las reiteradas solicitudes, no se pudo disponer de un registro anual, sino solamente de la mayor parte de datos correspondientes a la época lluviosa. Un pluviómetro de control ubicado al lado del pluviógrafo permitió al menos completar los datos faltantes en términos de altura de lluvias.

Se digitalizaron manualmente todos los pluviógrafos en una tabla de digitalización Summasketch conectada a una computadora a través de un módulo del programa PLUVIOM desarrollado por el ORSTOM (Boyer *et al.*, 1992). Posteriormente, se procesaron todas las lluvias, indepedientemente de su duración o altura, gracias al programa ARES (Esteve, 1991) igualmente desarrollado por el ORSTOM. Se tomó una hora como tiempo de separación entre dos precipitaciones. A partir de la altura máxima observada, se calcularon, durante 5, 10, 15, 30 y 60 minutos, las intensidades correspondientes.

En el presente artículo se presentan los datos procesados de los años 1992 a 1995.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al no contar con las todas las precipitaciones a lo largo de los 4 años, se presentan ciertas dificultades para efectuar comparaciones entre los años. Por ejemplo, en el caso de 1995, se disponía únicamente del 70 % de las precipitaciones, pero se pudo, gracias al pluvómetro mencionado anteriormente, completar los datos faltantes, aunque solamente en términos de altura de lluvia.

Precipitación y distribución anual de las lluvias de 1992 a 1995

El comportamiento de las lluvias puede ser muy variable de un año a otro, en términos tanto de cantidades de precipitaciones como de su distribución a lo largo de cada temporada de lluvias (cuadro 1).

Precipitación y distribución mensual de las lluvias de 1992 a 1995

Se observa que prácticamente no llueve durante los meses de noviembre a abril y que la temporada de lluvia se extiende a lo largo de los 6 meses restantes. El mes más lluvioso es agosto, y sus precipitaciones representan el 24 % de la lluvia total anual. La proporción de lluvias fuera del ciclo agrícola (mayo-octubre) es del 6 % de las lluvias totales. El año 1995 fue una excepción a este respecto, ya que dichas precipitaciones representaron el 24 % de las lluvias anuales, es decir 188 mm (cuadro 2). Estos datos difieren un tanto de los presentados en el trabajo de Peña y Zebrowski (1992).

Un análisis comparativo de un año al otro muestra diferencias notables, tanto en términos de cantidad de lluvia como de repartición en el tiempo (figura 1).

	1992	1993	1994	1995	1992-1995
Número de días de lluvia	126	81	105	120	108
Número de aguaceros	193	133	162	183	167
Altura total (mm)	654,4	397,0	692,4	768,3	628,0
Número de aguaceros registrados con el pluviógrafo y procesados	193	132	148	154	156
Altura de aguaceros registrados con el pluviógrafo y procesados	654,4	396,0	594.1	528.6	543,0
% de lluvias registradas vs. totales	-	99	86	70	
R métrico	259,2	96.0	216,0	196,7	192,0
R_{usa}	149,3	55,3	124,4	113,0	110,5
"Tipo" tentativo de clasificación del año pluviométrico	normal y erosivo	muy seco	normal	irregular	año promedio

Cuadro 1 - Características principales de las lluvias de 1992 a 1995

	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	Total
1992	0,0	0,0	4,6	15,3	41,5	72,3	106,3	174,0	115,0	69,9	51,9	3,6	654,4
1993	4,7	0,0	0,0	0,0	16,6	98,2	106,0	72,4	84,9	14,2	0,0	0,0	397,0
1994	0,0	0,0	*40,0*	23,3	49,2	111,5	184,2	212,8	85,7	26,9	2,0	0,0	735,6
1995	28,8	0,0	12,7	14,6	60,9	117,6	85,2	206,0	49,1	61,0	64,4	68,0	768,3
Promedio	8,4	0,0	14,3	13,3	42,1	99,9	120,3	166,3	83,7	53,8	29,6	17,9	638,8

El valor en cursiva es un valor estimado.

Cuadro 2 - Precipitaciones mensuales de 1992 a 1995

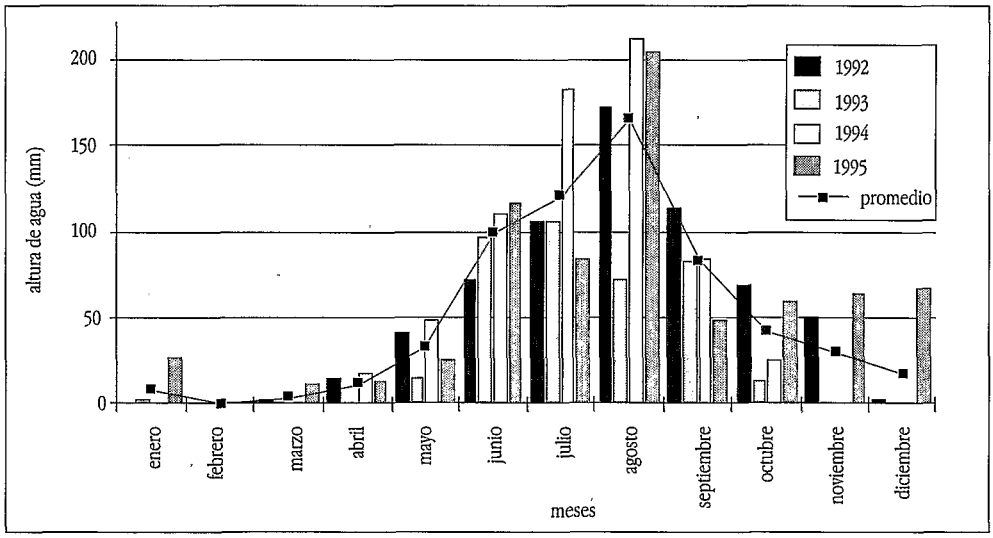


Figura 1 - Distribución de las alturas mensuales de las precipitaciones a lo largo de cada año

Distribución de las precipitaciones a lo largo del día

Las lluvias se distribuyen a lo largo del día según un esquema típico de lluvias de medio tropical: es muy poco usual que llueva entre media noche y las 11 a.m. mientras

que la mayoría de las precipitaciones ocurren entre las 12 a.m. y la media noche, con una mayor proporción de las 2 a las 8 p.m (figura 2).

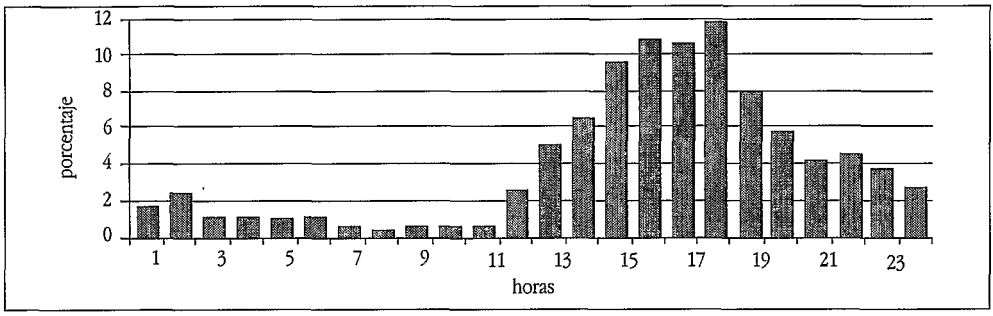


Figura 2 - Hora de inicio de las lluvias (promedio de las lluvias de 1992 a 1995)

Duración de las precipitaciones

La mitad de las lluvias tienen una duración inferior a los 30 mn, y de ellas el 28 % no superan los 15 mn. Por otro lado, solamente un 6 % de los aguaceros tienen una duración mayor a una hora y media. Estas características de las precipitaciones son típicas de lluvias de los trópicos que caen bajo la forma de aguaceros breves. El hecho de que las lluvias sean breves invalida la forma de calcular un índice de erosividad con base en una duración de lluvia de 30 mn. Es indispensable determinarlo para duraciones más cortas como 5, 10 y 15 mn, lo que permite tener valores reales y no promedios que disminuyen necesariamente las intensidades.

Si se compara un año con el siguiente, se puede constatar que la proporción de aguaceros en cada clase puede multiplicarse por un factor de 1 a 2 en función del año considerado. Por ejemplo, en 1994, el 4 % de las lluvias duraron menos de 5 mn, mientras que durante 1993, esa cifra se eleva al 8 %. Por otro lado, las lluvias de la clase 30-59 mn representan el 13 % en 1993 y el 30 % en 1994. Sin embargo, no se puede diferenciar de manera muy clara la pluviometría de los años estudiados con base en la duración de los aguaceros.

Altura de agua de las precipitaciones (cuadro 3)

Debido a la falta de la mayor parte de los registros pluviográficos durante los meses de la época seca, se pueden analizar las lluvias que ocurren durante esa época así como al inicio de la época de lluvia únicamente en términos de altura de precipitación. El 80 % de las lluvias tienen una altura inferior a los 5 mm y del 6 % (1993) al 14 % (1994) corresponden a lluvias de 5 a 9,9 mm. Las precipitaciones ≥ 10 mm representan entre el 8 % (1992) y el 13 % (1994).

En términos de número de lluvias, si se cuentan alrededor de 15 aguaceros ≥ 10 mm cada año, el número de lluvias de la clase 5-9,9 mm varía considerablemente de un año a otro, ya que en 1992 fueron 26 mientras en 1993 fueron solamente 8.

Intensidad de las precipitaciones (cuadro 4)

Las tres cuartas partes de las lluvias tienen una intensidad inferior a los 5 mm/h, lo que corresponde a intensidades muy bajas. Un 15 % pertenece a la clase de 5 a 10 mm/h

y el 10 % restante se ubica entre 10 y 48 mm/h. Casi todas estas lluvias intensas corresponden a las de mayor altura. Dichas intensidades son fuertes, pero mucho menores a las que se pueden encontrar en condiciones climáticas meramente tropicales.

Altura	1992	1993	1994	1995	1992-1995	1992-1995
mm	número					%
< 5	152	110	123	122	123	78,3
5 - 9,9	26	8	18	17	18	11,5
10 - 14,9	10	7	9	7	9	5,6
15 - 19,9	2	6	4	5	4	2,5
20 - 24,9	1	1	2	3	2	1,4
25 - 29,9	1	0	1	0	1	0,3
30 - 44,9	0	0	0	0	0	0,0
> 45	1	0	0	0	1	0,2

Cuadro 3 - Altura de agua vs. número de lluvias

I	1992	1993	1994	1995	1992-1995	1992-1995
mm/h	número					%
0	143	102	104	117	116	74,2
5	30	23	22	20	24	15,1
10	8	3	12	6	7	4,6
15	7	1	4	6	5	2,9
20	3	3	3	1	3	1,6
25	0	0	1	1	1	0,3
30	2	0	1	2	1	0,8
35	0	0	0	0	0	0
40	0	0	1	1	1	0,3

Cuadro 4 - Intensidad vs. número de lluvias

Intensidades observadas por rango de 15 mn alrededor de la intensidad máxima durante 15 mn

Este parámetro nos permite determinar el periodo de la lluvia de mayor intensidad.

Sumando las precipitaciones de duración inferior a 15 mn con las que presentan su intensidad máxima durante los 10 primeros minutos, resulta que el 75 % de las lluvias alcanzan su intensidad máxima al inicio de la precipitación. Esta característica es típica de las lluvias tropicales.

Esta forma de llover implica que la mayor parte de la energía así como de la cantidad de agua caen al inicio sobre un suelo seco o algo resecado. Su reserva de agua no está entonces saturada, lo que garantiza una infiltración mayor a la que se produciría si las intensidades máximas ocurrieran al final de las lluvias. Este dato es otro elemento que indica que la erosividad potencial de las lluvias es mayor a la erosividad real.

Homogeneidad de las precipitaciones (cuadros 5 y 6)

Una forma de caracterizar a las lluvias es estudiar cada hietograma en función de las intensidades (en este caso durante cada periodo de 15 mn), para definir si se trata de lluvias simples o multimodales. Como en el caso anterior, no se consideran las precipitaciones de duración inferior a 15 mn.

Pese a tratarse de eventos breves, algo menos de la mitad de las lluvias son multimodales. Sin embargo, en la mayoría de los casos, las otras intensidades corresponden solamente a algunos milímetros ($\leq$ 3 mm/h), lo que representa un valor de dos a diez veces inferior a la intensidad máxima registrada durante el mismo evento. Con esta aclaración, las precipitaciones realmente multimodales son finalmente escasas. Tomando arbitrariamente una intensidad máxima superior a esos 3 mm/h, se tienen solamente 16 lluvias multimodales en 1992, 14 en 1993, 15 en 1994 y 10 en 1995, lo que representa menos de 10 % de las precipitaciones anuales.

Intensidades durante 5, 10, 15 y 30 minutos

Para conocer la variabilidad de las intensidades durante una lluvia, se determinaron las intensidades máximas registradas durante 5, 10, 15, 30 y 60 minutos (el programa ARES permite calcular las alturas para 9 tiempos diferentes definidos por el utilizador).

	1 modal	2 modal	3 modal	4 modal	5 modal	Total
1992	88	30	12	7	1	138
1993	49	25	8	3	0	85
1994	64	31	14	2	1	112
1995	55	26	12	7	1	101
Promedio	64	28	11	5	1	109

Cuadro 5 - Número de lluvias distribuidas en función de su forma

	1 modal	2 modal	3 modal	4 modal	5 modal	Total
1992	64	22	9	5	0,5	100
1993	58	29	9	4	0,0	100
1994	57	28	12	2	1,0	100
1995	54	26	12	7	1,0	100
Promedio	58	26	11	4	0,7	100

Cuadro 6 - Porcentaje de lluvias distribuidas en función de su forma

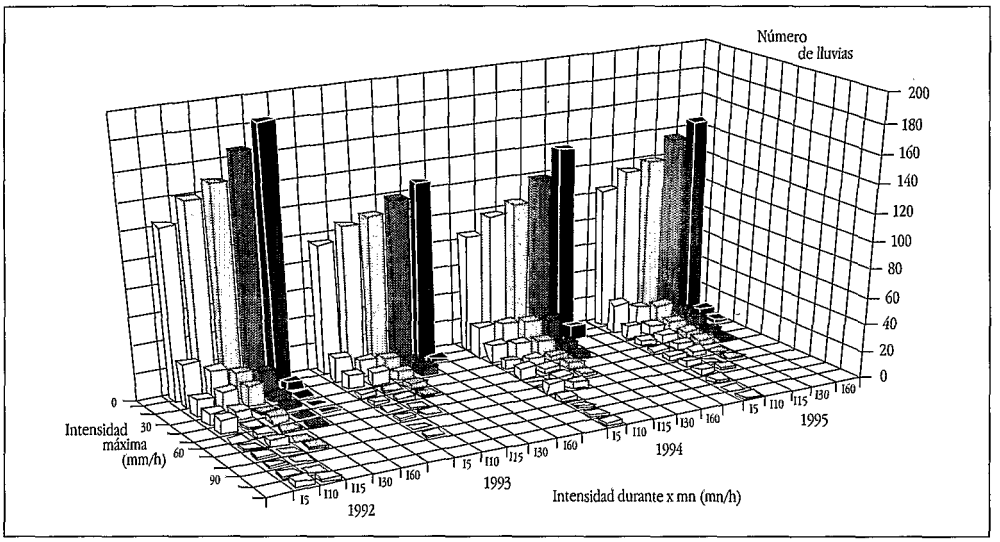


Figura 4 - Intensidades durante 5, 10, 15, 30 y 60 mn

Se observa que los valores son obviamente mucho más elevados que los de intensidad global de cada lluvia. Así, salvo 1993, los otros tres años presentan entre 8 y 14 lluvias de intensidad superior a 50 mm/h durante 5 mn y de 6 a 8 durante 10 mn, e incluso, de 1 a 4 aguaceros al año tienen intensidades mayores a 100 mm/h. Estas lluvias tienen una potencialidad erosiva sumamente importante, y como se manifiesta en otro artículo de este volumen (Prat *et al.*, 1997), existe una estrecha relación entre esas intensidades, aunque breves, el escurrimiento, la erosión y los cambios en los estados de superficie del suelo.

Está claro que el I_{30} (valor que entra en el cálculo del R de Wischmeier) así como la intensidad global de cada lluvia no son los mejores indicadores para expresar el grado de erosividad de las lluvias que caen en la región de San Miguel Tlaixpan. En efecto, como la mitad de las lluvias tienen duran menos de 30 mn, el I_{30} promedia demasiado las intensidades de las precipitaciones lo que llega a ocultar la erosividad de un buen número de lluvias.

Energía cinética de las precipitaciones (figura 5)

Se calculó la energía cinética —expresada en toneladas métricas por hectárea y por mm de lluvia (TM*/ha*mm)— para cada aguacero, según la siguiente fórmula (Wischmeier y Smith, 1978):

Energía cinética = 1214 + 890 $\log_{10}$ Intensidad de la lluvia

En este caso, se toma el valor de la intensidad en su totalidad, sin buscar calcular para cada serie de intensidad constante su Ec, tal como se procederá luego con la Ec global. El interés de este cálculo general radica en el hecho de que la intensidad de una lluvia es un dato relativamente fácil de conseguir.

La mayoría de las lluvias tienen una energía cinética por debajo de las 25 t.m/ha*mm. En 1992, 1994 y 1995 los aguaceros que superaron las 25 t.m/ha*mm fueron de 30 a 40 frente a 16 en 1993. Finalmente, en este último año, ninguna lluvia superó las 30 t.m/ha*mm, mientras que se contabilizaron entre 3 y 6 a lo largo de los otros años.

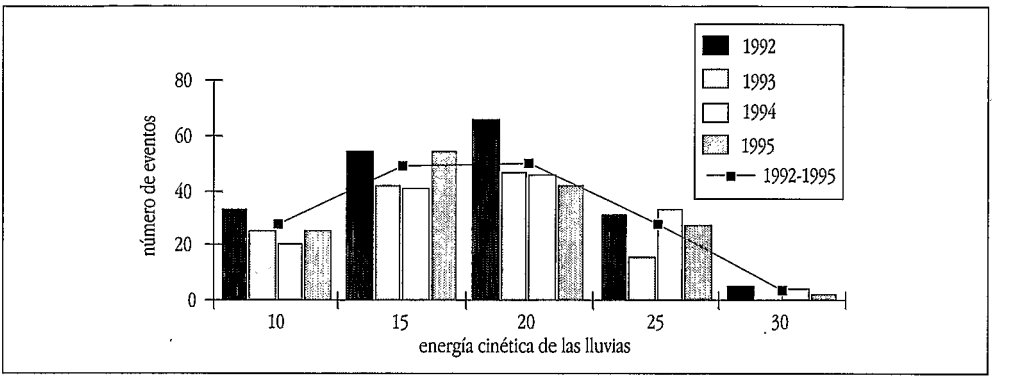


Figura 5 - Energía cinética de las lluvias

Energía global de las precipitaciones (figura 6)

La energía global corresponde a la suma de las energías unitarias, es decir de cada sección de lluvia de intensidad constante:

Energía global = Σ (energía unitaria x altura de lluvia para cada intensidad constante)

donde la energía unitaria (en t.m/ha*mm) = 1.214 + 890 $\log_{10}$ I para cada intensidad constante.

Encontramos el mismo tipo de relación entre los años que en el caso de la energía cinética: 1993 se caracteriza por tener alrededor de 20 lluvias con una energía global que supera las 100 t.m/ha*mm sin rebasar las 500 t.m/ha*mm, mientras que en 1992 y 1994 se produce el doble de lluvias que rebasan las 100 t.m/ha*mm, en comparación con 1992. El año 1994 sigue siendo un año intermedio entre estos dos extremos, con alrededor de 30 lluvias con energía cinética superior a 100 t.m/ha*mm, pero ninguna con más de 700 t.m/ha*mm.

Energía cinética máxima de las precipitaciones (figura 7)

Corresponde a la energía cinética máxima que ocurrió durante una precipitación, independientemente del tiempo de duración de la misma. Este dato indica las lluvias más erosivas así como los valores extremos encontrados.

Mientras 1992 y 1994 tienen características similares con alrededor de 53 aguaceros con una energía cinética superior a 25 t.m/ha*mm, 1992 tiene solamente 36 y 1995, 43. Además, en 1992 y 1994 hubo dos lluvias que registraron valores superiores a las 300 t.m/ha*mm, mientras que 1993 y 1995 no presentaron ningún aguacero tan fuerte.

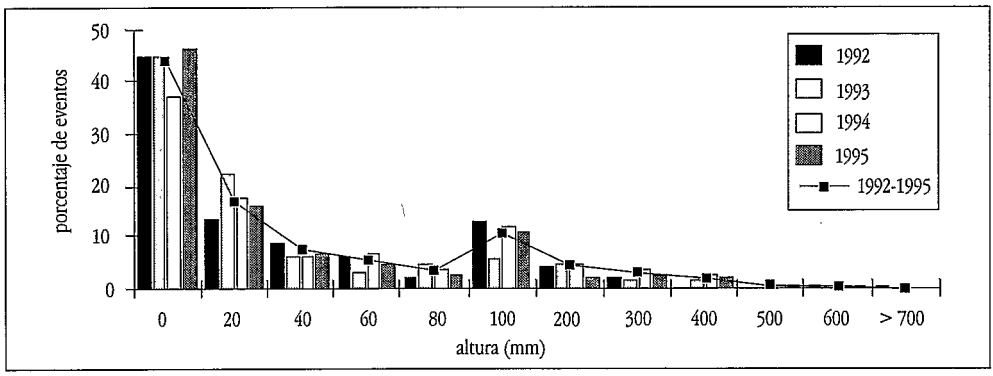


Figura 6 - Energía global vs. porcentaje del número de lluvias

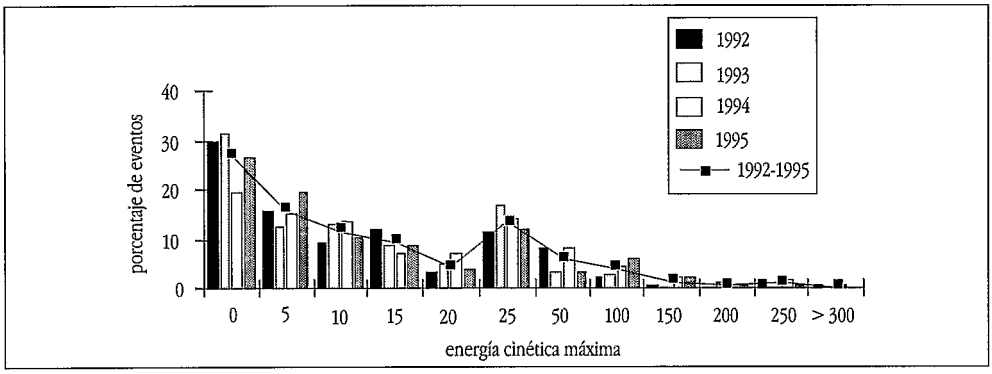


Figura 7 - Energía cinética máxima vs. porcentaje del número de lluvias

Coeficiente de erosividad de las lluvias según Wischmeier (R_{usa}) —cuadro 7—

Se debe recordar que el coeficiente de erosividad de las lluvias fue calculado por cada evento según la formula de Wischmeier, sin tomar en cuenta una altura ni una duración límite para cada lluvia, mientras que el autor de esta fórmula afirma que se deben excluir las lluvias superiores a 12,4 mm y las inferiores a 6,4 mm de una duración de 15 mn. Se prefirió tomar en cuenta todos los aguaceros, para luego, llegado el caso, suprimir los innecesarios. Los cálculos fueron efectuados con base en la formula de Wischmeier (1978):

$$R_{us} = \text{Energía global} * I_{30}/100$$

Aunque falta el 30 % de las lluvias en 1995, con base en la baja cantidad de escurrimientos y de sedimentos arrastrados durante esas lluvias no registradas, se puede considerar que probablemente el valor total de R_{us} en ese año debió presentar 15 puntos más (es decir un total de alrededor de 128), lo que no supera en mucho al de 1994. El valor anual del coeficiente R, tomando todos los aguaceros registrados con el pluviógrafo (es decir el 99 % de las lluvias en 1993, el 86 % en 1994 y solamente el 70 % en 1995), varía poco de un año a otro, destacándose 1993 como un año fuera de lo normal.

Cuadro 7 - R anual registrado de 1992 a 1995

Año	1992	1993	1994	1995
R métrico	259,2	96,0	216,0	196,7
R_{usa}	149,3	55,3	124,4	113,0

Comparando estos valores de 4 escasos años de registro con otros reportados en la literatura (con registros de varias decenas de años), se puede considerar que el valor promedio anual de la agresividad climática en nuestra área de estudio es relativamente bajo.

La relación entre promedio de los valores anuales R_{us} y la altura de las precipitaciones da un valor de 0,2 (110,5/543,3), lo que corresponde a las precipitaciones en sierras tropicales según Roose (1994). Sin embargo, antes de dar por cierta esta conclusión, pese a su coherencia, ese autor recomienda, para poder considerar como válido el valor de dicha relación, tener más de 10 años de registros.

Entre el 80 y el 90 % de las lluvias tienen un R_{us} inferior a 1, el 5 % entre 1 y 2, el 3 % entre 2 y 3 y el 5 % restante entre 3 y 16, con excepción de 1992 donde la lluvia del 16/08 tuvo un R_{us} de casi 44. En términos de número de aguaceros, se constató que solamente 25 lluvias superaron el valor de 1 del R_{us}, mientras que fue el caso de 13 en 1993, 27 en 1994 y 22 en 1995.

Si consideramos el R_{us} de las lluvias iguales o superiores a 10 mm, se obtienen los resultados presentados en el cuadro 9 (siempre con los valores registrados con el pluviómetro).

Año	Número de día	Altura registrada	Altura	% de altura de las lluvias registradas	R registrado	R_{us}	% de R_{us} de las lluvias registradas
1992	17	654,4	292,2	45	149,3	117,1	78
1993	14	396,0	233,1	59	55,3	46,6	84
1994	17	594,1	337,3	57	124,4	102,1	82
1995	15	528,6	266,8	51	113,0	92,1	82
1992 - 1995	16	543,0	282,4	53	110,5	89,5	82

Cuadro 9 - Comparación de alturas de lluvia con el R_{us} (datos totales anuales y medidos por el pluviógrafo)

En el cuadro se ve claramente que, pese a las variaciones de cantidad e intensidad de los aguaceros así como de los días de lluvia, existen constantes:

- el número de días con más de 10 mm es casi el mismo de un año a otro: 16;
- la proporción entre la altura de agua caída durante estos aguaceros y al altura anual de precipitación es de alrededor del 50 %;
- la proporción entre la suma de los R_{us} de dichos aguaceros y los R_{us} anuales es del 80 %.

Si se compara el número de precipitaciones con un valor de R_{usa} mayor a 2, se tiene en 1992, 15 lluvias, en 1993, 9, en 1994, 18, y en 1995, 15. Estas cantidades corresponden, en parte solamente, a los datos anteriores de los aguaceros $\geq$ 10 mm, lo que muestra que 1993 fue un año no solamente con pocas lluvias sino con baja erosividad, en comparación con los otros años.

R_{usa}	1992	1993	1994	1995	1992-1995
	Número				
0	168	119	121	132	135
1	10	4	9	7	8
2	6	3	5	4	5
3	2	2	2	2	2
4	2	0	4	2	2
5	1	1	1	0	1
6	0	3	2	1	2
7	1	0	1	2	1
8	0	0	0	1	0
9	0	0	1	2	1
> 10	3	0	2	1	1

Cuadro 10 - R_{us} vs. número de lluvias

R_{usa}	1992	1993	1994	1995	1992-1995
	%				
0	87,0	90,2	81,8	85,7	86,0
1	5,2	3,0	6,1	4,5	4,8
2	3,1	2,3	3,4	2,6	2,9
3	1,0	1,5	1,4	1,3	1,3
4	1,0	0,0	2,7	1,3	1,3
5	0,5	0,8	0,7	0,0	0,5
6	0,0	2,3	1,4	0,6	1,0
7	0,5	0,0	0,7	1,3	0,6
8	0,0	0,0	0,0	0,6	0,2
9	0,0	0,0	0,7	1,3	0,5
>10	1,6	0,0	1,4	0,6	0,5

Cuadro 11 - R_{us} vs. porcentaje de lluvias

De estos datos se puede deducir que no es porque llueva más durante un año que se tiene un mayor número de días con fuertes aguaceros. No es tanto el número de esos días lo que cuenta, y en cierta medida tampoco la altura de los aguaceros, sino más bien la energía desarrollada por cada evento.

En términos de periodo de ocurrencia de los eventos más intensos durante estos 4 años, no existe una relación entre el potencial de erosividad de una lluvia y un periodo particular del año. Como ejemplo ilustrativo, la figura 8 presenta la relación entre fecha e intensidad máxima durante 5 mn (I_5) de las precipitaciones mayores a 20 mm/h durante 5 mn, de 1992 a 1995.

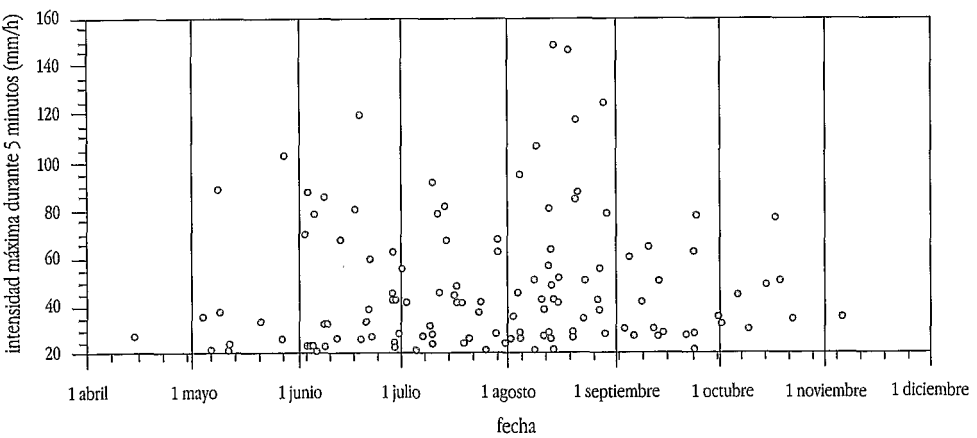


Figura 8 - Distribución del I_5 de las precipitaciones a lo largo de un año promedio (1992 a 1995)

La regresión entre las intensidades máximas ocurridas en 5 mn (I_5) de 1992 a 1995 (tomando en cuenta solamente las mayores a 20 mm/h) y el R_{us} (salvo el valor de 43 por

llegar a ser una constante) no es buena (r^2 = 0,6). Obviamente, a medida que aumenta el tiempo de las intensidades, se acerca a una regresión perfecta con R_{us}, al llegar al I_{30}, que es parte de la formula de R_{us}. Por ello, parece importante, con el tipo de registros* de lluvia de que se dispone, tomar en cuenta no solamente el R, sino también el I_5 ó I_{10} para lograr interpretar correctamente los eventos que provocan erosión y escurrimiento.

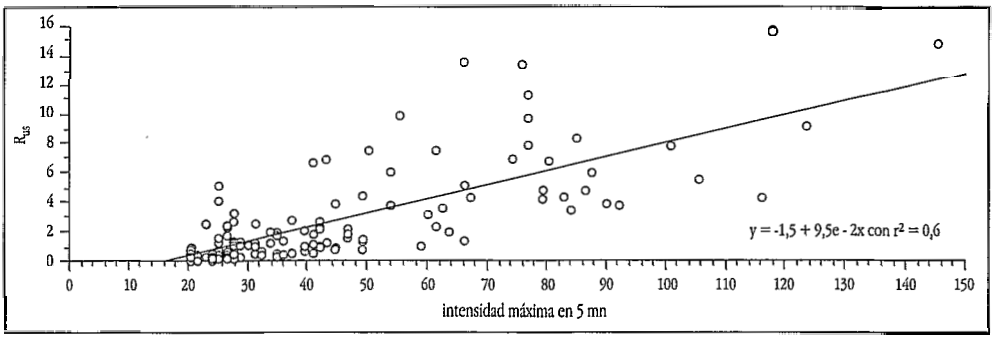


Figura 9 - Relación I_5 de las precipitaciones (con $I_5 \geq 20$ mm/h) vs. RI_{us} (1992 a 1995)

CONCLUSIÓN

Con una serie de solamente 4 años, es difícil lograr definir tendencias de la pluviometría en la zona de San Miguel Tlaixpan. Con los datos de que se dispuso, se confirma la clasificación anterior (Peña y Zebrowski, 1992) del clima de tipo C(w1)(w), es decir templado subhúmedo, con un régimen de humedad ústico. Sin embargo, se observa que las alturas de precipitación durante el periodo agrícola son menores (≈ 620 mm anual) a lo que se indicaba antes (700 a 800 mm).

Estas bajas precipitaciones implican que se trata de una zona límite en cuanto al cultivo del maíz. Además, la irregularidad de las lluvias a lo largo del año disminuye aún más la posibilidades de obtener buenos rendimientos con ese cultivo.

En términos de agresividad hacia los suelos, las precipitaciones anuales tienen valores medios ($R_{us} \approx 150$) que corresponden a valores registrados en climas parecidos. Como se sabe, son unas cuantas lluvias las que pueden provocar la mayor parte de la erosión hídrica: 16 eventos de más de 10 mm, que representan el 50 % del total de las lluvias, generan el 80 % del R_{us}.

Debido al los tiempos muy breves de las precipitaciones, la intensidad máxima ocurrida en 5 minutos (o 10) durante un aguacero debería ser un mejor índice para la evaluación de la erosividad de las lluvias, que el R basado en una intensidad de 30 minutos. La comparación entre estos valores y las tasas de escurrimiento y cantidades de arrastres confirmará la validez de esta hipótesis.

Referencias bibliográficas

BOYER, J.-F.; CRESPY, A.; DIEULIN, C.; GUISCAFFRÉ, J.; L'HÔTE, Y.; RAOUS, P.; 1992: *PLUVIOM 2.1, Logiciel de gestion de données pluviométriques*, Laboratoire d'Hydrologie, ORSTOM, Montpellier, France.

ESTEVE, M., 1991: *ARES 2.01, Programme de traitement des relevés pluviographiques intégraux (ex POH126)*, Laboratoire d'Hydrologie, ORSTOM, Montpellier, France.

GARCÍA B., J., 1979: *Estructura metodólogica para la caracterización agroecológica de áreas por procedimientos cuantitativos de análisis y su posterior zonificación*, Tesis doctoral, Colegio de Postgraduados, Edomex, México.

PEÑA, D.; ZEBROWSKI, C., 1992: *Estudio de los suelos volcánicos endurecidos (tepetates) de las cuencas de México y Tlaxcala (México). Informe del mapa morfopedológico de la vertiente occidental de la Sierra Nevada*, anexo al informe final, Contrato CCE-ORSTOM N° TS2-0212, 101 p.

PRAT, C.; BAÉZ, A.; ASCENCIO, E.; MARQUÉZ, A., 1997: Erosión y escurrimiento en parcelas de tepetate t3, (Texcoco, México), en este volumen.

QUANTIN, P., 1994: *Réhabilitation agricole des sols volcaniques indurés (Mexique, Équateur et Chili)*, Rapport scientifique annuel.

ROOSE, E., 1994: *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)*, Bull. pédologique de la FAO, N° 79. Roma, Italia.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D., 1978: *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*, U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537, ASDA, 58 p.

Erosión y escurrimiento en parcelas de tepetate t3 en Texcoco, México

Christian PRAT, Aurelio BÁEZ, Alfonso MÁRQUEZ

Abstract

The reclamation of volcanic indurated soils called tepetates *in Mexico must control soil erosion and generate a good productivity of these new soils according to a sustainable development strategy. This paper shows the results of an european research program involving ORSTOM and the* Colegio de Postgraduados en Agrociencias *in the eastern part of the valley of Mexico (Texcoco). Different systems of culture have been studied (mono/associated culture, with/without manure, soil/*tepetate, *natural/cultivated* tepetate, tepetate *with deep/normal subsoiling, tillage practice) during four years on 8 large terraces (700 m²). After every rain, we measured the runoff, took and dried all the sediments, sampled water and followed the vegetation cover, the soil surface aggregates, the crops growing (see this papers in this publication).*

In the study area, only few events generated an important soil erosion: 16 events ≥ 10 mm, representing 50 % of the total volume of the rain and 80 % of the R_{us} of the year. Only 3 events had an energy > 500 MJ/ha. For all the rain ≥ 1 mm, this R_{us} varied between 55 and 150. So it is not the annual R which is important but the frequency and the intensity of the rain during the year. In fact the annual and daily differences had more impact on the runoff and erosion than the kind of soils, crops and soil practices.

On the natural tepetate, *75 % of the rain runoff and the runoff coefficient (Kr) is between 40 and 50 %. The soil erosion varies from 10 to 30 t/ha/year, with an average of 20 t/ha/year. The solid charge is 30 %, showing that the erosion is more a gully than a laminar erosion. This is the consequence of the induration of the material which provokes high ranges of runoff. Water concentrates along the slope, and with the energy accumulated, is able to generate a deep and catastrophic soil erosion on the lower part of the hills, as it is possible to see on the actual landscape. In spite of the fact that the reclamation of the* tepetate *was controlled and the terraces were on the same area, we noticed differences in the results due to the station. So, we distinguish 2 groups, the upper and the lower terraces, and we still study the reasons of these differences. For the upper terraces, in the case of barley, during a dry year, the Kr is under 15 % and the E = 1 to 6 t/ha/year meanwhile in a rainy year, the Kr is 50 % and the E between 10 to 30 t/ha/year. In the case of corn growing on the same terraces, during a rainy year, the Kr is around 30 % and the E = 4 to 15 t/ha/year. For the lower terraces, in the case of the barley, during a dry year, the Kr is under 5 % and the E is 1 t/ha/year. In the case of the corn growing on the same terraces during a rainy year, the Kr is around 10 % and the E is less than 1.5 t/ha/year.*

Barley reduces less and generates more soil loss than corn. But, in this case, the raw and the work of cleaning the fields must be made with care and at the good moment. The raw with little rain catchment is a very good alternative with this climate because it strongly

reduces soil erosion and the production of string beans is higher (meanwhile there is no effect on corn production). The association of string beans and corn reduces soil erosion and increases the productivity of both cultures in relation with the monoculture. We did not notice any kind of impact of the apportation of manure (20 t dry) as well as the deepness of the reclamation of the tepetate *on the soil erosion.*

Keywords: Tepetate - *Vertic Phæozem - Mexico - Erosion - Runoff - Corn - Stringbeans - Barley - Tillage Practices*

INTRODUCCIÓN

Convertir un horizonte volcánico endurecido estéril en un suelo agrícola productivo desde el primer año de su roturación es técnicamente factible. Sin embargo, debido a la inversión que estos trabajos requieren y porque hoy en día no se deberían realizar programas a corto plazo sin medir sus impactos a largo plazo, es necesario estudiar las modalidades para asegurar que el uso agrícola de los tepetates corresponda a un desarrollo sostenible, duradero y compatible con la problemática socioeconómica de la población local.

Prácticamente todos los estudios sobre la erosión de los tepetates se han realizado en parcela Wischmeier (Ruiz, 1987). Si bien esta metodología puede presentar un interés en términos de modelización de la susceptibilidad del material a la erosión (Oropeza, 1995), no se puede decir lo mismo cuando se pretende formular recomendaciones para los campesinos que van a trabajar estos nuevos suelos. Por ello, los experimentos objeto de este trabajo se efectúan en parcelas de aproximadamente 700 m^2. En efecto, se considera que los modelos de predicción de erosión que se generen con esta metodología serán más acordes con la realidad, pues en tales parcelas intervienen un mayor número de factores que pueden contrabalancearse. Siendo la parcela la unidad de estudio, no se pretende llegar a resultados que podrían ser utilizados a nivel del manejo de una cuenca. En efecto, para pasar de una escala a otra, se requiere no solamente tomar precauciones sino disponer de mayor cantidad de datos, ya que otros factores intervienen en la dinámica del agua y del arrastre.

A diferencia de otros trabajos realizados anteriormente en Tlaxcala en el marco del programa UE-ORSTOM-CP-UAT-UG (Quantin, 1992), se diseñó un programa donde los ensayos agronómicos y las medidas de erosión se efectúan a la par, lo que permite una mejor comprensión de las dinámicas en juego. Este programa es parte de un segundo proyecto cofinanciado por la UE y que cuenta con la participación de las mismas instituciones en México, además de otras en el Ecuador y en Chile.

El objetivo final de estos trabajos, es, a partir del conocimiento de los procesos que generan el escurrimiento y arrastre de los sedimentos, proponer soluciones y recomendaciones técnicas para limitar estos factores de degradación de los nuevos suelos.

METODOLOGÍA

La zona de estudio se encuentra en San Miguel Tlaixpan (Edomex) aproximadamente 15 km al este de Texcoco. Está localizada en la parte oriental de la cuenca de

México, a nivel de los 98° 47' 55" de longitud norte y 19° 29' 53" de latitud oeste. La altitud es de 2.555 m.s.n.m. El clima, según la clasificación de Köppen, es de tipo C(w1)(w), es decir templado subhúmedo, con un régimen de humedad ústico-údico (Peña y Zebrowski, 1992).

Características de las precipitaciones

Se colocaron 3 pluviómetros a una distancia de 100 m entre ellos a lo largo del área de experimentación. Uno de ellos se localizó cerca de un pluviógrafo de registro diario. En otro artículo presentado en este volumen (Prat, 1997), se detalla la metodología adoptada.

Características de las terrazas estudiadas

Las características de la preparación del tepetate t3 así como de las parcelas son detalladas en el artículo de Báez *et al.* (1997) presentado en este volumen. Se diseñaron 7 terrazas que fueron trabajadas de manera diferente, con lo que se trata de corroborar el efecto de un parámetro en otro, desde un punto de vista tanto agronómico como de conservación de suelos (cuadro 1).

Tratamiento	Ref.	Área (m^2)	Substrato	Prof.* (m)	Pendiente (%)
Referencia tepetate desnudo y no roturado	T0	1.800	Tepetate desnudo	**	2 a 10
Efecto profundidad roturación	T2	470	Tepetate roturado	0,60	4,7
Referencia monocultivo	T3	773	"	0,46	3,2
Efecto estiércol	T4	732	"	0,43	3,4
Efecto preparación de la tierra y plana (fina)	T5	792	"	0,44	2,5
Referencia (hasta inicios de 1995)	T6	1.152	"	0,40	4,4
A partir de inicios de 1995	T6a	733	"	0,40	4,4
Referencia suelo	T7	713	*Fæozem* vértico	0,53	5,9

*: Profundidad promedio de roturación, **: no roturado

Cuadro 1 - Características de las terrazas después de la roturación (salvo T0 no roturada)

En cuanto a los cultivos, de 1993 a 1996 se sembraron los siguientes:

Ref.	1993	1994	1995	1996
T2	Cebada + veza	Maíz + Haba + Frijol	Maíz + Haba	Cebada + Medicago p.
T3	Cebada	Maíz	Maíz	Cebada
T4	Cebada + veza	Maíz + Haba + Frijol	Maíz + Haba	Cebada + Medicago p.
T5	"	"	"	Maíz + Haba contreo
T6	"	"	"	Maíz + Haba
T7	"	"	"	Cebada + Medicago p.

Cuadro 2 - Condiciones de las terrazas de estudio de 1993 a 1996

Se trata de comparar los siguientes parámetros: asociación gramíneas + leguminosas vs. monocultivo, roturación normal vs. roturación profunda, aplicación de estiércol vs. abonos minerales, pendiente del 5-10 por ciento vs. pendiente plana, tepetate vs. suelo y en 1996, surcos con compartimentación —contreo— (T5) vs. surcos sin compartimentación (T6).

Medición de los escurrimientos y sedimentos arrastrados

Cada terraza tiene una pendiente general dirigida hacia un vertedor tipo H, el cual desemboca en una pileta de repartición de agua, de un volumen de alrededor de un metro cúbico. Esta pileta tiene a su vez una salida hacia una segunda pileta, donde se recupera un 1/20 ó 1/10, según los modelos, del total de agua. Finalmente, esta segunda pileta se vierte a su vez en un tambor de metal, también en una proporción de 1/20 ó 1/10 del volumen de agua que rebasa. Construidas de concreto, las piletas fueron pintadas para evitar la contaminación del agua por el cemento. A nivel del vertedor, se tiene un limnígrafo Stevens horizontal de registro diario, escala 1/1, con relojería de cuarzo (figura 1).

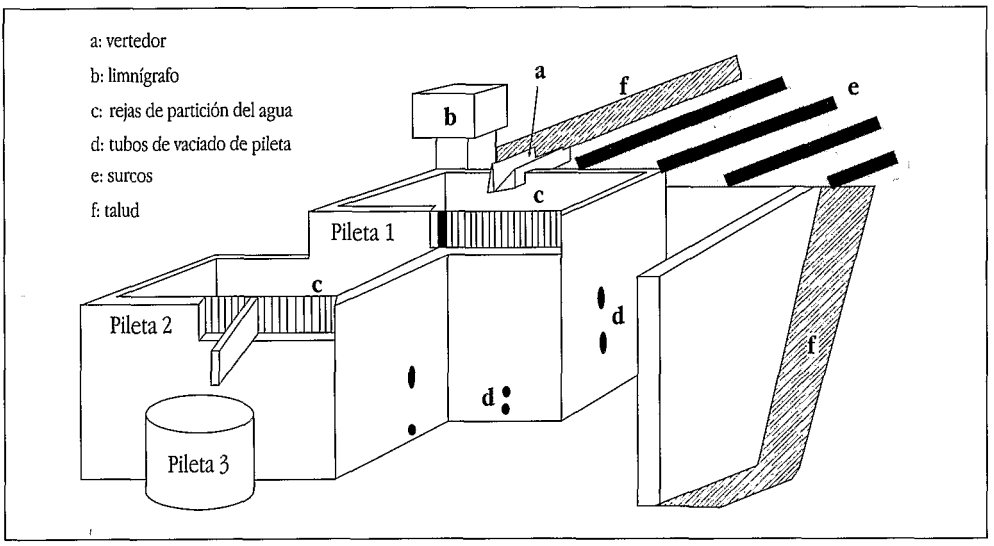


Figura 1 - Esquema de las instalaciones de captación de aguas y sedimentos

Después de cada aguacero se mide la altura de agua en las piletas y se recuperan todos los sedimentos en bolsas de plástico. Luego, se colocan dichos sedimentos en pequeñas charolas de zinc en una estufa a 105 °C durante uno a tres días, dependiendo de su grado de humedad.

El levantamiento de los limnigramas se realizó manualmente en una tabla de digitalización Summasketch conectada a una computadora a través de un módulo de HYDROM —programa desarrollado por el ORSTOM (Boyer *et al.*, 1994)—. Posteriormente, se procesaron todos los escurrimientos, independientemente de su duración o altura, utilizando ese mismo programa.

Análisis complementarios

Para completar los datos y mejorar su interpretación, se efectuaron una serie de mediciones, análisis y observaciones a lo largo de estos años. Así, se tomaron sistemáticamente muestras de agua cargada de sedimentos en suspensión, en las que se analizaron, en el laboratorio de fertilidad de suelos del CP, los siguientes parámetros: pH, conductividad eléctrica, N, P, principales bases, M.O. y cantidad de sedimentos en suspensión. Se efectuó también, a partir de 1994, el seguimiento de la evolución de la superficie de los suelos y de la cobertura vegetal (Lauffer *et al.*, 1997). En la medida de lo posible, estos datos fueron completados mediante un levantamiento semi-cuantitativo del estado de los surcos a lo largo y ancho de cada terraza. Se instaló igualmente un sistema sencillo para captar el agua y los sedimentos arrastrados del borde localizado entre las terrazas T2 y T3 a fin de observar el comportamiento del borde nuevamente construido. Finalmente, se efectuaron mediciones de humedad de suelo a lo largo y ancho de cada terraza.

Hasta ahora, todos estos datos han sido procesados parcialmente y los resultados correspondientes se presentan en otros artículos de este volumen. El resto queda por analizarse.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las lluvias

El análisis detallado de las lluvias aparece en el artículo de Prat, publicado en este volumen (1997).

En síntesis, recordaremos que el comportamiento anual de las lluvias es muy variable de un año a otro, en términos tanto de cantidades de precipitaciones como de su distribución a lo largo de cada temporada lluviosa (cuadro 3).

	1992	1993	1994	1995	1996	1992-1996
Número de días de lluvia	126	81	105	120	90	105
Altura total (mm)	654,4	397	735,6	768,3	582,7	627
Número de aguaceros registrados con el pluviógrafo y procesados	193	132	148	154	109	-
Altura de aguaceros registrados con el pluviógrafo y procesados	654,4	396	594,1	528,6	417,8	-
% de días de lluvias registradas vs. totales	99	99	86	70	72	-
R métrico	259,2	96	216	196,7	204,4	194,4
R usa	149,3	55,3	124,4	113	118,2	112
«Tipo» tentativo de clasificación del año pluviométrico	Normal y erosiva	Muy seco	Normal	Irregular	Seco e irregular	Año promedio

Cuadro 3 - Características principales de las lluvias de 1992 a 1996

Salvo en el año 1995 durante el cual la cuarta parte de las lluvias cayeron antes o después de la temporada de cultivo, normalmente el 90 % de las precipitaciones anuales ocurren entre mayo y octubre, siendo agosto el mes más lluvioso. En el 90 % de los casos,

las precipitaciones son aguaceros simples (≥ 3 mm), breves (50 % ≤ 30 mm) y de baja intensidad (90 % ≤ 10 mm/h). Se calculó que en términos de agresividad hacia los suelos, las precipitaciones anuales tienen valores medios ($R_{us} \approx 150$) que corresponden efectivamente a valores registrados en climas parecidos. Como es clásico, son una cuantas lluvias las que provocan la mayor parte de la erosión hídrica: 16 eventos de más de 10 mm, que representan el 50 % del total del volumen de lluvias, generan el 80 % del R_{us}.

Dada la brevedad de las precipitaciones, la intensidad máxima ocurrida en 5 minutos (o 10) durante un aguacero debería ser un índice mejor que el R basado en esa intensidad pero con una duración de 30 minutos.

Número de escurrimientos

La figura 2 presenta la suma de los escurrimientos mensuales obtenidos cada mes durante 4 años en las diferentes parcelas de experimentación.

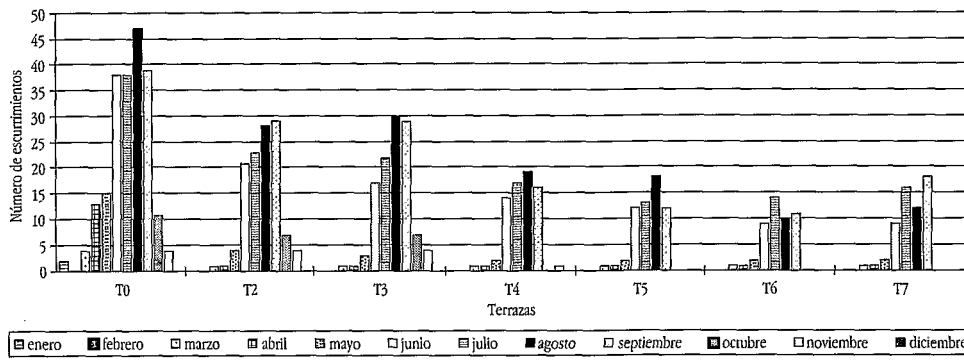


Figura 2 - Número de escurrimientos mensuales por terrazas de 1993 a 1996

Obviamente, la parcela de tepetate aflorante es la que presenta el mayor número de escurrimientos, seguida de las terrazas T2 y T3 que registran cerca de la mitad de los eventos ocurridos en T0. Si bien había que esperarse un elevado número de escurrimientos en la parcela de monocultivo T3, es sorprendente tener una respuesta similar en la parcela de cultivos asociados y con una roturación a 60 cm en lugar de 40 cm. La terraza en que se aplicó estiércol (T4) tiene un comportamiento intermedio entre las tres anteriores y las tres siguientes. Las terrazas T5, T6 y T7 presentan resultados globales similares aunque en cada año hubo diferencias notables. Es interesante anotar que, pese a haber reducido la superficie de T6 en 1995 para tener una dimensión similar a la de las demás (± 700 m^2), se tiene el mismo tipo de respuesta que cuando esa parcela medía cerca de 1.150 m^2. El hecho de que la T2 tenga una superficie 30 % inferior a las demás, podría incidir en las altas tasas de escurrimiento, en la medida en que el agua tiene menos área de microdepresión donde podría estancarse, tal como ocurre en las demás terrazas.

En términos cualitativos, se podría clasificar, para cada año de medición, la importancia del número de escurrimientos de una terraza en comparación con las otras:

1993: T0 >> T2 ≈ T3 ≈ T4 ≈ T5 > T6 ≈ T7
1994: T0 >> T2 ≈ T3 >> T4 ≈ T5 > T6 ≈ T7
1995: T0 >> T2 ≈ T3 >> T4 > T5 ≈ T6 > T7
1996: T0 >> T2 ≈ T3 >> T7 > T4 > T6* ≈ T5* (*con maíz + haba)
Total: T0 >> T2 ≈ T3 >> T4 > T5 ≈ T7 > T6

Coeficiente de escurrimiento

En términos de coeficientes de escurrimiento encontrados cada mes en cada terraza, los resultados presentados en los cuadros 4 y 5, muestran que se registran las mismas tendencias que en el caso del número de escurrimientos: T0 presenta las mayores tasas de escurrimiento, seguida de T2 y T3, teniendo T4 un comportamiento intermedio entre las anteriores y las que siguen, T5, T6 y T7, que presentan los menores coeficientes.

Cuadro 4 - Número de escurrimientos ocurridos por terrazas vs. coeficiente de escurrimiento (1993 a 1996)

Ref.	T0	T2	T3	T4	T5	T6	T7
	Número						
0	53	38	40	40	38	33	36
10	31	20	11	11	11	3	7
20	24	11	7	3	5	3	6
30	23	7	9	4	1	2	6
40	24	18	13	3	0	0	0
50	16	5	14	3	0	2	0
60	15	7	6	1	0	0	0
70	10	4	4	0	0	0	0
> 80	8	1	3	0	0	0	0
Total	204	111	107	65	55	43	55

Nota: El número total de escurrimientos corresponde al número registrado y no ocurrido, como en el caso del cuadro anterior, ya que hubo varios eventos durante los cuales se juntaron los escurrimientos y sedimentos.

Cantidad de sedimentos arrastrados

Los resultados de los sedimentos arrastrados presentan las mismas tendencias que los escurrimientos (cuadros 5 y 6).

Si bien es cierto que la T0 registró la mayor cantidad de sedimentos arrastrados, es importante señalar que durante los cuatro años, los valores máximos no superan las 30 t/ha, lo que es elevado pero no exagerado en comparación con las 300 t/ha que se han podido registrar en otros experimentos. En cuanto a T2 y T3, el promedio de 10 t/ha es demasiado alto considerando que son terrazas aplanadas y con pendiente débil. En el caso de las demás terrazas, la cantidad de sedimentos perdidos se inscriben dentro el margen considerado aceptable, aunque sería preferible disminuirla.

Pese a haberse tomado muestras de 1 litro de agua cargada de sedimentos durante 3 años, no se logró establecer realmente una relación entre las cantidades de sedimentos de las muestras y las recolectadas efectivamente en las piletas. En efecto, esta técnica no permite obtener buenos resultados. Por lo tanto, se presentan únicamente los datos de los sedimentos de las piletas. Por otra parte, se considera que los sedimentos recogidos

después de la primera pileta corresponden a sedimentos en suspensión mientras que en ella, predominan los sedimentos de fondo. Por ello, se calculó, para los eventos que rebasaron la primera pileta, la relación entre los sedimentos de fondo (principalmente arena y grava arrastradas) y aquellos en suspensión (arcilla y limo).

Mes	Lluvia mens. mm	T0 Kr %	T0 Eros t/ha	T2 Kr %	T2 Eros t/ha	T3 Kr %	T3 Eros t/ha	T4 Kr %	T4 Eros t/ha	T5 Kr %	T5 Eros t/ha	T6 Kr %	T6 Eros t/ha	T7 Kr %	T7 Eros t/ha
Enero	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Febrero	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Marzo	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Abril	0,0	22,7	0,582	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mayo	16,6	1,8	0,001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Junio	98,2	33,4	1,558	9,2	0,388	3,4	0,131	0,2	0,014	0,6	0,039	0,7	0,011	-	-
Julio	10,06	31,9	3,491	16,7	3,948	13,4	0,649	11,0	1,092	5,6	0,597	7,1	0,494	9,2	0,429
Agosto	72,4	32,0	1,821	18,2	0,992	8,3	0,091	3,8	0,069	3,7	0,059	3,8	0,104	2,6	0,090
Sept.	84,9	12,7	1,196	8,4	0,484	5,3	0,101	2,3	0,085	1,9	0,060	1,5	0,024	1,4	0,034
Oct.	14,2	18,4	0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nov.	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dic.	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Año 1993	397,0	26,9	8,774	13,2	5,812	7,9	0,972	4,7	1,261	3,0	0,756	4,0	0,633	4,9	0,553
Enero	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Febrero	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Marzo	40,0	62,4	2,148	*	0,125	*	0,010	0,2	0,005	0,9	0,009	1,5	0,010	0,8	0,010
Abril	23,3	31,7	0,437	17,1	0,032	4,6	0,008	0,3	0,006	1,0	0,006	0,9	0,003	0,5	0,001
Mayo	49,2	41,2	1,163	40,1	0,564	12,0	0,230	6,8	0,117	23,7	0,271	8,7	0,151	0,2	0,001
Junio	111,5	31,5	3,317	21,6	1,321	28,2	0,874	7,4	0,293	3,5	0,161	7,7	0,182	0,4	0,013
Julio	184,2	61,6	10,497	52,3	10,064	57,6	6,615	47,0	2,275	26,6	0,655	35,2	1,245	0,9	0,047
Agosto	212,8	56,3	8,172	23,7	2,143	34,6	3,197	6,4	0,392	4,6	0,188	1,6	0,031	0,6	0,003
Sept.	85,7	53,6	2,737	26,4	1,246	37,4	10,019	15,4	0,603	9,7	0,114	2,9	0,006	1,7	0,012
Oct.	26,9	32,6	0,406	7,4	0,012	13,1	0,011	-	-	-	-	-	-	-	-
Nov.	2,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dic.	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Año 1994	735,6	50,7	28,876	31,2	15,506	38,6	11,963	17,3	3,692	10,3	1,404	13,3	1,627	0,8	0,086
Enero	28,8	23,3	0,034	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Febrero	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Marzo	12,7	12,3	0,086	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Abril	14,6	4,4	0,011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mayo	60,9	12,7	0,303	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Junio	117,6	56,0	4,446	48,5	2,769	31,0	0,934	19,4	0,287	13,0	0,340	5,7	0,169	0,1	0,004
Julio	85,2	32,2	1,888	56,2	1,252	44,8	0,629	28,3	0,302	15,4	0,155	7,3	0,100	-	-
Agosto	206,0	47,9	9,941	29,4	3,258	48,6	2,021	20,6	0,889	13,6	0,500	2,4	0,027	0,3	0,008
Sept.	49,1	23,8	0,842	8,1	0,086	11,1	0,102	-	-	-	-	-	-	-	-
Oct.	61,0	32,8	1,880	16,7	0,287	18,9	0,217	-	-	-	-	-	-	-	-
Nov.	64,4	33,4	1,029	17,2	0,264	12,2	0,183	-	-	0,5	0,004	-	-	-	-
Dic.	68,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Año 1995	768,3	37,9	20,460	29,4	7,916	29,3	4,085	21,3	1,479	11,2	0,998	5,1	0,296	0,2	0,012
Enero	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Febrero	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Marzo	11,7	58,8	0,292	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Abril	32,5	80,4	1,124	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mayo	32	47,9	0,886	17,5	0,175	53,9	0,171	-	-	-	-	-	-	-	-
Junio	101	55,2	3,476	68,7	2,055	69,4	7,546	29,2	0,991	0,2	0,003	26,7	0,341	60,9	4,052
Julio	121	52,8	4,159	53,4	4,119	54,1	2,593	38,9	0,44	10,6	0,094	31,4	0,369	26,9	0,486
Agosto	77,5	27,9	0,786	33,4	0,731	31,1	0,559	9,1	0,012	-	-	-	-	13,1	0,087
Sept.	172	56,8	7,254	56,8	3,942	61,4	2,798	27,9	0,196	0,8	0,019	3,7	0,125	23,7	0,372
Oct.	35	26,0	0,193	6,0	0,018	5,1	0,006	-	-	-	-	-	-	-	-
Nov.	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dic.	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Año 1996	582,7	53,3	18,170	49,7	11,040	53,4	13,673	30,3	1,639	4,0	0,116	18,5	0,834	29,8	4,997

Nota: El Kr está calculado con base en las precipitaciones que generaron el escurrimiento y no en la pluviometría mensual.

Cuadro 5 - Erosión y promedios del coeficiente de escurrimiento (Kr) por mes y por año, de 1993 a 1996

Cuadro 6 - Cantidad de sedimentos arrastrados (t/ha en seco) de 1993 a 1996

Año	Terrazas						
	T0	T2	T3	T4	T5	T6	T7
1993	8,8	5,8	1,0	1,3	0,8	0,6	0,6
1994	28,9	15,5	12,0	3,7	1,4	1,6	0,1
1995	20,5	7,9	4,5	1,5	1,0	0,3	0,0
1996	18,2	11,0	13,7	1,6	0,1	0,8	5,0
Total	76,4	40,2	31,2	8,1	3,3	3,3	5,7
Prom.	19,1	10,1	7,8	2,0	0,8	0,9	1,4

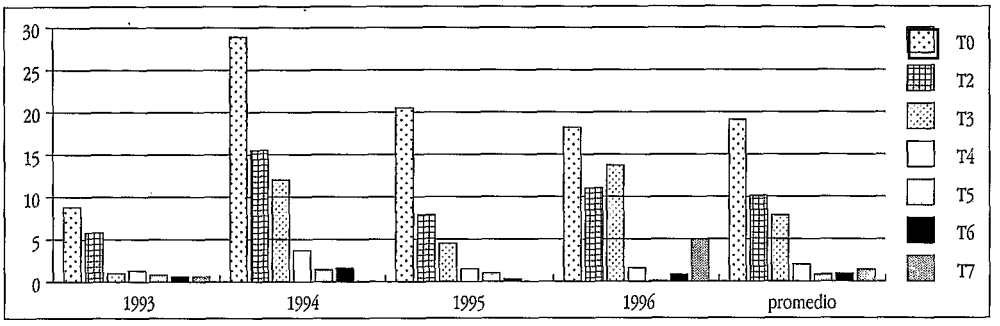


Figura 3

El cuadro 7 muestra que en los materiales arrastrados en la T0 predominan los sedimentos de fondo, mientras que en las demás terrazas aquellos en suspensión. Este resultado se debe en parte al endurecimiento del tepetate aflorante en T0 que favorece el desprendimiento de partículas grandes, mientras que el tepetate roturado de las demás terrazas es blando y suelto por lo que son partículas pequeñas las arrastradas. Por otro lado, este tipo de relación muestra que la erosión del tepetate aflorante es principalmente de tipo regresivo, mientras que en las otras terrazas es de tipo laminar.

Cuadro 7 - Porcentaje de sedimentos en suspensión (t/ha en seco) de 1993 a 1996

Año	Terrazas						
	T0	T2	T3	T4	T5	T6	T7
1993	38	52	57	53	44	46	48
1994	36	59	66	76	50	77	0
1995	12	56	59	66	59	53	0
1996	40	67	68	90	81	80	67
Prom.	34	60	67	71	53	64	62

La erosión regresiva del tepetate endurecido y aflorante implica que debido a la localización de la zona de estudio, en la parte alta de una loma, se mida el inicio de los procesos de arrastre y escurrimiento. El incremento y la concentración de estos últimos a medida que aumenta la pendiente implican que a nivel de la ruptura de esta se cree una

caída de agua. A su pie se forma una cavidad que derrumba poco a poco los terrenos que dominan y así avanza la cañada hacia la parte alta del relieve. Hoy en día, se puede apreciar este tipo de erosión a nivel del piedemonte de la Sierra Madre donde afloran los tepetates. Obviamente, a partir de cierto momento, cada derrumbe corresponde a varias decenas de toneladas de materiales y no a las 30 t/ha/año como se midió. Por ello, en términos de manejo de cuenca, los resultados del presente trabajo corresponden a una pequeña parte de lo que realmente ocurre a nivel de una loma entera.

La erosión laminar que afecta a los terrenos cultivados implica que los sedimentos más finos, es decir aquellos que juegan el papel principal en la retención del agua y de los fertilizantes orgánicos como minerales, son los que se pierden en su mayoría.

Relación entre características pluviométricas y erosión

El principal factor del escurrimiento y de la erosión de los suelos son las precipitaciones. Los datos para establecer una relación entre volumen de agua escurrido/cantidad de sedimentos transportados y los diferentes factores ligados a las características de cada lluvia se están procesando actualmente, por lo que no es posible aún presentar resultados.

Relación entre profundidad de roturación y erosión

Mientras al inicio de estas experimentaciones se pensaba que T3 podría presentar una de las menores tasas de escurrimiento debido a su mayor capacidad de almacenamiento de agua, resulta ser, paradójicamente, la que mayores escurrimiento y erosión registra entre las terrazas de tepetate roturado. Sin embargo, este resultado no se debe a la roturación a mayor profundidad sino al encostramiento más rápido del nuevo suelo. Las costras no solamente limitan la infiltración sino que impiden la emergencia de las plántulas. Si bien el maíz y el haba logran emerger, la cebada no siempre consigue hacerlo, por lo que hay menos plantas y más espacios descubiertos que determinan un mayor escurrimiento y arrastre así como una menor producción.

Todavía no se ha logrado esclarecer la causa del mayor encostramiento en esta terraza con relación a las demás: ¿fase particular del tepetate? ¿mayor cantidad de partículas finas a raíz del paso más frecuente del Caterpillar para roturar el tepetate a mayor profundidad? ¿efecto del tamaño menor de la terraza?...

Relación entre tipo de cultivo y erosión

La comparación entre tipos de cultivo se puede hacer de dos formas: monocultivo vs. asociación y cebada vs. maíz.

T3 presenta, al igual que T2, el mayor número de escurrimientos y la mayor erosión de las terrazas de tepetate roturado. Independientemente de los factores intrínsecos al tepetate, está muy claro que el monocultivo favorece la erosión y disminuye la infiltración. También se pueden apreciar claramente los resultados en términos de rendimientos (Báez *et al.*, 1997; cuadro 9).

El cultivo de cebada, asociado o no, genera mayores escurrimientos y arrastres que el de maíz y haba. La comparación del comportamiento de T2, T3 y T4 con relación a T5 y T6 en 1996 lo muestra claramente (cuadro 8).

Pese a que la cobertura vegetal al momento de la floración es mayor en la cebada (y aún más en su asociación con Medicago) que en el maíz, el espacio que existe entre los pies de las plantas de cebada permite la circulación del agua a lo largo y ancho de toda la terraza mientras que en el maíz, los surcos limitan tal flujo. Al no ser controlada,

	Terrazas						
	T0	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Número de escurrimientos	46	32	30	11	4	6	23
Coeficiente de escurrimiento Kr (%)	53,3	49,7	53,4	30,3	4,0	18,5	29,8
Cantidad de sedimentos (T/ha)	18,2	11,0	13,7	1,6	0,1	0,8	5,0

Cuadro 8 - Número de escurrimientos, coeficiente de escurrimiento y cantidad de sedimentos arrastrados durante 1996

Terraza	Maíz			Haba		
	Altura al 50 % de floración	N° de matas/m²	Rendimientos (t/ha)	Altura al 50 % de floración	N° de matas/m²	Rendimientos (t/ha)
T5 (contreo*)	2,0	1,6	2,2	1,2	1,7	0,6
T6 (sin contreo*)	2,0	1,6	2,1	1,0	1,3	0,3

Cuadro 9 - Estimación de los rendimientos en maíz y haba en T5 y T6 en 1996

el agua se concentra generando una mayor capacidad de arrastre. Por otro lado, el encostramiento que se forma después de la siembra, al inicio de la temporada de lluvia, permanece durante todo el periodo de cultivo —pues no se puede trabajar la tierra para no dañar a las plantas— y contribuye también a amplificar los procesos erosivos (Lauffer *et al.*, 1997).

Relación entre pendiente y erosión

La relación entre pendiente y erosión parece significativa, pero en el caso de la T6, que, pese a presentar la mayor pendiente, tiene un comportamiento erosivo similar a T5 que tiene la menor pendiente.

Si bien en un inicio se pensaba que era el tamaño de T6 lo que podía incidir en el escurrimiento, su reducción en 1995 no cambió los resultados. El hecho de presentar menos escurrimientos a partir del segundo mes de la temporada de lluvia coincide con una mayor cobertura vegetal en esa terraza en comparación con las demás. Sin embargo, eso no explica la mejor emergencia y crecimiento de los cultivos en ella. Se están analizando los datos de granulometría y de descripción de perfiles de cultivo para intentar explicar esta situación.

Relación entre aplicación de estiércol y erosión

El efecto de la aplicación de estiércol al tepetate (T4) no aparece claramente en términos de escurrimiento y arrastre. Esta situación se debe en parte a las fechas y reducidas dosis de aplicación del estiércol que limitaron el crecimiento de los cultivos, disminuyendo así la cobertura vegetal, lo que favoreció un más rápido encostramiento del suelo en esta parcela en comparación con las demás (T5 y T6) (Lauffer *et al.*, 1997). Por ello, se observa que los principales eventos registrados en esa terraza corresponden al inicio de la época de lluvia, mientras que a partir de la segunda parte de la temporada, habiendo crecido las plantas, se generan menos escurrimientos y arrastres.

En cuanto al posible efecto de la materia orgánica en la estructura, no se lograron determinar hasta el momento efectos reales que pudieran tener una repercusión tendiente a disminuir la erosión.

Relación entre surcos con y sin contreo y la erosión

En 1996, se efectuó un experimento en T5 y T6, con y sin contreo respectivamente, a fin de determinar el impacto de dicha práctica agrícola poco frecuente en la región donde está localizado el experimento. En primera instancia, con base en los registros pluviométricos disponibles para estos 5 años, parece muy factible el sistema de contreo, ya que el impacto de las precipitaciones puede ser controlado mediante esa práctica. Por eso, se escogió «cerrar» los surcos cada 5 m, después de cada labor.

Además, la insuficiente humedad al inicio de la temporada de lluvia es uno de los factores que limitan drásticamente la obtención de buenos rendimientos. Gracias al contreo, se logra captar e infiltrar mayor cantidad de agua que en el sistema tradicional. Sin embargo, con el régimen de lluvia que imperó en 1996, este sistema no fue muy útil ya que las lluvias fueron bastante constantes a partir de fines de agosto. Por ello, entre T5 y T6 no hay tanta diferencia en términos de rendimientos en el caso del maíz, aunque en el haba sí existe una diferencia notable, la misma que fue acentuada por problemas fitosanitarios y una cantidad superior de haba verde robada en T6 (cuadro 9). De todas formas, el hecho de captar mayor cantidad de agua permite a las plantas crecer mejor y cubrir mas rápidamente el suelo, protegiéndolo así de la energía de las gotas de agua y consecuentemente disminuyendo el encostramiento, el escurrimiento y el arrastre de sedimentos.

Pese a que se registraron pocos escurrimientos en T5 y T6, en la segunda hubo casi el doble de eventos (5) que en la primera (3). En términos de volumen de agua y cantidad de sedimentos, las diferencias fueron más marcadas, ya que a nivel anual, la tasa de escurrimiento en T6 fue casi 5 veces superior a la de T5 y la cantidad de sedimentos arrastrados 6 veces mayor (cuadro 8).

Los resultados muestran que a pesar de unas lluvias muy intensas, el sistema de contreo no fue afectado a lo largo del año, aun después de la lluvia del 31 de julio que, con un R_{us} de 45, una energía cinética máxima de casi 300 J/m^2 y una intensidad máxima durante 5 minutos de 13,2 mm/h y durante 10 minutos de 19,0 mm/h, no logró destruir el sistema de contreo, y ello a pesar de que la cobertura vegetal no alcanzaba el 25 %.

Así, se aprecia claramente la gran ventaja que presenta este sistema en comparación con el sistema tradicional practicado en el área de estudio.

CONCLUSIONES

En la zona de San Miguel Tlaixpan (Texcoco), los eventos que generan erosión son muy pocos al año: 16 eventos ≥ 10 mm, que representan el 50 % del volumen total de las lluvias y provocan el 80 % del R_{us}.

La roturación de tepetate t3, la formación de terrazas y la preparación agrícola de estos nuevos suelos reduce de 3 a 10 veces tanto el escurrimiento como el arrastre de sedimentos. Así, de unas 20 t/ha de pérdida de tierra en promedio en el tepetate no roturado se puede reducir la erosión a 10 t/ha en el caso de monocultivo, y a una tonelada en los demás sistemas de cultivos.

Mientras en el caso de un tepetate no roturado, los sedimentos gruesos representan las dos terceras partes del total, en los demás casos predominan ampliamente los sedimentos finos. Esto se debe tanto a la compacidad del material como a las diferencias

entre los procesos erosivos. En el tepetate compacto y endurecido, se trata de una erosión regresiva, mientras que en el tepetate roturado y el suelo, es una erosión laminar.

La irregularidad de las lluvias, tanto en términos de altura como de intensidad y repartición en el tiempo, limita finalmente en cierta medida su capacidad erosiva ya que nunca se saturan los suelos. Por lo tanto, la siembra de la asociación maíz-haba en contreo es sumamente efectiva, disminuyendo de manera importante la erosión. Sin embargo, a la inversa, la irregularidad de las lluvias, en particular al inicio de la temporada, hace que, en el caso de las gramíneas como trigo, cebada, etc., sea muy recomendable esperar que el suelo constituya una reserva hídrica antes de sembrar. De esta forma no hay riesgo de que mueran parte de las plantas, lo que crearía en las parcelas áreas sin cobertura vegetal, favoreciendo importantes escurrimientos y arrastres, especialmente con estos cultivos.

No se logró detectar efecto alguno de la aplicación de estiércol en la erosión. En comparación con el monocultivo, la siembra en asociación, en especial de maíz con haba, reduce drásticamente los procesos erosivos. La formación de surcos limita también el fenómeno, en comparación con las siembras al voleo. Lo más adecuado es la siembra con contreo de unos 5 m de largo que, además de limitar la erosión, aumenta los rendimientos.

La zona de estudio tiene un tipo de lluvia que finalmente no es muy erosiva ($R_{us} \approx 150$), lo que implica que sería conveniente efectuar mediciones en otras áreas del eje neovolcánico para validar las recomendaciones aquí formuladas.

Referencias bibliográficas

BÁEZ, A.; ASCENCIO, E.; PRAT, C.; MÁRQUEZ, A., 1997: *Análisis del comportamiento de cultivos en tepetate t3 incorporado a la agricultura pluvial (1993 a 1995), Texcoco, México*, en este volumen.

CASENAVE, A.; VALENTIN, C., 1989: *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*, ORSTOM, París, Francia

JANEAU, J.-L.; JEROME, G.; MIRANDA, M. E., 1992: Evolución estructural de la superficie de suelos con tepetate, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 374-378.

JEROME, G., 1991: *Étude des réorganisations superficielles sous pluies naturelles sur sol volcanique induré,* tepetate, *dans la vallée du fleuve Texcoco au Mexique*, Mémoire de fin d'études, ISTOM, Le Havre, Francia.

LAUFFER, M., 1996: *Facteurs et processus de réorganisations supeficielles sur* tepetates *cultivés. Bassin du fleuve Texcoco, Edomex (Mexique)*, Mémoire de maîtrise, ISTOM, Paris, Francia, 93 p.

LE BISSONNAIS, Y., 1988: *Analyses des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action de la pluie*, Thèse INRA, París, Francia.

LEROUX, Y., 1994: *Étude des réorganisations superficielles de différentes parcelles de* tepetate *cultivées sur un versant nord-est de la vallée de Mexico, au Mexique*, Mémoire de maîtrise, ISTOM, Paris, Francia, 77 p.

PEÑA, D.; ZEBROWSKI, C., 1992: *Estudio de los suelos volcánicos endurecidos (tepetates) de las cuencas de México y Tlaxcala (México). Informe del mapa morfopedológico de la vertiente occidental de la Sierra Nevada*, anexo al informe final, Contrato CCE-ORSTOM N° TS2-0212, 101 p.

PRAT, C., 1997: *Análisis de las características de las precipitaciones de 1992 a 1995 en el área experimental de San Miguel Tlaixpan (Texcoco, México)*, en este volumen.

RUIZ, J.F., 1987: *Les micro-organisations pelliculaires superficielles formées sous pluie simulée sur sols ferralitiques de savanes*, Thèse INA-PG, París, Francia.

Uso de modelos matemáticos de erosión hídrica para la optimización de la rehabilitación de tepetates con fines agrícolas

José Luis Oropeza M., José Donaldo Ríos B., José Salazar L.

Abstract

Eighty percent of Mexican soils (1,575,415.2 km^2) are of volcanic origin. A great part of this type of soils (30,700 km^2) present indurated formations locally called tepetates *in their profiles. Erosion in* tepetates *is of the order of 25 t/ha/year in agricultural land and more of 80 t/ha/year in bare soils and the other special forms of erosion such as gullies.* Tepetate *reclamation in order to induce agricultural practices dates back to prehispanic times and actually, this action has a great demand by marginal rural peoples of central Mexico.*

The objective of this research is to determine the parameters that lead to erodibility in tepetates *type t3 through the associate effects of natural rainfall and runoff, to evaluate the detach and deposition rate in accordance with use, management and slope. Also, we will evaluate the effect of the sediment yield and runoff. The results validate the mathematical model SWRRB (A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management).*

Keywords: *Mathematical Model - Water Erosion -* Tepetate *Reclamation - Relationship between Rainfall-Runoff-Soil Loss-Nutrient Loss - Sediment Yield*

INTRODUCCIÓN

La mayor parte de los suelos del centro de México son de origen volcánico, y están localizados en relieves ondulados y altamente susceptibles a la erosión hídrica. Se ha estimado que esta afecta a un 80 % del territorio nacional, situación similar a la de otros países de América Latina y del Caribe. Así, la casi totalidad de los suelos de origen volcánico exponen a la superficie sus materiales subyacentes llamados localmente, en el eje neovolcánico mexicano, «tepetates».

Los tepetates son suelos que dentro de sus perfiles presentan horizontes endurecidos que pueden estar situados a profundidades variables. Se estima en que el centro de México los tepetates cubren una superficie de 30.700 km^2 (Zebrowski, 1992) y han sido afectados a tal punto por la erosión hídrica que las capas superiores de suelo se han perdido totalmente, poniendo al descubierto horizontes endurecidos subyacentes.

La alta producción de sedimentos generada por los tepetates ocasiona además una serie de problemas secundarios, entre los que cabe mencionar: el azolvamiento de las obras de infraestructura hidráulica y su consiguiente pérdida de capacidad de almacenamiento, la alteración en la morfología y estabilidad en la red de drenaje de los ríos, el encostramiento y ensalitramiento de los suelos, la destrucción y alteración de la ecología natural de los ríos y zonas bajas en general, la contaminación de las aguas de escurrimiento superficial por parte de sedimentos, el deslizamiento de taludes y la formación de flujos superficiales difíciles de controlar en los terrenos de ladera.

Desde el punto de vista social, los tepetates son terrenos marginales que limitan drásticamente las posibilidades de desarrollo agrícola, ganadero y forestal precisamente cuando las parcelas de los agricultores se encuentran enclavadas en este tipo de material volcánico de difícil manejo y baja productividad (Oropeza Mota, 1994).

Actualmente, el crecimiento demográfico y la presión urbana en el centro de México ha propiciado que muchos productores agrícolas pobres y marginados se vean obligados a explotar, las tierras altas y de ladera, donde los suelos son altamente erosionables debido a prácticas inadecuadas de labranza y lluvias intensas, que han creado extensas zonas de erosión con cárcavas profundas.

El objetivo de este artículo es comparar el escurrimiento y la erosión en un tepetate natural (no roturado) y en un tepetate cultivado, con diferentes tratamientos, a fin de precisar los procesos erosivos (escurrimientos, pérdidas de suelo y nutrimentos) y validar el modelo matemático SWRRB (*A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management*) para predecir un balance hidrológico en las parcelas y llevar a cabo un mejor control de los escurrimientos superficiales y caudales máximos.

LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El experimento se localiza en el área comunal de San Miguel Tlaixpan, estado de México, entre 98° 47' 55" de longitud Oeste y 19° 29' 53" de latitud Norte, al Oriente de la cuenca de México. La altura media es de 2.255 m.s.n.m.

En esta zona, el tepetate tipo t3 aflora a la superficie. Tiene una consistencia dura en estado seco, pero friable y plástica en estado húmedo, una estructura masiva con fisuras de retracción, una textura areno-arcillo-limosa o arcillo-arenosa. Presenta bajas conductividad hidráulica y retención de agua.

Al roturarse, se fragmenta alcanzando una porosidad total del 48 al 55 %,. Posteriormente, la porosidad se pierde por selladura, permitiendo velocidades de infiltración de hasta 5 mm/h y altas tasas de escurrimiento superficial (Oropeza Mota, 1994).

MÉTODOS Y MATERIALES

Se construyeron 22 parcelas de escurrimiento de 2 x 22 m (44 m^2), cubriendo una superficie de aproximadamente una hectárea.

A fin de obtener las características físicas de la lluvia, del escurrimiento superficial y los parámetros de erosionabilidad en el sitio experimental, se instaló un pluviógrafo de registro diario tipo Rossbach y un pluviómetro de cubeta tipo A. Además, se equipó a cada uno de los 22 lotes de escurrimiento con un vertedor tipo LH con capacidad máxima de 2 l/seg, un limnígrafo de registro diario Stevenson FW-1 y 2 tinacos de lámina galvanizada para almacenar conjuntamente, en cada evento de lluvia, los escurrimientos superficiales y los sedimentos transportados.

Se midieron la precipitación y el escurrimiento superficial en cada evento de lluvia, llevándose un registro continuo de las entradas (precipitación) y salidas (escurrimiento,

sedimentos y nutrimentos) en cada lote de escurrimiento. Con base en la información anterior, se analizaron los patrones de precipitación, (hora de inicio y término del evento, cantidad, intensidad, duración, energía cinética, EI_{30}), las características físicas del escurrimiento superficial (hora de inicio y término, cantidad, duración, escurrimiento máximo y esfuerzo hidráulico, coeficiente de escurrimiento, profundidad y velocidad del escurrimiento) y pérdida de suelo y nutrimentos mayores (nitrógeno, fósforo).

Para la determinación de las características físicas de la lluvia y del escurrimiento superficial, los pluviogramas y limnigramas fueron digitalizados y procesados de manera individual mediante el programa de cómputo electrónico SIMPLE (Sistema Integral Modular para lecturas de Pluviogramas y Limnigramas Especiales), desarrollado en el Área de Física de Suelos del Programa de Edafología del Instituto de Recursos Naturales (Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas de Montecillo, México). Igualmente, la pérdida de suelo y nutrimentos que resultaron de cada evento de lluvia, fueron determinados en el laboratorio del Área de Física de Suelos y Aguas mediante los métodos tradicionales.

Los tratamientos considerados en el experimento son 7, con 3 repeticiones y cuatro efectos (cuadro 1).

Tratamiento	Lotes	Pendiente (por ciento)	Manejo de los lotes									
			Roturado		Remoción		Malla		Cultivo		Estiércol	
			sí	no	sí	no	sí	no	sí	no	sí	no
T1	3, 9, 11	4,69	x		x		x			x		x
T2	2, 5, 7	4,59	x			x	x			x		x
T3	1, 8, 10	4,68	x		x			x		x		x
T4	4, 6, 12	4,75	x			x		x		x		x
T5	13, 15	6,61	x			x		x	x		x	
T5	14, 16	4,77	x			x		x	x			x
T6	17, 20, 22	8,56		x		x		x		x		x
T7	18, 19, 21	9,22		x		x	x			x		x

Cuadro 1- Descripción de las características, los efectos y el manejo de tratamientos en los lotes de escurrimiento

Efecto de la malla: Se utilizó malla de plástico N° 12 (malla de mosquitero) para medir el efecto que produce la energía cinética de la gota de lluvia al momento de chocar contra el suelo. La malla de plástico sirvió para amortiguar y reducir la erosión por salpicadura en el lote.

Efecto de la remoción: La remoción del tepetate consiste en utilizar aperos manuales de labranza para remover el suelo y uniformizar el tamaño de los agregados entre 3 y 4 cm, para luego exponerlos a la agresividad de la lluvia y determinar la erosión máxima.

Efecto sin remoción: El efecto sin remoción se refiere al tepetate que no fue removido sino únicamente roturado y nivelado. Se evitó el laboreo manual, no hubo uniformidad en el tamaño de los agregados.

Efecto del cultivo: El lote de escurrimiento fue sembrado con cebada (*Hordeum vulgare*) de manera tradicional. En él no se utilizó la malla plástica debido a la cobertura

natural de la vegetación. Con el propósito de observar el efecto de la materia orgánica en el tepetate, dos de los cuatro lotes sembrados con cebada fueron abonados con 20 t/ha de estiércol vacuno, lo que equivale a 88 kg de estiércol por lote.

Con el propósito de tener unidades experimentales uniformes, a excepción de los lotes testigos, todos los lotes fueron roturados a una profundidad de 40 cm, nivelados y laboreados. La pendiente del terreno roturado se uniformizó entre 4,54 y 4,79 por ciento, y la del terreno natural fue de 8,56 y 9,22.

Los datos de lluvia, escurrimiento, sedimentos y nutrimentos registrados servirán de base en la determinación de los parámetros de erosionabilidad y la validación de los modelos matemáticos SWRRB para simular y predecir el volumen de escurrimiento y la producción de sedimentos (Oropeza Mota, 1990). Se compararon los datos observados en el campo y los calculados a través de los modelos SWRRB.

La eficiencia de predicción se calculó utilizando un coeficiente de eficiencia propuesto por Nash (1988), citado por Oropeza Mota (1990, 1995) que se escribe como sigue:

$$EF = \frac{F_{obs}^2 - S^2}{F_{obs}^2}$$

donde: EF = coeficiente de eficiencia (en %); F_{obs} = varianza independiente del modelo; S^2 = varianza residual

$$F_{obs}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}}\right)^2}{N}$$

donde: Q_{obs} = escurrimiento observado (en mm); N = número de eventos observados; $\overline{Q_{obs}}$ = media de los escurrimientos observados (en mm)

El coeficiente de eficiencia EF se interpreta como la proporción de la varianza del escurrimiento observado Q_{obs} explicado por el modelo. Si EF = 1, el ajuste es perfecto. Por el contrario, si EF < 0, el escurrimiento calculado por el modelo no presentó correlación con el simple escurrimiento medio.

Las prácticas vegetativas fueron evaluadas midiendo la altura y la cobertura vegetal de plantas al azar en tramos de observación, mediante el método del cobertómetro de espejos y mirillas móviles, para los cultivos del trigo, maíz y frijol cada 10 días respectivamente. Con base en la información anterior, se obtuvieron curvas de desarrollo vegetativo, que se relacionaron con las pérdidas de suelo y la energía cinética de la lluvia ocurridas en la misma época, definiendo de esta manera las prácticas de manejo del suelo.

RESULTADOS

Características físicas de la lluvia y parámetros de erosionabilidad

La lluvia provoca la erosión por salpicadura, destruye y disgrega los agregados del suelo en elementos finos, haciéndolos fácilmente transportables por el escurrimiento. Asimismo, favorece la inundación de la superficie, provocando la selladura de los poros, limitando la infiltración y aumentando la tasa de escurrimiento.

Con el propósito de evaluar la influencia de la cantidad de lluvia y de su intensidad en la erosión en los tepetates, primeramente se agruparon y clasificaron por su cantidad y por su intensidad media todos los eventos de lluvia ocurridos durante los años 1994, 1995 y 1996 (figura 1).

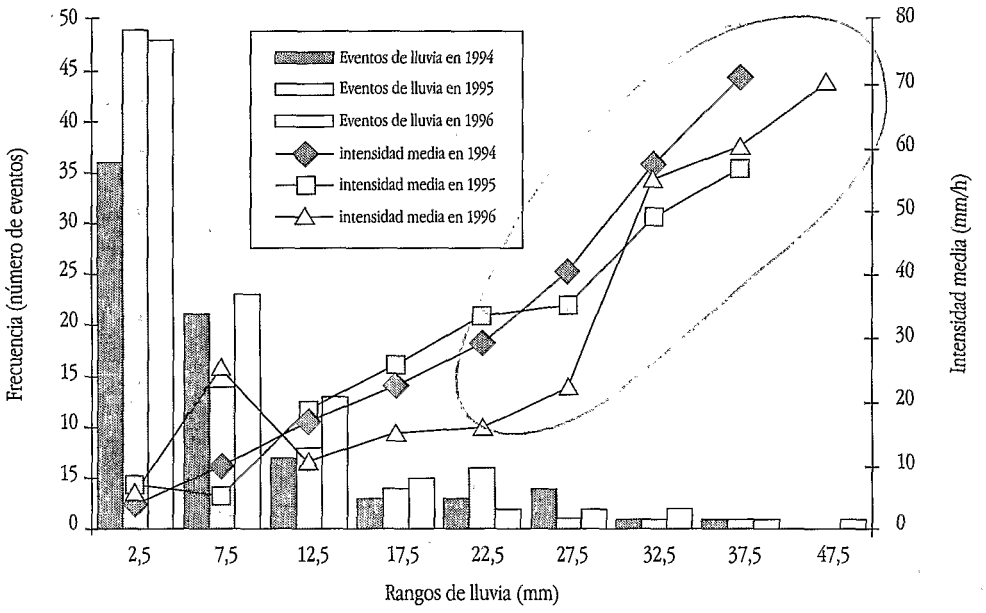


Figura 1 - Distribución gráfica de la frecuencia de eventos de lluvia ocurridos y clasificación por su cantidad e intensidad media, durante 1994, 1995 y 1996

El registro de lluvias fue únicamente de 7 meses, periodo que cubre los meses de abril a octubre correspondiente al desarrollo vegetativo del cultivo de cebada (*Hordeum vulgare*). De acuerdo con la figura 1, el número total de eventos de lluvia para los años 1994, 1995 y 1996 fue de 76, 84 y 75 con una precipitación total de 623, 511 y 518 mm respectivamente. Los intervalos medios de clase de la cantidad de lluvia variaron de 2,5 a 47,2 mm, con intensidades medias entre los rangos observados de 3,75 y 71,07 mm/h.

Otras características físicas de las lluvias registradas en el período indicado fueron la distribución mensual de la cantidad total de lluvia y su relación con dos de sus parámetros de agresividad para causar erosión, es decir, su energía cinética total (E_{Ct}) y el producto de ella con una intensidad de lluvia en 30 minutos (EI_{30}). Se seleccionaron los parámetros de agresividad anteriores por ser los que influyen en mayor medida en la destrucción y desgaste de los agregados del suelo, los que inducen a la compactación y formación de costras y los de mayor capacidad de provocar erosión. La distribución de tales parámetros se presenta en las figuras 2 y 3 para los años 1994, 1995 y 1996.

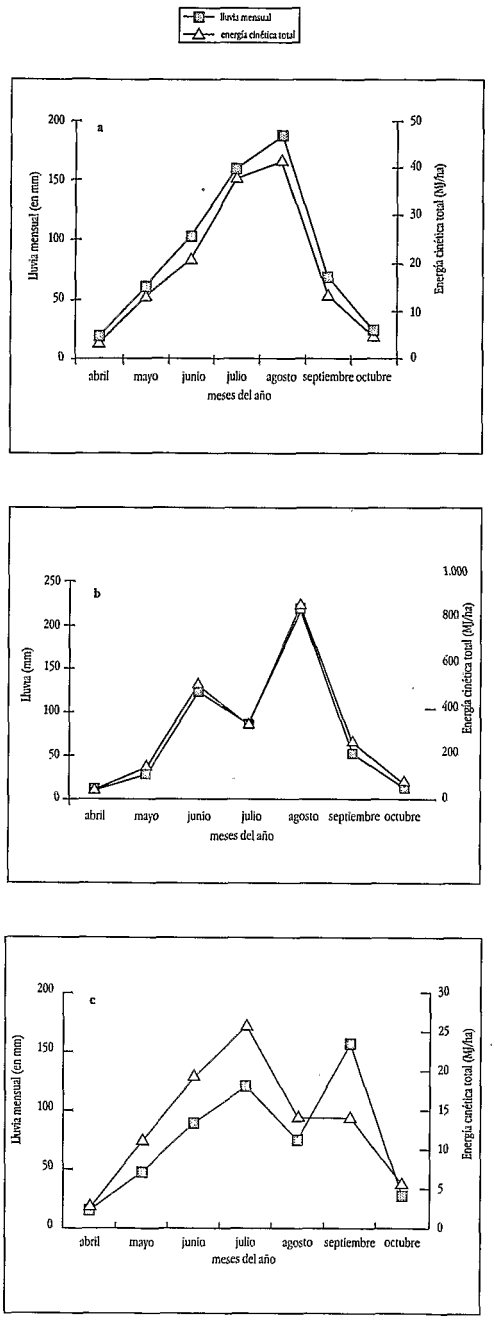


Figura 2 - Distribución de la lluvia anual y su energía cinética total (a: 1994; b: 1995; c: 1996)

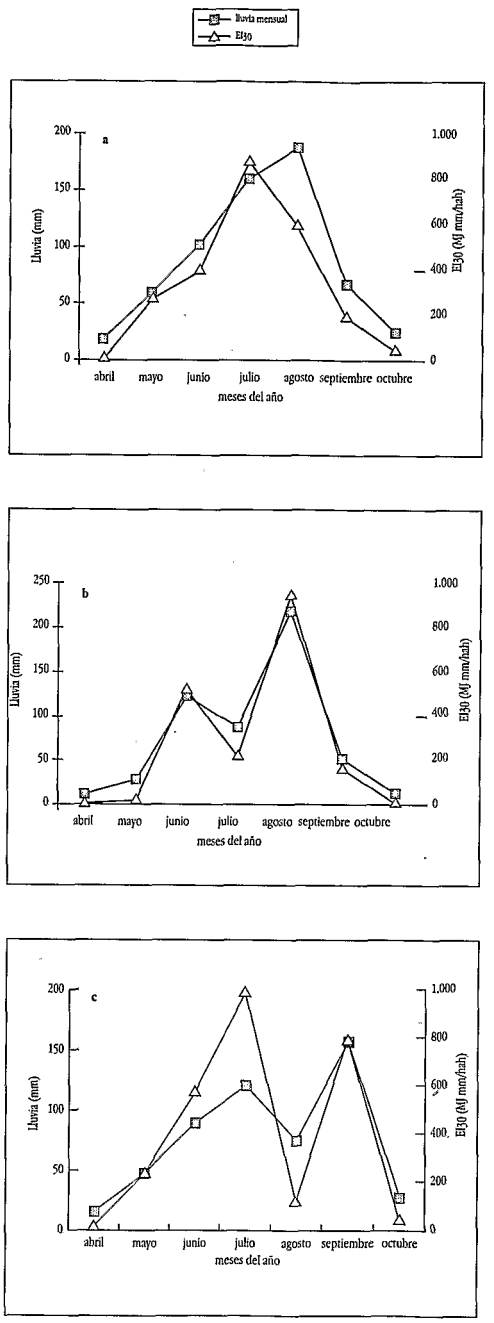


Figura 3 - Distribución de la lluvia anual y su índice de erosionabilidad (a: 1994; b: 1995; c: 1996)

La acción de la lluvia sobre el suelo depende de su cantidad y de su intensidad. Así, una lluvia de alta intensidad de solo 10 mm provoca más daños que una de baja intensidad de 30 mm. Las figuras 2 y 3 muestran que los meses más lluviosos y de mayor agresividad son julio y agosto en los tres años considerados en el sitio experimental.

Escurrimiento superficial y características físicas del suelo

El escurrimiento superficial se produce cuando el tepetate no puede absorber toda el agua de lluvia que recibe, dando origen a distintas formas de pequeños canalillos. Una vez que la acción dispersiva de la gota de lluvia produce el desprendimiento de las partículas individuales del suelo, el escurrimiento se encarga de transportar los elementos finos, nutrimentos y materia orgánica del suelo, disminuyendo de esta manera su potencial productivo, físico y biológico. Posteriormente, los sedimentos son depositados aguas abajo si la pendiente disminuye o encuentra un obstáculo. De no ser así, pueden alcanzar la red de drenaje del río y llegar hasta el lago de Texcoco.

En la figura 4 se presenta la variación mensual de la cantidad de lluvia, del escurrimiento superficial y de la pérdida de suelo, que tuvo lugar durante el período de abril a octubre para los años 1994, 1995 y 1996.

La figura 5 presenta la variación total del escurrimiento superficial y la pérdida de suelo por tratamiento y por lote de escurrimiento para los mismos años. Se observa que en todos los tratamientos y en cada repetición, los lotes presentaron valores altos de escurrimiento superficial. Esto se debe a que los tepetates presentan bajo porcentaje de porosidad y, generalmente, la mayor parte de los poros se encuentran sellados por elementos finos del suelo.

En la figura 6, aparecen los resultados correspondientes a la pérdida de suelo total por tratamiento y por lote para los tres años de evaluación. En ella se observa que la pérdida de suelo por tratamiento y por lote, para los tres años, resultó ser muy consistente (excepto en el caso del cultivo de cebada), lo que permite aseverar que hubo consistencia experimental en los tratamientos y en su manejo. No obstante, la diferencia en pérdida de suelo entre 1994 y 1995 fue muy significativa, ya que en el segundo año las pérdidas se duplicaron con respecto a las del anterior. Las diferencias en cantidad de suelo perdido se deben al incremento de la energía cinética total de la lluvia en 1995, pese a la diferencia en el número de eventos y la cantidad de lluvia. Esta misma observación se puede realizar en las figuras 3a y 3b.

Escurrimiento, pérdida de suelo y pérdida de nutrimentos

Los tepetates naturales expuestos a la erosión son suelos que producen altas tasas de escurrimiento superficial y generalmente pobres en nitrógeno, fósforo total y materia orgánica. Se ha reportado que la baja fertilidad es el principal factor limitante de los tepetates para su reincorporación agrícola. Algunos experimentos desarrollados en este tipo de suelo muestran que nitrógeno y fósforo son los elementos que se encuentran, en general, en niveles inferiores a la demanda de los cultivos.

El cuadro 2 presenta las tasas de escurrimiento superficial medidas en el lote y calculadas por el modelo SWRRB, la pérdida de nutrientes totales anuales (nitrógeno y fósforo total) y la pérdida de suelo total anual medida y calculada por el mismo modelo, por tratamiento y por lote para los años 1994, 1995 y 1996.

A pesar de la baja fertilidad que la literatura reporta para los tepetates, durante los tres años de evaluación del presente experimento, los tepetates t3 presentaron una enorme

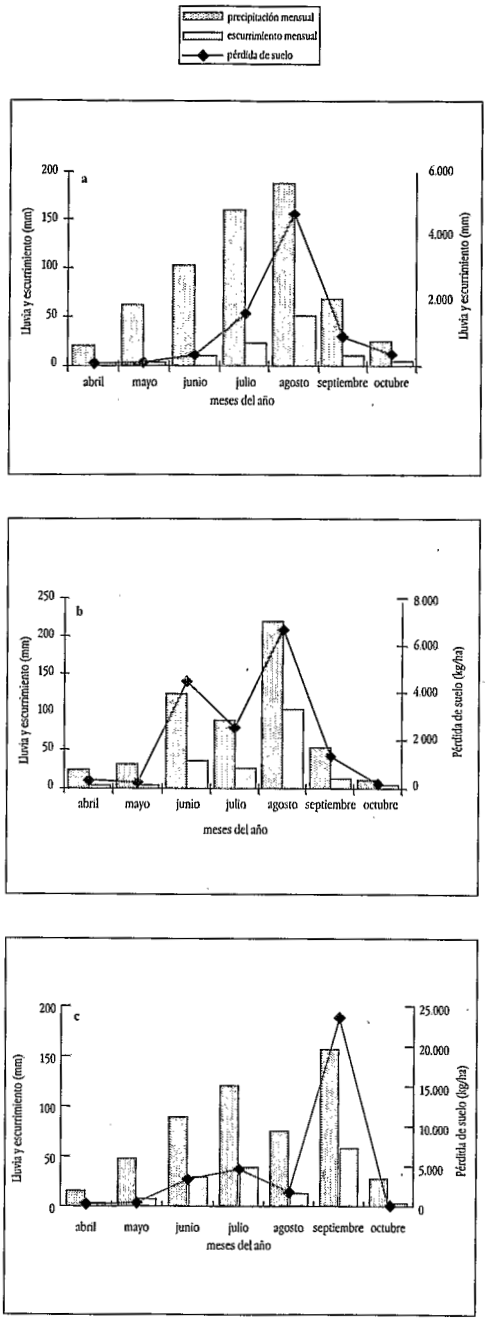


Figura 4 - Valores mensuales de lluvia, escurrimiento superficial y pérdida de suelo (a: 1994; b: 1995; c: 1996)

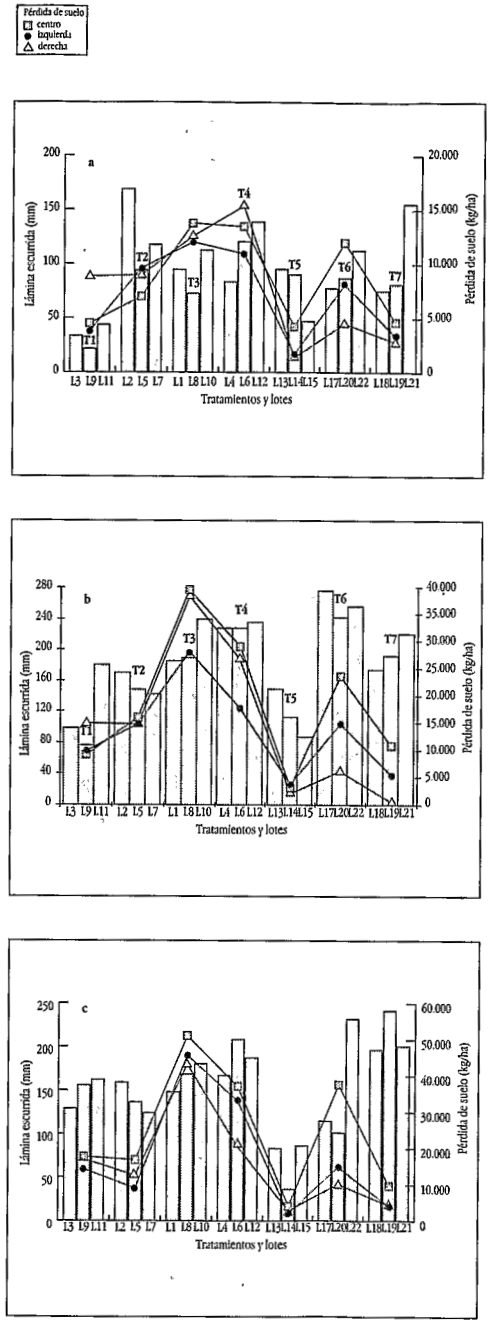
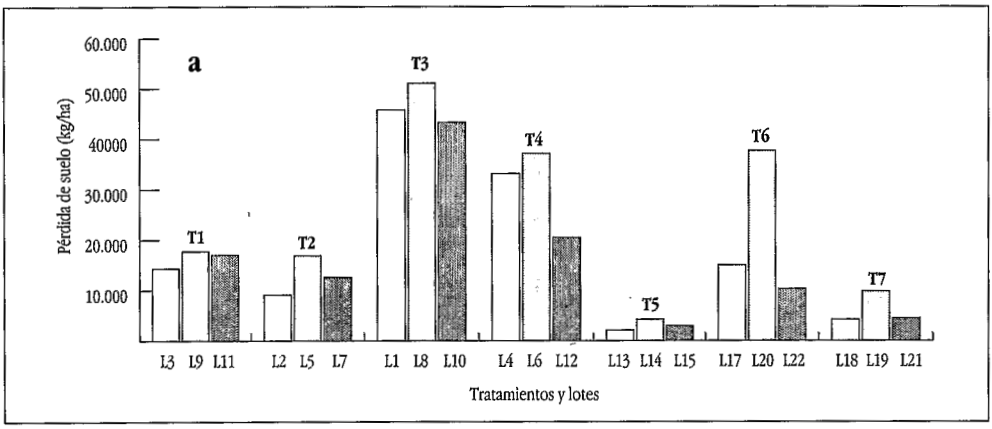
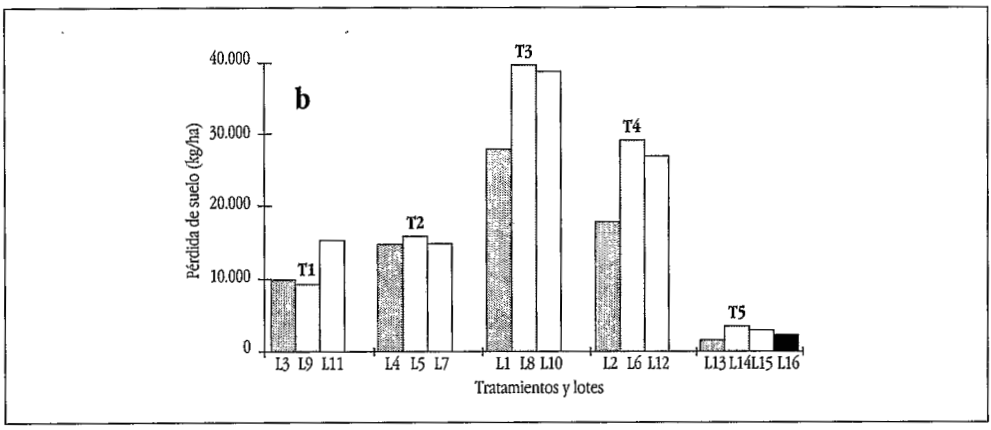


Figura 5 - Lámina escurrida y pérdida de suelo resultante de cada tratamiento, por lote de escurrimiento (a: 1994; b: 1995; c: 1996)





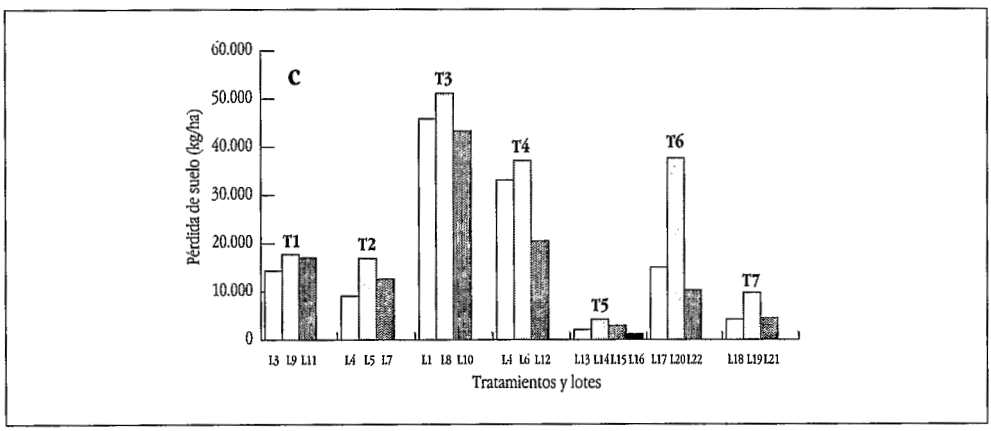


Figura 6 - Pérdida de suelo en los lotes de escurrimiento correspondiente a los 7 tratamientos y sus repeticiones (a: 1994; b: 1995; c: 1996)

Cuadro 2

Resultados de:

- **escurrimiento superficial observado (Q_{obs}),**
- **escurrimiento superficial calculado mediante el modelo SWRRB (Q_{cal}),**
- **pérdidas de nitrógeno total (N),**
- **pérdidas de fósforo total (P),**
- **pérdidas de suelo medidas (A_{obs}),**
- **pérdidas de suelo calculadas (A_{cal}),**

por tratamiento y por lote
(a: 1994; b: 1995; c: 1996)

a

T	Lotes	Q_{obs} (mm)	Q_{cal} (mm)	N (kg/ha)	P (kg/ha)	A_{obs} (kg/ha)	A_{cal} (kg/ha)
T1	3	33,5	37,2	4,4	0,9	3.820	4.129
	9	21,7	28,4	4,3	1,1	4.532	4.619
	11	43,8	47,1	4,6	1,0	8.881	8.913
T2	2	168,7	171,5	3,2	1,2	9.611	10.115
	5	94,0	97,1	3,3	1,1	7.003	7.310
	7	117,4	122,4	3,1	1,3	8.971	9.113
T3	1	94,6	100,8	6,3	1,8	12.004	11.845
	8	72,6	81,3	6,0	1,9	13.749	14.281
	10	112,4	124,8	6,2	1,9	12.568	11.956
T4	4	83,3	91,5	5,2	2,2	10.956	10.751
	6	120,1	127,4	5,2	1,9	13.452	13.879
	12	138,5	141,6	5,0	1,7	15.349	15.873
T5	13	94,9	103,3	1,0	0,6	1.699	2.982
	14	89,9	91,4	0,9	0,7	4.245	3.750
	15	47,0	47,1	1,0	0,6	1.392	2.562
	16	–	114,8	1,1	0,3		12.847
T6	17	77,4	81,6	2,2	1,1	8.142	7.132
	20	87,0	94,2	2,2	1,2	12.002	11.103
	22	112,2	117,9	2,1	1,0	4.550	5.141
T7	18	75,1	90,1	1,9	1,9	3.372	3.811
	19	81,3	97,2	1,8	2,0	4.672	4.639
	21	155,1	169,1	1,9	1,7	2.799	2.918

b

T	Lotes	Q_{obs} (mm)	Q_{cal} (mm)	N (kg/ha)	P (kg/ha)	A_{obs} (kg/ha)	A_{cal} (kg/ha)
T1	3	99,0	112,3	3,3	1,4	9.883	10.119
	9	76,2	81,5	2,4	1,1	9.176	9.295
	11	180,0	207,6	4,9	1,5	15.290	15.544
T2	2	169,4	161,3	3,8	1,5	14.783	15.284
	5	148,8	165,0	3,3	1,1	15.912	16.191
	7	141,8	160,1	3,7	1,3	14.878	15.267
T3	1	184,4	207,3	5,6	2,1	27.805	28.522
	8	188,9	203,4	6,0	2,8	39.482	40.172
	10	238,3	224,8	7,7	3,3	38.593	39.651
T4	4	226,9	231,2	5,9	3,9	17.823	18.124
	6	226,7	247,2	5,4	3,1	29.026	29.138
	12	234,1	251,1	6,5	3,5	27.034	27.294
T5	13	72,3	109,1	1,0	0,4	1.471	1.761
	14	148,8	171,2	1,4	0,7	3.534	3.650
	15	113,2	137,0	1,0	0,5	3.076	3.164
	16	87,1	100,1	0,9	0,8	2.293	2.746
T6	17	274,9	281,6	2,6	1,2	14.913	14.993
	20	240,6	291,6	2,1	1,7	23.478	24.010
	22	255,1	277,2	2,0	2,0	6.270	6.841
T7	18	173,8	190,1	2,3	1,5	5.349	5.184
	19	191,8	217,3	2,6	2,0	10.903	11.332
	21	218,9	229,9	2,4	1,6	6.270	6.612

c

T	Lotes	Q_{obs} (mm)	Q_{cal} (mm)	N (kg/ha)	P (kg/ha)	A_{obs} (kg/ha)	A_{cal} (kg/ha)
T1	3	128,8	131,5	3,7	1,1	14.353	14.418
	9	155,7	159,3	2,6	1,2	17.766	17.983
	11	161,9	170,1	4,4	1,3	17.058	17.325
T2	2	158,8	163,6	3,7	1,6	9.110	10.182
	5	136,3	138,4	3,2	1,6	16.898	16.284
	7	124,0	128,7	3,7	1,6	12.609	12.835
T3	1	148,0	152,3	5,8	3,4	45.785	45.824
	8	168,4	170,8	6,2	3,4	51.102	51.621
	10	179,8	186,9	7,9	3,2	43.302	43.673
T4	4	166,7	170,3	6,1	3,1	33.150	33.412
	6	208,2	215,4	5,6	3,2	37.158	37.161
	12	187,0	190,8	6,6	3,3	20.493	20.531
T5	13	83,2	90,4	0,9	0,3	2.103	2.643
	14	36,6	43,3	0,8	0,5	4.214	4.350
	15	86,3	90,4	1,0	0,5	2.931	3.137
	16	71,1	78,8	0,8	0,4	1.189	1.346
T6	17	114,8	121,5	2,3	1,8	15.006	15.193
	20	101,3	113,8	2,1	1,8	37.663	38.108
	22	231,8	244,3	2,0	1,8	10.284	10.134
T7	18	196,4	201,9	2,6	2,0	4.203	5.115
	19	241,0	253,9	2,6	2,0	9.801	10.132
	21	200,5	213,6	2,5	2,0	4.467	4.434

pérdida de nutrimentos arrastrados por el escurrimiento superficial, lo que hace pensar que el nitrógeno proviene de la lluvia, ya que en el experimento no se utilizó ningún tipo de fertilización mineral. Únicamente, los lotes 13 y 15 del tratamiento T5 fueron abonados con estiércol. Sin embargo, las mayores pérdidas de nitrógeno y fósforo ocurrieron en los lotes 1, 8 y 10 representados por el tratamiento T3 y los lotes 4, 6 y 12 representados por el tratamiento T4 respectivamente. De igual manera, las mayores tasas de escurrimiento y pérdida de suelo fueron muy coincidentes entre los mismos lotes y tratamientos en todos los años.

Hidrogramas y sedigramas

Durante el desarrollo del experimento, se muestrearon algunos eventos de lluvia y escurrimiento a fin de observar el comportamiento del escurrimiento y la pérdida de suelo. Los cuadros 3 y 4 presentan las características de la lluvia, del escurrimiento superficial y de la producción de sedimentos distribuidos en el tiempo, durante el evento de lluvia ocurrido el 14 de agosto de 1995. Asimismo, en la figura 7 aparece la distribución gráfica de la evolución del escurrimiento y la producción de sedimentos. Es importante hacer notar que esta información se registró para el lote 20 del tratamiento T6, no roturado, sin remoción, sin malla y sin cultivo.

Dicha figura muestra que la producción de sedimentos (sedigrama) resultó ser superior al escurrimiento superficial (hidrograma) durante la evolución del evento. Lo anterior ya ha sido reportado en particular por Fenton (1980) y Larson *et al.* (1985) entre otros. Sin embargo, otros registros similares realizados en lotes distintos, mostraron importantes diferencias entre la producción de sedimentos y el escurrimiento para lluvias de menor magnitud.

Fecha	Inicio (h,mn)	Final (h,mn)	D_{ll} (mn)	L_{ll} (mn)	I_{30} (mm/h)	E_{Ct} (MJ/ha)	EI_{30} (MJ.mm/ha.h)
8/14/95	13,29	19,26	388	23,97	32,2	5,51	177,35

D_{ll} = duración del evento de lluvia, L_{ll} = lámina llovida, EI_{30} = intensida de la lluvia en 30 minutos
E_{Ct} = energía cinética total, EI_{30} = índice de erosionabilidad de Wischmeier

Cuadro 3 - Características de la lluvia ocurrida el 14 de agosto de 1995 en el caso del lote 20 del tratamiento T6, no roturado, sin remoción, sin malla y sin cultivo

Inicio (h,mn)	Final (h,mn)	D_e (mn)	T_p (n)	$Q_{máx}$ (L:s)	Ve (L)	Le (mm)	CE	A (kg/ha)
14,12	18,44	272	166	0,431	609,7	13,9	0,58	1.186

T_p = tiempo al pico, D_e = duración del escurrimiento, Ve = volumen escurrido
Le = lámina escurrida, CE = coeficiente de escurrimiento, A = pérdida de suelo

Cuadro 4 - Características del escurrimiento superficial ocurrido el 14 de agosto de 1995 en el caso del lote 20 del tratamiento T6, no roturado, sin remoción, sin malla y sin cultivo

CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación serán de utilidad práctica para la roturación de los tepetates, además de proveer un punto de partida para estudios futuros sobre control de erosión hídrica y rehabilitación de tepetates.

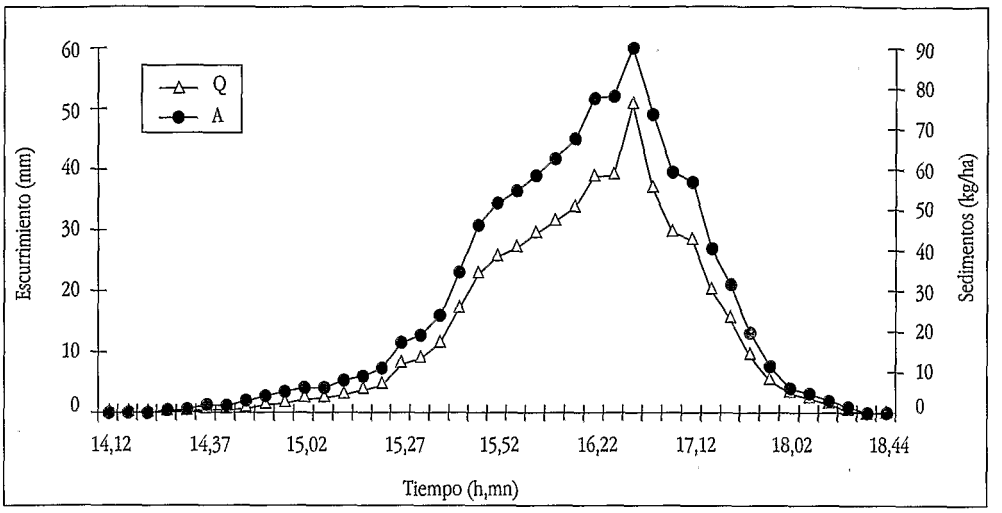


Figura 7 - Comportamiento gráfico del hidrograma (Q) y del sedigrama (A) durante el evento de lluvia registrado en 14 de agosto de 1995

El modelo SWRRB utilizado en este experimento para validar y comparar los escurrimientos y la pérdida de suelo medida y calculada reveló tener consistencia en la simulación. Los valores obtenidos para el coeficiente de eficiencia propuesto por Nash permiten aseverar que el modelo puede ser utilizado para predecir con amplio margen de seguridad la relación lluvia-escurrimiento-pérdida de suelo.

La producción y concentración de sedimentos en los tepetates resultó ser muy variable, pero está estrechamente correlacionada con la cantidad de escurrimiento y la energía cinética total de la lluvia. La acción de la lluvia sobre el suelo a su vez depende de su cantidad y de su intensidad. Una corta lluvia de alta intensidad provoca más daños que una lluvia más prolongada de menor intensidad.

La diferencia en pérdida de suelo entre 1994 y 1995 fue muy significativa, ya que las pérdidas en el segundo año prácticamente se duplicaron respecto a las del año anterior. Sin embargo, en 1996, los valores correspondientes se mantienen.

Probablemente la pérdida más severa en la productividad a largo plazo a partir de la erosión de los tepetates es la de capacidad de retención de agua disponible para la planta. La selladura y/o el taponamiento de los poros del suelo debida(o) a partículas finas, incrementa el escurrimiento, siendo la pérdida de capacidad de retención de agua disponible más severa en los tepetates naturales que en los roturados.

Puesto que la lluvia y el escurrimiento varían entre los lotes, resulta difícil estimar una pérdida de rendimiento general para esta serie experimental. Los valores en el rendimiento de la cebada aportan datos valiosos. Es importante hacer notar que la producción de cebada en los lotes con incorporación de materia orgánica fue ligeramente mayor en contraste con los lotes sin ella, lo que hace pensar que 6 meses es muy poco tiempo para que la materia orgánica se mineralice.

Durante los tres años de evaluación del presente experimento, los tepetates t3 presentaron una enorme pérdida de nutrimentos arrastrados por el escurrimiento superficial,

lo que hace pensar que el nitrógeno proviene de la lluvia, ya que en el experimento no se utilizó ningún tipo de fertilización mineral.

Dado que los tepetates presentan una estructura masiva, dúrica y consolidada, la roturación, remoción de agregados y rasadura con maquinaria pesada es el único medio para hacer productivos suelos de esta clase. Con el objeto de estabilizar y controlar la erosión hídrica en los tepetates de uso agrícola, las superficies rasadas y/o niveladas deberán una pendiente máxima permisible del 3 por ciento y una longitud no mayor a 150 m.

Referencias bibliográficas

FENTON, T. E., 1980: Soil Erosion in the Corn Belt, Problems and Solutions, in *Proc. of Quaternary Geology and Geomorfological Symp.: Soil Erosion*, Geol. Soc. Am., Atlanta, GA. 17-20. Nov. 1980.

LARSON, W. E.; FENTON, T. E.; SKIDMORE, E. L.; BENBROOKC, M., 1985: *Effects of Soil Erosion on Soil Properties as Related to Crop Productivity and Classification*, Soil Erosion and Crop Productivity, ASA-CSSA-SSSA,677, South Segoe Road, Madison,WI 53711,USA.

OROPEZA M., J. L., 1990: «Modelización del escurrimiento, materiales en suspensión y concentración de nitratos en cuencas agrícolas», ponencia en el XXIII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo,Comarca Lagunera, Nov. 4-9/1990.

OROPEZA M., J. L., 1995: Modelación del escurrimiento superficial en terrenos agrícolas con pendiente, en *Terra*, Vol. 13, N° 4, Sociedad Mexicana del Suelo, Montecillo, México, p. 454-463.

ZEBROWSKI, C. 1992: Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 15-23.

Factores de la erosión y prácticas agronómicas productivas en suelos formados sobre estrato de tepetate

José Donaldo Ríos B., José Luis Oropeza M.

Abstract

The objective of this research was to study some agronomic practices for soil conservation with the capacity to obtain high levels of productivity on tepetate. *This paper also describes the results of a research project made to study and generate index values for rainfall erosivity (factor R), soil erodibility (factor K), use and management of soil and cover (factor C). Field plots with some vegetal covers were used to obtain experimental data for predicting and evaluating soil erosion. Rainfall, soil erosion and runoff were recorded daily while the vegetal cover was measured periodically during the growth period of the vegetation. The crop yields were estimated at the end of the growth period. The rates of erosion and runoff can be decreased by using agronomic practices for soil conservation which also have high crop yields. The annual average erosivity by rainfall was 1,873.4 MJ mm / ha hr, with minimum and maximum values of 756 and 2,898 MJ mm / ha hr. The erodibility was dynamic in time with an annual average value of 0.020 t ha hr/MJ mm ha.*

Keywords: *Rainfall - Erosivity - Erosion - Runoff - Erodability - Productivity*

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, dentro del ámbito de la investigación y la enseñanza agrícola, ha sido muy común el uso del término «sostenible». En el campo de la conservación de suelos, este concepto siempre ha estado implícito. Las primeras prácticas de conservación y mejoramiento de suelos son prácticas vegetativas, apoyadas en principios agronómicos, que permiten proteger al suelo de la erosión, mejorar su fertilidad, así como romper ciclos biológicos para evitar la incidencia de plagas y enfermedades. En México, durante muchos años, las primeras prácticas recomendadas, promocionadas y aplicadas tanto por el gobierno federal como por los productores, fueron las prácticas vegetativas. Eran realizadas directamente por el productor, quien asumía la inversión y se encargaba de su ejecución. Posteriormente, se promocionaron, difundieron y aplicaron prácticas artificiales que, en una primera etapa, fueron ejecutadas directamente por el gobierno federal, recibiendo el agricultor un pago por participar en tal ejecución, pero sin intervenir en el diseño o selección de las prácticas. Esto ocasionó que los productores rechazaran y

destruyeran lo realizado por esos medios, quizá por dos razones: primeramente, para volver a ejecutar el trabajo y recibir nuevamente un pago, y en segundo término, porque las prácticas no se adaptaban al sistema y medios de cultivo del productor quien las había aceptado por la retribución económica. En la actualidad, la construcción es pagada por el gobierno federal y las obras se realizan a través de contratos con constructoras particulares. El problema se ha mantenido pues la participación del productor en la selección y diseño de las prácticas sigue siendo nula, lo que continúa provocando su rechazo. Adicionalmente, se presenta el problema de la supervisión de las obras contratadas; en algunos casos estas existen solo en el papel, y en otros, no se respetan los procedimientos prescritos ni las dimensiones de las obras.

Todo este relato, ubicado en el tiempo, plasmado en la literatura y apoyado por la investigación, ha ocasionado una confusión en torno al concepto de conservación de suelos. Se olvidaron las prácticas vegetativas y agronómicas, como elementos de protección y mejoramiento de los suelos y promotores de la fertilidad y la productividad del suelo. Se ha confundido la conservación de suelos, con la recuperación o formación de suelos.

En las cuencas ubicadas al Oriente del valle de México, el gobierno federal, a través del ahora Proyecto Lago de Texcoco, ha realizado una gran variedad de prácticas y obras de conservación de suelos y aguas, con el objetivo principal de reducir la cantidad de azolve que llega a las áreas de inundación del lago de Texcoco. Dicho azolve, se origina en su mayor parte en los ecosistemas conocidos como tepetates; el resto de ecosistemas presentes en la cuenca, como bosques y pastizales, generan cantidades poco significativas de sedimentos. En este aspecto, las áreas agrícolas ocupan el segundo lugar en cuanto a la cantidad de sedimentos aportada (Figueroa, 1975).

Una vez localizada geográficamente la fuente principal de aporte de sedimentos, se realizaron en estas áreas de tepetates diversas prácticas y obras cuyo principio fue roturar el suelo para incrementar la infiltración, propiciar el establecimiento de una cobertura vegetal, así como para controlar y regular los escurrimientos superficiales y la cantidad de azolve que llega a las partes bajas de las cuencas. Así, se roturaron tepetates para construir terrazas tanto para uso agrícola como para reforestación, y se construyeron zanjas-trinchera y presas de control de azolve.

Específicamente, para la incorporación de los tepetates roturados a la actividad agrícola, desde la óptica de formar y conservar el suelo evitando la erosión, pero sobre todo de hacer de este estrato roturado un suelo productivo, se inició un proyecto de investigación en el Colegio de Postgraduados de Montecillo. En tal proyecto se proponen, evalúan y seleccionan prácticas vegetativas y agronómicas para conservación de suelos. Estas deben tener las características de ser productivas y económicas, técnicamente viables y socialmente aceptables por parte de los productores, y además eficientes para controlar la erosión y los escurrimientos superficiales. Asimismo, en forma paralela a la investigación aplicada, se realiza investigación básica que consiste en generar información para validar modelos de predicción de erosión y de escurrimientos superficiales. Se miden periódicamente, con la mayor precisión y cuidado posibles, parámetros de la lluvia, del cultivo, del suelo y de los escurrimientos superficiales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante los diez años de esta investigación se ha trabajado con lotes de escurrimiento de 2 x 25 m, ubicados en el centro de parcelas de 6 x 28 m localizadas en el Campo Agrícola Experimental «Lomas de San Juan» de la Universidad Autónoma Chapingo, en Chapingo,

México. Se dispone de 16 lotes, situados en una zona de tepetates roturados con terrazas de formación sucesiva. En cada lote está instalado, en la parte baja, un equipo colector-muestreador de sedimentos, cuyos depósitos tienen capacidad suficiente para almacenar los escurrimientos superficiales y las pérdidas de suelo que ocurren aun en eventos extraordinarios. De acuerdo a las etapas del proyecto, en cada lote se han evaluado diferentes manejos, tanto del suelo como del cultivo, que constituyen las prácticas agronómicas productivas.

Se registra la lluvia en un pluviógrafo de rotación diaria, con resolución de diez minutos. Para cada lluvia se determina la erosividad, teniendo como índice EI_{30} (Wischmeier y Smith, 1978), para lo cual se digitalizan los pluviogramas y se calculan otros parámetros mediante el software SIMPLE (Salazar y Oropeza, 1996). El escurrimiento superficial se cuantifica después de cada evento, midiendo la altura del agua captada en los depósitos colocados en cada lote de escurrimiento. Asimismo, después de cada evento, se cuantifica el total de sedimentos generados por lote. El procedimiento consiste en separar el agua de los sedimentos, previa ejecución de los procesos de floculación y decantación, para continuar con el secado del suelo erosionado. En el cultivo, se mide periódicamente la cobertura vegetal durante el ciclo vegetativo, para determinar las curvas de crecimiento, las pérdidas de suelo relativas y obtener los valores del factor C de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (EUPS). Igualmente en este aspecto, al final del ciclo se determina la producción de biomasa, como componente indispensable para validar lo atractivo, desde el punto de vista económico del productor, de la práctica vegetativa o agronómica de conservación y protección de suelos en proceso de formación.

En cada ciclo evaluado existe un lote testigo permanente, requisito indispensable para generar información básica de los factores de erosionabilidad del suelo (factor K) y de uso y manejo del suelo y de la vegetación (factor C).

Desde el punto de vista agronómico, las etapas en que se ha dividido esta investigación y los aspectos estudiados han sido los siguientes:

- en una primera etapa, se determinó la magnitud del aporte de sedimentos por parte de los diferentes cultivos agrícolas de uso más común en la región (maíz, frijol, cebada, avena, trigo y las asociaciones maíz-frijol y maíz-haba);
- una vez determinados los cultivos con mayor riesgo de erosión, en una segunda etapa se validaron para estos cultivos prácticas agronómicas que permitieran incrementar la producción con baja inversión adicional, y además reducir las pérdidas de suelo;
- en la tercera etapa, se estudiaron alternativas de manejo del suelo, para su protección y mayor productividad, tales como sistemas de labranza de conservación;
- en la última etapa aún en curso, se proponen cultivos alternativos de producción y conservación de suelos, con miras a incrementar y diversificar la producción en estas áreas marginales.

RESULTADOS

Erosividad por lluvia

Como agente causal de la erosión, la lluvia tiene una agresividad determinada básicamente por la intensidad y cuantificada a través del EI_{30}. En el cuadro 1 se presentan, para el período 1983-1992, los datos de número de eventos, cantidad y erosividad anual por lluvia en Lomas de San Juan (Chapingo).

El número promedio anual de lluvias que ocurren en esta región es de 86, con una cantidad y erosividad promedio de 510 mm y 1.873,4 MJ mm / ha hr, respectivamente.

Cuadro 1
Número de eventos, erosividad anual por lluvia

Año	Número de eventos	Cantidad de lluvia (mm)	Erosividad (MJ mm/ ha hr)
1983	91	583,9	2.027,6
1984	100	675,3	2.250,2
1985	95	569,3	2.775,0
1986	98	539,6	1.635,8
1987	62	561,9	2.898,7
1988	75	408,0	1.557,6
1989	90	460,8	1.258,6
1990	77	448,4	1.160,1
1991	76	497,5	2.413,4
1992	88	360,9	756,5

En cuanto a la distribución de las lluvias durante el año, el 95 % de ellas y de la erosividad se produce de junio a octubre; el 80 % de los eventos son inferiores a 10 mm y el 20 % restante, con láminas de lluvia superiores, es responsable del 80 % de las pérdidas de suelo que ocurren anualmente.

Erosionabilidad del suelo

Este suelo en proceso de formación, ubicado sobre un estrato de tepetate cuya capa superficial fue roturada para construir terrazas, presenta una susceptibilidad a la erosión de 0,020 t ha hr / MJ mm ha. Este valor fue calculado con la metodología propuesta por Wischmeier y Smith (1978), utilizando datos de los análisis físicos y químicos realizados en campo y en laboratorio con muestras de suelo representativas de la capa superficial. Asimismo, la medición diaria, tanto de las pérdidas de suelo en el lote testigo, como de la erosividad, ha permitido determinar valores de erosionabilidad por evento, mensuales y anuales, utilizando la EUPS. Al comparar los valores anuales de erosionabilidad estimados con los dos procedimientos, resultaron semejantes. Sin embargo, con las determinaciones mensuales se demostró que los valores de erosionabilidad son diferentes durante el año (cuadro 2) y no tienen el valor constante que se calculó según la metodología citada.

Dinámica de la cobertura por follaje

La dinámica del crecimiento de los cultivos, expresada por el porcentaje de cobertura, presentó variaciones tanto entre cultivos como entre ciclos para un mismo cultivo. Los modelos matemáticos representativos de las funciones de crecimiento que mejor ajustaron los datos de cobertura por follaje, mediante técnicas de regresión lineal simple, fueron polinomios de segundo grado (parábola) para la cobertura por follaje del frijol, y ecuaciones exponenciales para las coberturas de maíz, maíz-frijol, maíz-haba y cultivos sembrados al voleo (trigo, cebada y avena). En el cuadro 3 se muestran los modelos de predicción de la cobertura vegetal, que fueron ajustados para algunos de los cultivos estudiados.

El análisis estadístico mostró diferencias altamente significativas ($P = 0,01$), entre el grado de cobertura por follaje alcanzado en cada etapa de evaluación, para los diferentes cultivos y en los ciclos evaluados. Asimismo, se encontraron diferencias para un mismo cultivo en diferentes ciclos, lo cual se comprobó con los diferentes valores en los parámetros de las funciones de crecimiento.

Mes*	Promedio de EI_{30} (MJ mm / ha hr)	Pérdida de suelo promedio (t/ha)	Km**	Kc***
junio	654,87	1,3226	0,0078	0,83
julio	470,02	1,3103	0,0107	1,15
agosto	333,43	1,0540	0,0122	1,30
septiembre	384,89	1,1348	0,0114	1,21
octubre	450,48	0,7553	0,0065	0,69
Anual	2.293,69	5,5770	Ka = 0,0094	

* De noviembre a mayo las lluvias no fueron erosivas.
** $K = \Sigma A / (0,2594) (\Sigma EI_{30})$; Km es la erosionabilidad mensual, Ka es la erosionabilidad anual y sus unidades son t ha hr / MJ mm ha.
*** Kc = Km/Ka

Cuadro 2 - Valores de erosionabilidad del suelo (anual, mensual y Kc), determinados con erosividad por lluvia y pérdidas de suelo en lotes testigo

Cultivo	Tipo de ecuación	Ecuación	r^2
Maíz	Exponencial logística	$Y^* = 83 / (1+ e^{3,2376 - 0,05118x^{**}})$	0,70
Frijol	Parábola	$Y = 42.92 - 0,00706 (x - 90)^2$	0,75
Maíz-frijol	Exponencial logística	$Y = 85 / (1+ e^{3,3145 - 0,0505x})$	0,74
Maíz-haba	Exponencial logística	$Y = 101 / (1+ e^{3,4511 - 0,0479x})$	0,66
Cebada	Exponencial logística	$Y = 101 / (1+ e^{2,04727 - 0,0632x})$	0,72

* Y representa el grado de cobertura vegetal (%).
** X representa el número de días después de la siembra.

Cuadro 3 - Ecuaciones estimadas de mayor ajuste al desarrollo de la cobertura vegetal para diferentes cultivos

Pérdidas de suelo y escurrimientos superficiales

Durante las diferentes etapas de evaluación, se cuantificaron las pérdidas de suelo y los escurrimientos superficiales generados en cada tratamiento después de cada lluvia. En la primera etapa, se determinó que los cultivos agrícolas sembrados en hileras, con remociones de suelo, presentan un mayor riesgo de erosión, ya que generaron mayores cantidades de escurrimiento superficial y pérdidas de suelo, en relación a los cultivos sembrados al voleo para los cuales no se realizan remociones de suelo. Esto se comprueba con la información presentada en el cuadro 4.

En la segunda etapa se validaron prácticas agronómicas que se aplicaron a los cultivos en hilera, por ser los que presentan mayor riesgo de erosión, y además, porque difícilmente dejarán de ser realizados por los agricultores mexicanos debido a razones culturales: «México es maíz». Aquí se demuestra que con prácticas simples, económicas y productivas, es posible proteger al suelo de la erosión y, sobre todo aumentar la producción. En el cuadro 5 se presentan los resultados de producción, erosión y escurrimiento superficial obtenidos en tres cultivos en los que se varió la densidad de población, ello como una práctica agronómica de conservación y producción.

Tipo de siembra	Cultivos	1983		1984		1985		Promedio	
		Q* (mm)	Erosión (t/ha)	Q* (mm)	Erosión (t/ha)	Q* (mm)	Erosión (t/ha)	Q* (mm)	Erosión (t/ha)
En surcos	Maíz	53,4	3,19	65,6	2,22	64,7	3,65	61,23	3,02
	Frijol	49,0	2,17	67,6	2,11	80,4	5,11	65,66	3,13
	Maíz-frijol	48,2	2,32	54,3	2,26	78,6	3,51	60,36	2,70
	Maíz-haba	41,9	1,80	67,6	1,54	67,0	2,84	58,83	2,06
Al voleo	Cebada	34,9	1,44	9,5	0,25	28,8	0,72	84,40	0,80
	Avena	30,5	1,88	26,1	0,54	41,0	1,55	32,53	1,32
	Trigo	40,6	1,27	14,7	0,38	40,0	1,48	31,76	1,04
Testigo	Sin cultivo	60,9	3,89	98,2	6,65	94,2	5,70	84,43	5,41

* Q es el escurrimiento superficial anual que corresponde a la suma de los escurrimientos diarios ocurridos durante el año.

Cuadro 4 - Escurrimiento superficial y erosión del suelo en diferentes cultivos

Cultivo	Densidad de población (miles de plantas/ha)	Producción de forraje verde (t/ha)	Erosión (t/ha/año)	Q* (mm)
Maíz	60	40,0	8,22	100
	65	43,7	5,77	103
	70	45,5	5,73	97
	75	48,0	3,93	67
Frijol	35	0,83 (grano)	2,05	52
	60	1,23 (grano)	2,48	59
Cebada	50 (kg/ha)	27,0	1,77	56
	75 (kg/ha)	31,0	1,49	49
	100 (kg/ha)	34,0	1,08	44

* Q es el escurrimiento superficial anual que corresponde a la suma de los escurrimientos diarios ocurridos durante el año.

Cuadro 5 - Inducción de niveles de producción en maíz, frijol y cebada, y su relación con la erosión y el escurrimiento superficial durante 1986

Es importante hacer notar que durante el desarrollo de estos cultivos, se registró una precipitación suficiente en cantidad y distribuida adecuadamente, de tal forma que los cultivos nunca mostraron efectos por sequía en ninguna etapa de su desarrollo y por lo tanto, la humedad insuficiente no fue un factor limitante para la producción.

Otra de las prácticas agronómicas de conservación de suelos que se evaluó fue la fertilización de cultivos en hilera. Se encontró que al incrementar las cantidades de fertilizante nitrogenado y fosforado, se logra disminuir la erosión y el escurrimiento superficial y también se incrementa la producción de biomasa. Esto se comprueba con los datos presentados en el cuadro 6.

El escurrimiento superficial mostró una marcada tendencia a disminuir a medida que se aumentó la cantidad de fertilizante aplicado. Aunque la cantidad de suelo erosionado se

Cuadro 6
Cambios en el escurrimiento superficial, erosión y producción de forraje de maíz, al variar la dosis de fertilizante durante 1987

Fertilización N P K	Producción de forraje verde (t/ha)	Erosión (t/ha/año)	Q* (mm)
60 40 0	12,0	3,68	155
80 60 0	14,0	3,88	142
120 80 0	19,0	2,44	138

* Q es el escurrimiento superficial anual que corresponde a la suma de los escurrimientos diarios ocurridos durante el año.

incrementó notablemente al aumentar la dosis de fertilizante de 60-40-0 a 80-60-0, con la dosis 120-80-0 se logra disminuir la erosión.

En la tercera etapa se demostró que con los sistemas de labranza de conservación, es posible reducir la erosión y generar escurrimientos aceptables. Además, se obtienen beneficios adicionales para el productor, como una menor inversión económica, al evitar el barbecho y la labranza secundaria y, sobre todo un mayor nivel de producción del cultivo. En el cuadro 7 se presentan resultados de producción de biomasa, erosión y escurrimiento con diferentes tipos de cobertura y sistema de labranza.

Tratamiento	Q* (mm)	Erosión (t/ha/año)	Producción (t/ha)
Labranza convencional	143,0	2,69	10,4
Labranza cero	98,5	2,05	13,3
Labranza convencional con escardas	80,8	2,74	14,0
Labranza convencional con malla	72,6	0,75	16,8
Labranza cero con malla	51,0	0,71	18,1

* Q es el escurrimiento superficial anual que corresponde a la suma de los escurrimientos diarios ocurridos durante el año.

Cuadro 7 - Erosión, escurrimiento superficial y producción promedio de biomasa de maíz, con diferentes sistemas de labranza durante 1988 y 1989

En la última etapa desarrollada actualmente se estudian y comparan cultivos tradicionales, cultivos de cobertera, cultivos opcionales y sistemas de cultivo alternativos más eficientes para reducir la erosión y el escurrimiento superficial, y que sean más atractivos para el agricultor al ser más productivos.

Los objetivos particulares planteados en esta etapa, además de los ya indicados, son:

- analizar diferentes opciones de cultivos alternativos al maíz, para incrementar la productividad del suelo;
- determinar sistemas de cultivo que generen máximos ingresos y productividad, así como reducir al mínimo la erosión y el escurrimiento superficial;
- estudiar la factibilidad de obtener 2 cosechas en un ciclo agrícola con mal temporal.

Los cultivos estudiados fueron: a) tradicionales, maíz y las asociaciones maíz-frijol y maíz-calabaza; b) de cobertura, maíz-veza, maíz-trébol rojo, maíz-trébol *alsike* y maíz-

alfalfa; c) como cultivos opcionales, pasto *rhodes* y alfalfa; d) como cultivos alternativos, calabaza-avena, calabaza-cebada y rábano-trigo.

Con los experimentos en campo, se ha demostrado que es posible obtener hasta 40 t/ha/año de forraje verde de alfalfa, 20 t/ha/año de forraje de trébol, más la producción de maíz, cuando estos están asociados. Asimismo, ha sido posible obtener dos cosechas por ciclo, en los tres cultivos alternativos. Las pérdidas de suelo y los escurrimientos totales anuales para los cultivos estudiados en esta etapa, se presentan en el cuadro 8.

Cuadro 8
Escurrimiento superficial, erosión y eficiencia promedio de diferentes cultivos para controlar la erosión durante 1991 y 1992

Cultivo	Q* (mm)	Erosión (t/ha/año)	Producción (t/ha)
Testigo	79,2	4,75	0
Maíz-veza	24,8	1,34	72
Maíz	27,4	1,30	73
Maíz-frijol	26,9	0,96	78
Maíz-trébol rojo	14,2	0,70	85
Alfalfa	17,9	0,67	86
Maíz-trébol *alsike*	11,0	0,63	87
Maíz-calabaza	22,1	0,51	89
Maíz-alfalfa	4,0	0,05	99
Pasto *rhodes*	0,6	0,04	99

* Q es el escurrimiento superficial anual que corresponde a la suma de los escurrimientos diarios ocurridos durante el año.

Con los datos de este cuadro, se demuestra nuevamente, pero ahora con cultivos, que las coberturas vegetales densas representan la mejor opción para proteger al suelo contra la erosión, con la ventaja de posibilitar un mayor nivel y calidad de producción. Esto significa que los cultivos opcionales, maíz-alfalfa y pasto *rhodes*, representan alternativas de conservación y producción de suelos, técnicamente viables para proteger al suelo de la erosión, producir mayor cantidad y calidad de forraje y continuar con la producción de maíz.

Factor de uso y manejo del suelo y cultivo

Un componente importante de este proyecto de investigación ha sido generar información básica sobre los suelos, el escurrimiento y los cultivos, para validar la EUPS y posteriormente utilizarla para predecir erosión y su variación, como consecuencia de los cambios introducidos en el suelo y la vegetación.

Como resultado del análisis conjunto de la cantidad y distribución de la erosividad por lluvia, de la dinámica de la cobertura vegetal, de las pérdidas de suelo ocurridas en diferentes cultivos y teniendo como referencia un lote testigo (sin vegetación y en barbecho continuo), se determinó el factor de uso y manejo del suelo y de la vegetación (factor C de la EUPS) para los principales cultivos de la región (cuadro 9).

En igual forma y mediante el mismo procedimiento, se determinaron valores del factor C para todos los sistemas y cultivos evaluados como prácticas vegetativas y agronómicas durante los diez años del proyecto.

Cuadro 9
Valores del factor C para los principales cultivos de la región de Chapingo

Cultivo	1983	1984	1985
Maíz	0,653	0,367	0,560
Frijol	0,474	0,309	0,878
Asociación maíz-frijol	0,398	0,388	0,672
Asociación maíz-haba	0,342	0,249	0,540
Cebada	0,168	0,040	0,137
Avena	0,193	0,071	0,314
Trigo	0,228	0,061	0,341

CONCLUSIONES

Las prácticas agronómicas de variación de la densidad de población, fertilización, métodos de labranza y cultivos alternativos, son opciones técnicamente viables y socialmente aceptables, como alternativas productivas y económicas para la conservación y mejoramiento de los suelos, así como para controlar y regular los escurrimientos superficiales.

Se ha generado información básica sobre los factores de erosividad por lluvia, erosionabilidad del suelo y uso y manejo del suelo y de la vegetación, para ser utilizados en la predicción de la erosión y en los planes y programas de conservación y manejo de suelos.

Referencias bibliográficas

FIGUEROA, B., 1975: *La pérdida de suelo y nutrimentos y su relación con el uso del suelo en la cuenca del río Texcoco*, Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México, 149 p.

MACÍAS, R., 1992: *Influencia de diferentes sistemas de labranza y coberturas del suelo sobre el control de la escorrentía, la erosión y el rendimiento de forraje de maíz*, Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, 133 p.

RÍOS, J.D., 1987: *Efecto de la cobertura vegetal en el proceso erosivo*, Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México, 244 p.

VENTURA, E. Jr., 1988: *Dinámica de la erosión hídrica bajo diferentes niveles de productividad en maíz y cebada*, Tesis de Licenciatura, Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México, 89 p.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D., 1978: *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*, Agriculture Handbook No. 537, ASDA, 58 p.

SALAZAR, J.; OROPEZA, J. L., 1996: Procesamiento automatizado de pluviógramas y limnigramas con el programa SIMPLE, en *Memorias de XXVII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo, 18-22 de noviembre de 1996*, Ciudad Obregón, México, p. 22.

Evaluación de la erosión del suelo mediante parcelas experimentales en suelos volcánicos del Sur de Chile

Carlos E. Oyarzún, Anton W. Huber, Rubén Peñaloza, Renato Sanzana

Abstract

During 1995 and 1996 an experimental plots study was carried out in southern Chile, in order to evaluate the soil erosion losses in trumaos *(Hydric Dystrandept) soil under different agricultural traditional treatments and subject test some conservation practices. In the traditional tillage were verified small soil erosion losses, similar to a livestock pasture, due to the combined effect of grass trips and the high infiltration rates that these soils show. However, an enrichment of nutrients in the overland flow after fertilization was also observed.*

Keywords: *Soil Erosion - Volcanic Soils - Tillage Conservation - Southern Chile*

INTRODUCCIÓN

Entre las provincias de Linares y Llanquihue (35°30' S a 41°30' S), situadas en la región centro-sur de Chile, existe una superficie de 1'954.538 ha de suelos Trumaos de Lomaje, de las cuales 1'141.498 ha han sido clasificadas como suelos cultivables (ODEPA, 1968). Estos suelos, desarrollados a partir de depósitos de cenizas volcánicas, presentan texturas medias, baja densidad aparente, alta porosidad y elevados contenidos de materia orgánica. Aun cuando estas características representan mejores condiciones de defensa contra la erosión hídrica, todas las investigaciones realizadas en Trumaos de Lomaje sometidos a prácticas agrícolas tradicionales, muestran pérdidas de suelo superiores a los límites de tolerancia estimados para ellos (Peña, 1981; Peña *et al.*, 1993). Entre las causas más relevantes que provocan erosión hídrica, se han mencionado el sobrepastoreo, la sobreutilización agrícola, el uso del suelo sin considerar su aptitud y la deforestación y los incendios forestales.

Algunos de los antecedentes que justifican la realización del presente estudio, son por un lado el enorme potencial productivo de estos suelos y la magnitud de los daños que están experimentando, y por otro, la adquisición de información científica que permita adoptar criterios conservacionistas en su uso y manejo. Los objetivos de esta investigación son obtener información acerca del comportamiento de este tipo de suelos bajo diversos tratamientos agrícolas tradicionales y someter a prueba algunas medidas de conservación que permitan reducir la erosión hídrica.

ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se realizó en la localidad de Choshuenco, región de Los Lagos (latitud 40° 23' S, longitud 70° 40' W, altitud de 222 m.s.n.m.), en la zona precordillerana de los Andes. El clima de la zona puede ser descrito como templado lluvioso (Cfb según la nomenclatura de Koeppen), con una precipitación promedio anual superior a 2.000 mm concentrada durante el invierno. La temperatura promedio anual es de 12 °C aproximadamente.

Los suelos del área de estudio corresponden a la serie Liquiñe, asociación Ralún (*Hydric Dystrandept*) que se presentan en la cordillera de los Andes entre los 300 y 1.000 m s.n.m. Se han desarrollado a partir de cenizas volcánicas depositadas sobre estratos pumicíticos meteorizados. La topografía es escarpada, con pendientes dominantes superiores al 30 por ciento, existiendo también áreas fuertemente onduladas con pendientes de 10-25 por ciento. Son suelos profundos a moderadamente profundos, de color pardo muy oscuro en la superficie a pardo amarillento oscuro en profundidad, con texturas moderadamente finas en superficie a finas en profundidad, blandos y muy friables hasta los 40 cm, ligeramente duros y friables en profundidad, ligeramente adhesivos y ligeramente plásticos. Presentan un arraigamiento bien desarrollado hasta los 70 cm haciéndose más escasas las raíces en profundidad, un régimen de humedad perúdico y un régimen de temperatura mésico (Tosso, 1985).

La topografía del área de estudio corresponde a laderas bajas de orilla de lago, siendo estos suelos dedicados principalmente a tierras de pastoreo y, en menor medida, a cultivos agrícolas tradicionales. La cobertura vegetal está formada por bosques de los tipos forestales roble-raulí, coihue y lenga, que han sufrido en los dos primeros casos, una explotación intensa y los efectos de quemas no controladas han degradado su composición y empobrecido su calidad como elemento protector del suelo (IREN, 1978). Actualmente, la vegetación se caracteriza, debido a las quemas efectuadas en décadas pasadas, por la presencia de renovales de roble-raulí y algunos remanentes originales (Donoso, 1993).

MÉTODOS

Durante el mes de abril de 1995, se instalaron 8 parcelas en una ladera con orientación sur y con una pendiente de 28°. Los tratamientos durante el primer año de mediciones fueron pradera ganadera natural, cultivo de porotos (*Faseola vulgaris*) y cultivo de avena (*Avena sativa*), todos con franjas protectoras de pasto. Durante el segundo año, se reemplazaron los cultivos de porotos y avena por cultivos de trigo (*Triticum aestivum*) y arvejas, conservando las franjas de pasto.

Las parcelas experimentales tienen una dimensión de 15 m de largo y 2,5 m de ancho. La delimitación de los costados y de la parte superior de cada una de ellas se hizo con tablones de 25 cm de ancho y 2,5 cm de espesor, enterrados en forma vertical hasta 20 cm de profundidad. Cada 4 m ocupados por el cultivo, se dejó una franja protectora de pasto de 1 m de ancho. Todo el escurrimiento superficial fue conducido, mediante tubos de PVC, a equipos registradores especialmente diseñados para estos fines, los mismos que permiten un registro continuo del escurrimiento superficial y extraen una muestra representativa de agua y sedimentos durante los eventos de lluvia.

Descripción del equipo

El equipo consta de un recipiente principal de fibra de vidrio, que recibe el agua de escorrentía superficial de una parcela de erosión y cuyo tamaño se determina de acuerdo

a las cantidades de escorrentía. Las partículas mayores, arrastradas por el agua, deben ser retenidas previamente en el estanque de sedimentación.

El fondo del recipiente principal tiene una forma de embudo, lo que permite la acumulación del sedimento en su parte más baja. El extremo del embudo está acondicionado para poderlo atornillar, mediante una llave de paso, otro receptáculo más pequeño que acumula el material que se está sedimentando.

La variación temporal del nivel de agua en el depósito principal se registra mediante un flotador que hace rotar una polea fijada a un eje, cuyo extremo está conectado a un potenciómetro. La señal eléctrica que entrega esta unidad está en relación con el nivel de agua y es almacenada en un *datalogger* especialmente diseñado para esta finalidad. Este registrador permite programar la frecuencia de lectura y tiene también la posibilidad, cuando el nivel de agua en el recipiente principal ha alcanzado una altura predeterminada, de activar una válvula que pone en funcionamiento un sistema de palancas que permite una rápida evacuación del agua acumulada en el recipiente principal. Durante este evento, se desvía una pequeña cantidad de agua a otro recipiente, para obtener una muestra ponderada a partir de la cual se determinan las características físicoquímicas del agua de escorrentía recogida. Periódicamente, mediante una computadora portátil, se recupera la información almacenada en el *datalogger* y con ella se puede conocer la fecha y la hora de inicio y término de la escorrentía, así como la cantidad de agua que escurrió.

El material erosionado que se deposita en el recipiente ubicado debajo del contenedor principal, se recoge periódicamente para su cuantificación.

Cada *datalogger* está diseñado de tal forma que puede almacenar la información de hasta 6 equipos de medición de escorrentía superficial en forma simultánea. El costo de la confección de uno de estos registradores, realizada en el Laboratorio de Física de la Universidad Austral de Chile, es de aproximadamente U$ 1.500, valor al que se debe sumar el costo de cada estanque y su correspondiente sistema de descarga, que se acerca a los U$ 400.

En las parcelas se colocaron también reglillas metálicas, cuya altura fue medida en forma periódica, lo que permitió estimar los movimientos de suelo y detectar las zonas de acumulación y erosión dentro de las parcelas. Junto a estas últimas se instalaron un pluviógrafo y un pluviómetro para poder determinar la cantidad e intensidad de las precipitaciones.

Periódicamente, se recuperó la información del escurrimiento superficial almacenada en los *datalogger*. En forma simultánea, se recogieron las muestras de los depósitos de sedimentos y una muestra de agua de los equipos de registro, obtenidas de la descarga automática de ellos. En el laboratorio, las muestras de agua se sometieron a diversos análisis químicos para determinar la concentración de macro y micronutrientes. Los sedimentos se secaron a 105°C, lo que permitió obtener las tasas de erosión para cada período de mediciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tasas de erosión y escurrimiento superficial

En el cuadro 1 se presentan las precipitaciones y las tasas de erosión para algunos periodos de mediciones de los años 1995-1996. En las parcelas bajo cultivo y en las praderas ganaderas, las pérdidas de suelo fueron mínimas. Por un lado, las franjas protectoras de pasto situadas en las praderas bajo tratamiento agrícola fueron muy eficientes en la retención de los sedimentos arrastrados por la escorrentía superficial y, por otro lado,

Fecha	Precipitación (mm)	Erosión (kg/ha)	
		Cultivos	Praderas
1995			
Agosto 14	837,9	*	*
Septiembre 11	638,4	*	*
Octubre 10	784,7	1,38	1,33
Noviembre 16	518,7	1,75	1,00
1996			
Marzo 7	226,1	1,08	1,55
Abril 3	259,4		
Mayo 15	532,5	0,40	0,35
Julio 18	510,7	0,50	0,38
Agosto 22	970,9	0,70	0,58
Septiembre 11	372,4	0,38	0,34

*: Sin datos

Cuadro 1
Tasas de erosión (kg/ha) en parcelas experimentales de suelos Trumaos (Choshuenco, Chile)
Parcelas cultivadas (n = 6) y praderas (n = 2)

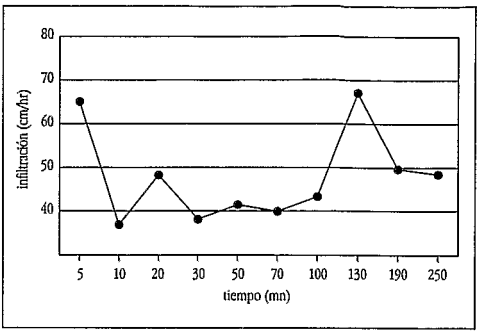


Figura 1 - Tasas de infiltración en un suelo Trumao (*Hydric Dystrandept*) Choshuenco, Chile

las altas tasas de infiltración determinadas para este tipo de suelos (figura 1) fueron muy superiores a las mayores intensidades de lluvia registradas durante el periodo de mediciones. Estudios previos realizados en Trumaos precordilleranos de la zona central de Chile (Peña, 1986), habían reportado pérdidas de suelos muy superiores a los límites tolerables, cuando se realizan prácticas agrícolas tradicionales (siembra en el sentido de la pendiente y con quema de residuos). También se había demostrado el control eficaz de la erosión si se emplean técnicas de manejo de residuos y, especialmente, la cero labranza.

En este estudio, los movimientos de suelo detectados con las reglillas metálicas (figura 2) confirman la eficacia de las franjas de pasto. Se observa que el suelo erosionado en las zonas cultivadas se acumula inmediatamente antes de entrar a las zonas protectoras, por lo que el balance final erosión-sedimentación de la parcela es cercano a cero.

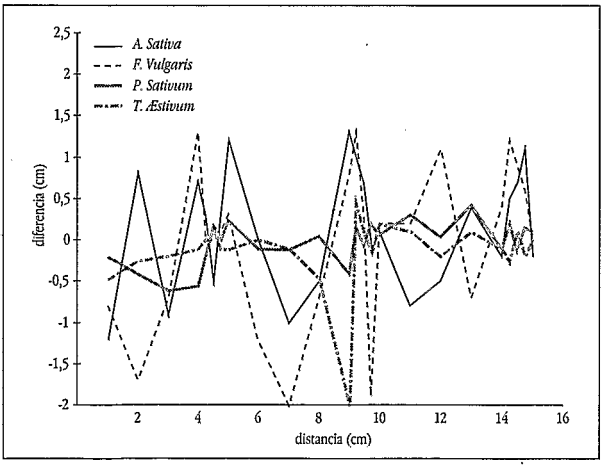


Figura 2
Movimientos de suelo (+ erosión-sedimentación) en parcelas experimentales Choshuenco, Chile

En la figura 3 se presentan los datos del escurrimiento superficial para algunos eventos de lluvias individuales. Las tasas de escorrentía para todos los tratamientos es similar, encontrándose que constituyen cantidades inferiores a 10 mm aun con lluvias superiores a 250 mm. En general, la escorrentía superficial representa menos del 5 % de las precipitaciones si se consideran lluvias individuales.

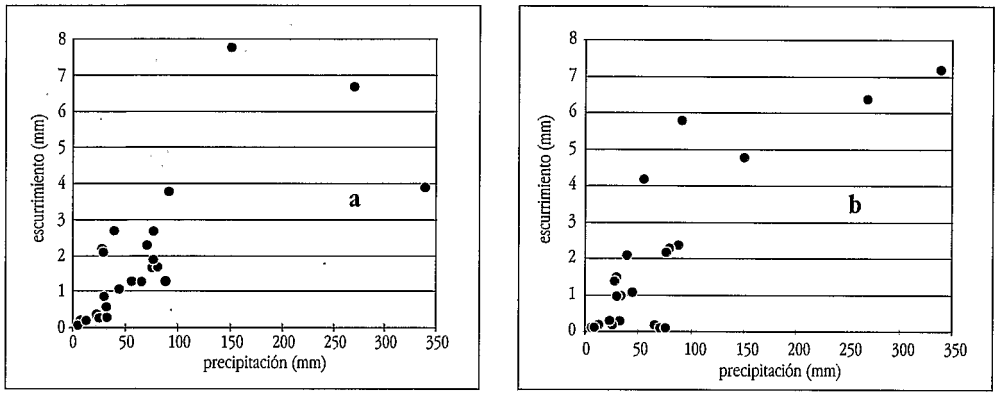


Figura 3 - Relaciones entre la precipitación y el escurrimiento superficial para las parcelas con cultivo agrícola (a) y parcelas con praderas ganaderas (b)

Concentraciones de nutrientes

En el cuadro 2 se presentan las concentraciones de nutrientes en el agua del escurrimiento superficial, para los diversos tratamientos durante los dos periodos de mediciones. Se observa un enriquecimiento significativo en todos los nutrientes en las muestras de agua tomadas después de la fertilización de los cultivos, especialmente en el primer periodo de mediciones. Sin embargo, este aumento en las concentraciones se traduce en pequeñas cantidades de elementos que salen desde las parcelas, debido a que los valores de escurrimiento superficial son muy bajos.

Fecha	Cultivo	pH	Cond.	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu
Septiembre 1995*	Avena	7,18	31	0,68	0,28	1,81	0,25	0,03	0,00	0,00
	Porotos	7,20	38	0,72	0,37	2,22	0,28	0,02	0,02	0,00
	Pradera	5,82	28	0,35	0,01	1,87	0,27	0,03	0,00	0,00
Diciembre 1995**	Avena	6,78	90	2,21	11,02	3,96	1,24	0,47	0,16	0,05
	Porotos	6,95	90	2,25	11,35	4,03	1,46	0,91	0,09	0,07
Julio 1996*	Barbecho	5,03	46	0,75	1,74	1,53	0,49	0,12	0,02	0,02
	Pradera	6,19	30	0,54	0,47	1,39	0,35	0,13	0,00	0,00
Agosto 1996**	Trigo	5,56	42	0,52	1,11	1,37	0,38	0,11	0,01	0,02
	Arvejas	5,91	39	0,56	1,22	1,37	0,39	0,15	0,01	0,03
	Pradera	5,79	28	0,45	0,49	1,38	0,38	0,09	0,00	0,01
	Lluvia	6,06	32	1,79	0,34	0,90	0,18	0,09	0,00	0,01

*: sin fertilización, **: con fertilización

Cuadro 2 - Concentraciones de nutrientes (µg/L) en el escurrimiento superficial y precipitaciones Datos promedio de 3 parcelas experimentales (Choshuenco, Chile)

Referencias bibliográficas

DONOSO, C., 1993: *Bosques templados de Chile y Argentina. Variación, estructura y dinámica*, Ed. Universitaria, Chile, 485 p.

IREN-CORFO-UACH, 1978: *Estudio del suelo de la provincia de Valdivia*, Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Austral de Chile, 178 p.

ODEPA, 1968: *Plan de desarrollo agropecuario*, ODEPA, Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile.

PEÑA, L., 1981: Cultivo en contorno y cobertura mínima de rastrojos en control de erosión en lomajes suaves de Trumao, en *Agricultura Técnica*, 41 (4), p. 243-247.

PEÑA, L., 1986: Control de erosión hídrica en suelos volcánicos (*Dystrandept*), mediante labranza de conservación, en *Agro-Ciencia*, 2 (1), p. 59-64.

PEÑA, L.; CARRASCO, P.; FIGUEROA, R.; OYARZÚN, C.; LO CASCIO, B., 1993: Pérdidas por erosión hídrica en suelos agrícolas y forestales de la cuenca del río Bío-Bío, en *Elementos cognoscitivos sobre el recurso suelo y consideraciones generales sobre el ordenamiento agroforestal*, Serie Propuestas de Ordenamiento Universidad de Concepción, Chile, p. 45-60.

TOSSO, J., 1985: *Suelos volcánicos de Chile*, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile.

Evaluación del potencial hidrológico y de la producción de sedimentos en tepetates tipo t3 con lluvia simulada

Pedro Rivera R, José Luis Oropeza M.

Abstract

An experiment was conducted to determine the soil hydrologic potential with simulated rainfall in a tepetate *t3 under three treatments, Natural Tepetate (TN) —control plot—, Subsoiling Tepetate (TRR) and Tilled Tepetate (TI), and related with runoff and sediment yield.*

TN presents higher soil losses. TI presents a reduction in the infiltration rate when rainfall intensity increases from 40 to 60 mm/hr. The results of other treatments were similar. Time ponding in TN and TI were less than the intensity of 60 mm/hr. However, TRR presented a high infiltration capacity. In general TN presents a higher percentage of runoff and a lower infiltration percentage. These data confirmed that tepetates *are erodible.*

Keywords: Tepetate - *Erosion - Runoff - Simulated Rainfall - Infiltration*

INTRODUCCIÓN

Desde que el hombre apareció en la cuenca de México, causó gran impacto en los ecosistemas lacustres y terrestres, ya que tuvo la necesidad de modificar el medio para el crecimiento de cultivos que consumía para subsistir. Este cambio en el uso del suelo produjo un deterioro en la ecología del lugar, finalizando con la pérdida total o parcial de los recursos naturales, entre ellos el suelo. Esta pérdida trajo como consecuencia el afloramiento de una capa de suelo duro, de espesor variable, que limita el aprovechamiento agrícola y se denomina localmente «tepetate», formando paisajes severamente degradados. Ortiz y Cuanalo (1977) reportan 2.329 hectáreas de tepetates tan solo en el área de influencia de Chapingo, con lo que se aprecia su magnitud.

En la vertiente oriental de la cuenca de México, se observó en 1970 una superficie afectada por la erosión de 54.000 hectáreas de un total de 150.000 de la zona, de la cual el 80 % es tepetate. Según Figueroa (1975), en los tepetates se pierden más de 16.000 kg/ha/año de suelo, en comparación con otros ecosistemas que tienen entre un 65 y un 70 % de cubierta vegetal, como el bosque de oyamel, donde apenas se pierden 10 kg/ha/año.

La erosión del suelo, asociada con el tepetate, es más severa en las zonas de lomeríos y áreas con pendientes pronunciadas. De acuerdo a Rey (1979), los tepetates en estas condiciones son muy susceptibles a la erosión hídrica. De ahí que se reporte que ellos representan una pérdida de suelo 800 veces mayor que los suelos de uso forestal (Figueroa, 1975).

La cuenca de México ha sido, desde el punto de vista político, económico y social, la más importante de México y Mesoamérica. Es una de las áreas más densamente pobladas del mundo, lo cual conlleva que se presenten múltiples problemas derivados de la interacción no equilibrada entre los recursos naturales y el hombre.

Desde 1972, en el área de influencia de Chapingo, se han realizado investigaciones encaminadas al estudio de la dinámica de la erosión hídrica, de su mecánica, de sus propiedades físicas, de su fertilidad, y de su reincorporación a la productividad agrícola, pecuaria y forestal. Sin embargo, se hace necesario estudiar su potencial hidrológico. La presente investigación se propone determinar el potencial hidrológico de un tepetate tipo t3 (Peña y Zebrowski, 1992), mediante la simulación de lluvia, a fin de contribuir a la comprensión de la dinámica de la erosión.

POTENCIAL HIDROLÓGICO DE LOS TEPETATES

El potencial hidrológico de un suelo se define de acuerdo al potencial de escurrimiento el que a su vez está directamente relacionado con la tasa de infiltración, el movimiento del agua dentro del suelo y la cantidad de sedimentos que se pierden. La tasa y cantidad de agua que se infiltra en el suelo es función del tipo de suelo, de la humedad del mismo, de la permeabilidad, de la cobertura, de las condiciones de drenaje y de la intensidad y lámina de precipitación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El experimento se desarrolló en el Campo Experimental de Tepetates del Colegio de Postgraduados de Montecillo (México), en San Miguel Tlaixpan, Texcoco.

Simulador de lluvias

Se utilizó un simulador de lluvias computarizado de tipo aspersor. El principio de este aparato es la creación de una lluvia parecida a la natural. El evento de lluvia se simula a partir de un aspersor conectado a una computadora donde se controlan las oscilaciones por minuto que proporcionan la intensidad de lluvia deseada, calibrada previamente. El equipo funciona con una motobomba alimentada por una planta eléctrica de 220 voltios. Desde del aspersor, el agua cae sobre el suelo en forma de lluvia. La intensidad del evento y su duración son programados en la computadora. El simulador está conformado por un recuperador lateral de agua que recicla el líquido no utilizado con el fin de ahorrar el recurso. La lluvia producida cae sobre el suelo donde previamente se instaló una parcela de recepción de 7 m^2. Cuando se produce escurrimiento, se lo recibe en un tinaco previamente calibrado y se mide el volumen de agua. Así, se puede determinar la curva de infiltración y la tasa de escurrimiento para cada sitio de estudio. La presión del agua se regula con manómetros y debe ser de 6 libras/plg^2 (0,42 kg/cm^2). El equipo cuenta con una lona de plástico para cubrir y evitar la influencia del viento.

Intensidad de la lluvia y tratamientos

Se aplicaron dos intensidades de lluvia simulada para cada sitio experimental, 40 y 60 mm/h, valores escogidos por relacionarse con lluvias importantes en la zona de estudio.

Los tratamientos analizados fueron Tepetate Natural (TN), Tepetate Recién Roturado (TRR) y Tepetate Incorporado a la Producción (TI) más de 5 años atrás.

El TRR se preparó con un arado de subsuelo montado en un tractor de 120 HP, que penetró a una profundidad promedio de 15 cm. Por su parte, el TI se encontraba muy «mullido» debido a la preparación del suelo que viene realizándose año tras año.

Determinación de sedimentos

Para la determinación de la producción de sedimentos durante la simulación, se tomaron muestras de agua de un litro por minuto desde el inicio del escurrimiento, y después cada cinco minutos. Los sedimentos se obtuvieron al filtrar el agua de escurrimiento, utilizando papel filtro y succión con aire al vacío, y luego se pesaron. Mediante la suma de los sedimentos en suspensión y gruesos se obtuvieron las pérdidas totales de suelo por lluvia en gramos por parcela.

Escurrimiento superficial

El escurrimiento superficial, se obtuvo para intervalos de cinco minutos. Tomando en cuenta que el tinaco se encontraba aforado, se determinó la altura de la lámina de agua captada. Al dividirla para el área de escurrimiento, se obtuvo el escurrimiento superficial acumulado en milímetros. Para los intervalos de tiempo previamente establecidos, se midieron los gastos instantáneos, es decir, el tiempo en el que se muestreaba un litro de escurrimiento, información que fue de utilidad para conformar los hidrogramas.

Infiltración

Para cada tratamiento y evento de lluvia simulada se determinó la curva de infiltración a partir de la diferencia entre la cantidad de lluvia (mm) y la cantidad de escurrimiento superficial captado (mm), y ello para cada intervalo de tiempo establecido.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Simulación de lluvias

El total de lluvias y tiempos empleados en cada tratamiento y sus repeticiones se presenta en el cuadro 1.

Se observa que a medida que la intensidad de la lluvia aumenta, disminuye también el tiempo en que se llega al equilibrio en la tasa de escurrimiento.

Cuadro 1
Lluvias aplicadas y tiempo de equilibrio empleado en cada evento para cada tratamiento

Tratamiento	Intensidad (mm/h)	Tiempo (mn)
Tepetate Natural (TN)	40	51
Tepetate Natural (TN)	60	25
Tepetate Recién Roturado (TRR)	40	105
Tepetate Recién Roturado (TRR)	60	56
Tepetate Incorporado (TI)	40	45
Tepetate Incorporado (TI)	60	30

Para cada evento de lluvia, la fase de imbibición superficial logra humectar el suelo hasta una saturación aparente, cuando se inicia el escurrimiento (figura 1).

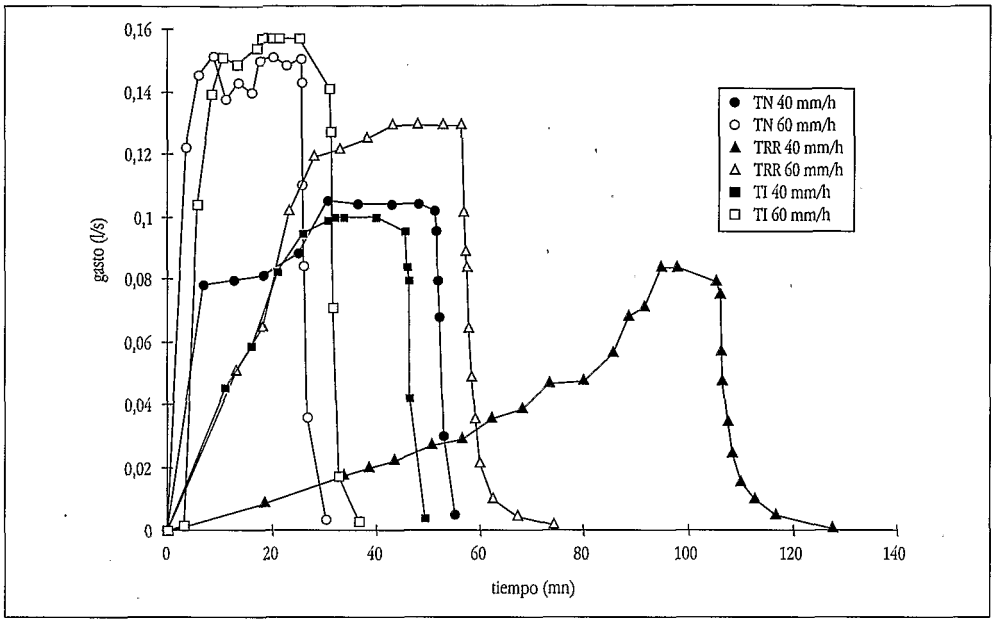


Figura 1 - Hidrogramas de respuesta al aplicar lluvia simulada de dos intensidades, en los tres tratamientos de tepetate 3

En la figura 1 se pueden apreciar los siguientes hechos:

- para una intensidad de 40 mm/h, la curva del TI es muy similar a la del TN, especialmente por el gasto en la fase de equilibrio. Por el contrario, el TRR es muy diferente, por la lenta progresión del escurrimiento y la disminución del gasto. Así, se manifiesta el mejoramiento espectacular de la tasa de infiltración en el TRR y, a la inversa, su disminución drástica en el TI;
- para una intensidad de 60 mm/h, todavía las curvas de ambos TN y TI son similares. Se redujo el tiempo de latencia hasta el inicio del escurrimiento y de la fase de equilibrio, al igual que aumentó considerablemente el gasto de escurrimiento, lo que significa que en ambos casos la tasa de infiltración es muy baja y que en el TI hubo una degradación drástica de la porosidad. En el TRR, con 60 mm/h se redujo el tiempo de latencia hasta el inicio del escurrimiento (a 10 mn) y hasta alcanzar el equilibrio (a 25 mn) y aumentó en gran medida el gasto en la fase de equilibrio (8 a 9 l/s/7 m^2), aunque sin llegar al nivel de los TN y TI. Eso significa que después de un cierto tiempo de humectación, entre 10 y 25 mn, con la saturación del espacio poral, hay un límite de tasa de infiltración que permite un gasto elevado de escurrimiento, pero sin acercarse al caso de TN y TI (escurrimiento casi total de la lluvia aplicada a una intensidad de 60 mm/h).

La fase de régimen permanente se logra rápidamente en los TN y TI tanto con 40 mm/h como con 60 mm/h. Por el contrario, en TRR, tal régimen se establece al cabo de mucho tiempo con 40 mm/h y se necesita al menos 20 minutos con 60 mm/h. Se trata pues de un evento poco probable en esta región.

Pérdida de suelo

En la figura 2 se presentan los sedigramas obtenidos para cada evento de lluvia simulada.

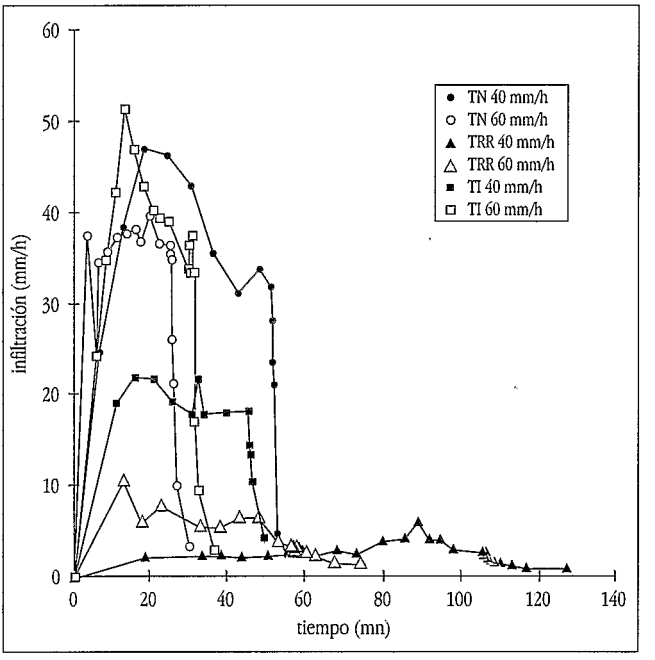


Figura 2
Sedigramas de respuesta al aplicar lluvia simulada de dos intensidades, en los tres tratamientos de tepetate t3

Analizando la información de los sedigramas, se observa en los tres tratamientos que, al aumentar la intensidad de la lluvia, se incrementan las pérdidas de suelo. En el cuadro 2 se presentan las pérdidas de suelo en gramos/minuto por evento de lluvia.

Tratamiento	Intensidad (mm/h)	Pérdida de suelo (g/mn)	Lamina infiltrada (mm)	Lamina de imbibición (mm)
Tepetate Natural (TN)	40	142,31	6,19	1,72
Tepetate Natural (TN)	60	204,45	5,01	1,63
Tepetate Recién Roturado (TRR)	40	5,2	45,41	5,34
Tepetate Recién Roturado (TRR)	60	23,15	24,65	7,38
Tepetate Incorporado (TI)	40	51,64	12,87	3,78
Tepetate Incorporado (TI)	60	227,35	5,82	3,16

Cuadro 2 - Pérdidas de suelo totales, láminas infiltrada y de imbibición por evento de lluvia en los tratamientos considerados

La tendencia anterior es bastante notoria. Así, comparando los tratamientos, se observa que el TRR es el que presenta las menores pérdidas de suelo, seguido del TI y el TN. Sin embargo, entre intensidades, el tratamiento TN muestra que al cambiar de una intensidad media a una alta, las pérdidas de suelo se incrementan en un 43 %; en cambio, en el tratamiento TI el incremento alcanza el 340 %. Esto puede deberse a que, como en el TI se formó una costra superficial, la intensidad elevada provoca un mayor escurrimiento y con ello una mayor pérdida de suelo. Esta tendencia puede observarse en los hidrogramas presentados anteriormente (figura 1) donde el TI presenta las mayores tasas de escurrimiento con la intensidad de 60 mm/h.

Infiltración

En la figura 3 se presentan las curvas de velocidad de infiltración obtenidas para los tres tratamientos.

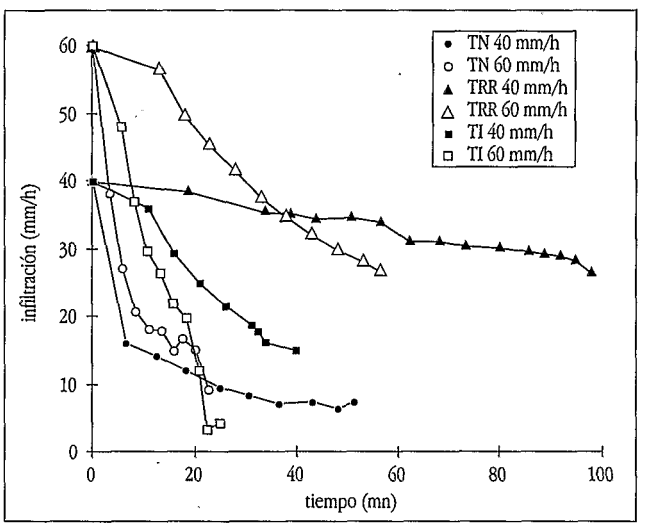


Figura 3
Curvas de infiltración obtenidas al aplicar lluvia simulada de dos intensidades, en los tres tratamientos de tepetate 3

Cabe aclarar que las curvas anteriores presentan los resultados obtenidos hasta el momento en que se detiene la lluvia, pero de persistir esta última, la infiltración tendería a mantenerse o a disminuir un tanto, ya que existe un equilibrio entre la tasa de infiltración y la de escurrimiento.

En general se observa que a medida que aumenta la intensidad de la lluvia en los tres tratamientos, la velocidad de infiltración disminuye y tiende más rápidamente a un equilibrio. El TRR, con ambas intensidades, tiende a llegar a una velocidad de infiltración cercana a 30 mm/h, que representa el límite de velocidad con saturación de los poros gruesos. Lo mismo sucede con el TN hasta 5 mm/h, pero no así con el TI, en el cual, con una elevada intensidad, la velocidad disminuye de 15 mm/h a 5 mm/h. Eso podría significar que con una intensidad importante hay una disminución del tamaño de los poros gruesos y así de la velocidad de infiltración.

En el cuadro 2 se presentan las láminas infiltradas. Se observa que las mayores tasas se presentan en el TRR, seguido por el TI y el TN, pero con la intensidad elevada, el

TI presenta una lámina infiltrada similar a la del TN, debido, tal vez, a que la alta energía cinética provoca la formación de una costra superficial reduciendo el caudal de la lámina que se infiltra en el TI.

Lámina de imbibición

La lámina de imbibición sirve para ver el efecto de saturación superficial del suelo, el déficit hídrico de este último y el efecto de la intensidad de la lluvia en la capacidad de infiltración y escurrimiento. En el cuadro 2 se presenta la lámina de imbibición por tratamiento y en la figura 4 se ilustra el efecto de saturación del suelo.

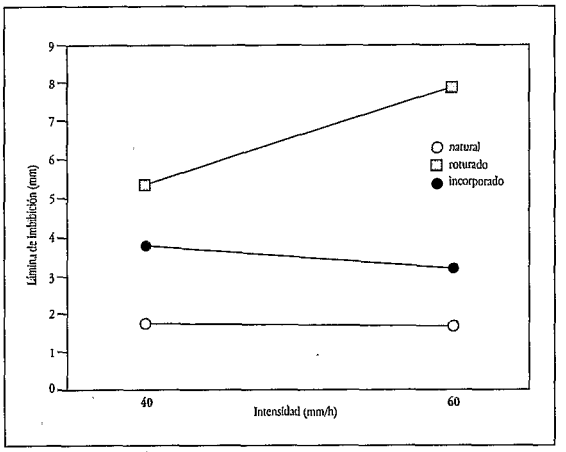


Figura 4
Evolución de la lluvia de imbibición para los tres tratamientos, de acuerdo a la intensidad de lluvia

En los tres tratamientos se aprecia que la cantidad de lluvia que se imbibe siempre es mayor en el caso de la intensidad baja. También se observa que conforme aumenta la intensidad se produce un ligero descenso en la imbibición. En el TRR se presentó un ascenso, tal vez debido a su alta capacidad de infiltración inicial que le permite captar la lluvia inicial. Por ello, con una intensidad media (40 mm/h) no se alcanzó el limite de velocidad, como sucedió con una intensidad elevada (60 mm/h).

Coeficientes de infiltración y escurrimiento

La capacidad de escurrimiento observada fue muy elevada, incrementándose conforme aumentó la intensidad de la lluvia. En el cuadro 3 se presentan los coeficientes de infiltración y escurrimiento para los tres tratamientos.

Se observa que el TN presenta en general los mayores coeficientes de escurrimiento y consecuentemente los menores coeficientes de infiltración. El TRR presentó el mayor coeficiente de infiltración y el menor coeficiente de escurrimiento. El TI, con intensidad baja, registró un coeficiente de escurrimiento menor al del TN y, sin embargo, con una intensidad elevada, presentó un coeficiente similar, lo que puede deberse a lo explicado anteriormente.

CONCLUSIONES

En general, los resultados de los tres tratamientos indican que los tepetates tienen grandes aptitudes para producir altas tasas de escurrimiento (55 - 82 %) con las intensidades

Tratamiento	Intensidad (mm/h)	Ceficiente de escurrimiento (%)	Ceficiente de infiltración (%)
Tepetate Natural (TN)	40	81,78	18,22
Tepetate Natural (TN)	60	79,95	20,05
Tepetate Recién Roturado (TRR)	40	35,13	64,87
Tepetate Recién Roturado (TRR)	60	55,98	44,02
Tepetate Incorporado (TI)	40	57,44	42,56
Tepetate Incorporado (TI)	60	80,60	19,40

Cuadro 3 - Coeficientes de escurrimiento e infiltración obtenidos en cada evento de lluvia

utilizadas en el experimento. Además, las intensidades consideradas se asocian con altas tasas de pérdida de suelo, como se comprobó en los TN y TI. Afortunadamente, las lluvias de alta intensidad (> 40 mm), que provocan la mayor parte del escurrimiento y de la erosión, son escasas.

En el TRR, el escurrimiento es reducido, lo que permite una mayor infiltración y un mejor aprovechamiento del agua.

Se comprueba así que los tepetates t3 presentan una alta erosionabilidad como consecuencia de un elevado coeficiente de escurrimiento, como muchos autores ya lo han comprobado en sus investigaciones.

Las características hidrológicas como el escurrimiento y la infiltración pueden determinarse a nivel puntual con un simulador de lluvias como el utilizado en el presente trabajo, por su fácil manejo y el ahorro de agua que permite. Si se incrementa el número de sitios de estudio, se tendrán suficientes datos para establecer un patrón del comportamiento hidrodinámico del agua en los tepetates.

Referencias bibliográficas

FIGUEROA, S. B., 1975: *Pérdidas de suelo y nutrientes y su relación con el uso del suelo en la cuenca del río Texcoco*, Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, ENA, Chapingo, México.

ORTIZ S., C. A.; CUANALO, H., 1977: *Levantamiento fisiográfico del área de influencia de Chapingo (para la cartografía de suelos erosionados)*, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

PEÑA, D.; ZEBROWSKI, C., 1992: Caracterización física y minerológica de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), orstom-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 156-164.

REY C., J. A., 1979: *Estimación de la erodabilidad de los tepetates en la cuenca del río Texcoco en base al factor K*, Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

Hidrodinámica y producción de sedimentos de un tepetate de la cuenca del río Los Sauces, Michoacán (México)

María Alcalá de Jesús, José Luis Oropeza M.

Abstract

In a rural basin at the municipio *of Morelia, Michoacán, México, a portable programable rainfall simulator type III and one plot (7 m²) were used to determine hydrodinamics in a pumitic pyroclastic* tepetate. *Two average rainfall intensities (40 and 60 mm/h) were applied for both dry and humid states of soil. The major part of the runnoff and sediment yield occurred in humid tepetate and the higher infiltration occurred in dry soil.*

Keywords: *Simulated Rainfall - Runoff - Soil Loss - Sediments*

INTRODUCCIÓN

En México, la escasez de terrenos planos hace que las zonas montañosas, generalmente no aptas para la agricultura, sean el recurso principal de explotación agrícola, lo que provoca cambios en los sistemas de uso de la tierra, dando paso al deterioro de la cobertura vegetal y la aceleración de los procesos erosivos, con el consiguiente aumento de las tasas de producción de sedimentos.

En el presente trabajo se cuantificó el escurrimiento, la infiltración y la producción de sedimentos en un lote de tepetate en cuya superficie había materiales piroclásticos pumíticos. Esto permitió conocer las relaciones existentes entre precipitación-escurrimiento por una parte y producción de sedimentos por otra, para lo cual se recurrió al uso de un simulador de lluvias, cuyo principio es generar lluvias semejantes a las naturales y reproducirlas sobre una superficie determinada.

Los objetivos de este estudio fueron determinar de manera puntual las fases físicas de los hidrogramas y sus características por cada evento de lluvia simulada, así como cuantificar la producción de sedimentos por cada evento de lluvia simulada.

MATERIALES Y MÉTODOS

El lote de estudio se localiza en una pequeña cuenca de 5 km² denominada Los Sauces, en el municipio de Morelia (Michoacán) que a su vez pertenece a la provincia fisiográfica del eje neovolcánico transversal mexicano.

El lote experimental fue trabajado en su estado natural sin que sufriera alteración alguna. El suelo se encontraba desnudo con piroclastos pumíticos sueltos sobre la superficie, con una pendiente de 5,71 por ciento, siendo ignimbrita el material parental (SARH, 1988). Medía 7 m de largo por 1 m de ancho (7 m^2) y se lo delimitó mediante un rectángulo de lámina de asbesto, al que se adaptó un vertedor metálico. El agua de escurrimiento se recogió en un tinaco de aluminio previamente aforado, a partir del cual se midió el líquido en litros por cada centímetro de altura. Las muestras se tomaron cada 5 minutos en botes de plástico de un litro de capacidad durante el tiempo total de la simulación de lluvia.

Simulación de lluvia

Equipo

Se utilizó un simulador de lluvias de aspersión portátil tipo III, programable, desarrollado por la Universidad de Purdue de West Lafayette, Indiana, USA (figura 1), con intervalo de intensidad de lluvia de 5 a 200 mm/h. El objetivo del simulador es reproducir lluvia artificial con precisión y en forma repetida, de modo que sus efectos sobre el suelo sean semejantes a los de la lluvia natural. El simulador se calibró previamente y se obtuvo un gráfico de calibración cuya intensidad fue de 0,471 oscilaciones para 6 lb/plg^2 (0,04228 kg/m^2 de presión). La ecuación de calibración fue Y = 0,4712 X, donde Y es la intensidad de la lluvia en mm/h, la misma que es determinada por el utilizador, y X el número de oscilaciones por minuto de los aspersores.

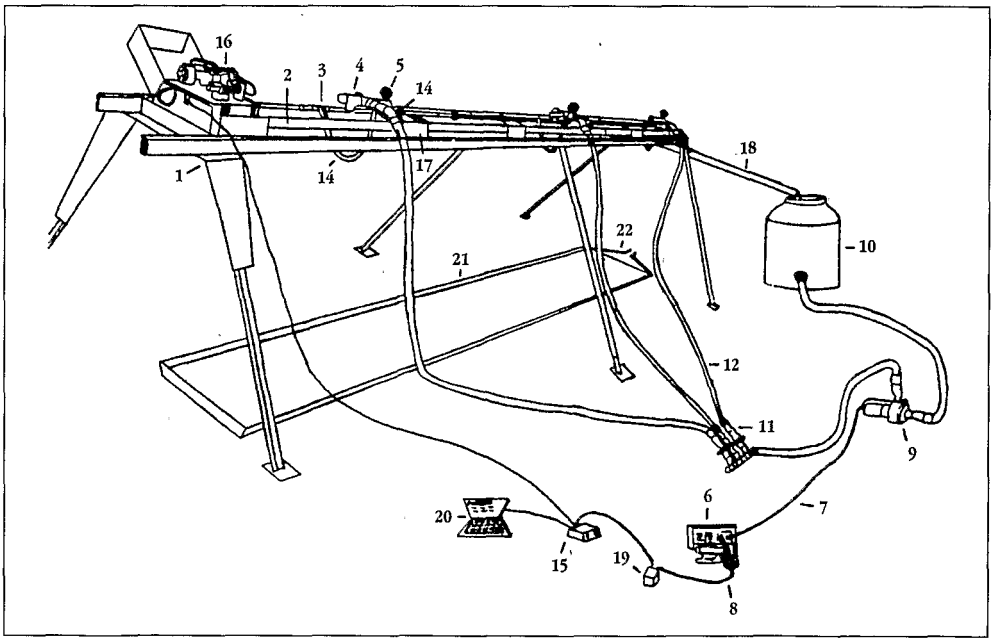


Figura 1 - Simulador de lluvias portátil tipo III (Purdue)

El simulador está constituido por una base metálica (1) de 2 m de altura y diseñado para alcanzar la energía cinética de la lluvia de acuerdo con la intensidad de la lluvia aplicada; sobre la base metálica se monta una estructura de aluminio en forma de escalera (2) y por el centro de ella atraviesa un tubo de PVC, conductor de agua, de dos pulgadas (5,08 cm) de diámetro (3); sobre la estructura de aluminio se montan 3 conexiones de plástico (4), cada una provista de un manómetro (5).

Funciona a través de una planta generadora de energía (6) con salidas de 240 voltios para la motobomba de agua (7) y de 120 voltios para la microcomputadora (8). Con esta potencia eléctrica, la motobomba de 1 HP con salida de una pulgada de diámetro (9) impulsa el agua hacia arriba desde un depósito (10). El agua pasa por la conexión de 3 mangueras de 2 pulgadas de diámetro donde se regula la presión (11 y 12), sube hasta la conexión de plástico (4) que contiene los manómetros (5) que la envían a 3 mangueras de una pulgada (13). Estas están conectadas por un extremo con los aspersores (boquillas V-Jet con abertura de 80/100 (14). El simulador consta de 6 aspersores distribuidos en 7 m^2 y separados entre sí por una distancia de 1,17 m. De los aspersores cae el agua sobre el suelo en forma de lluvia. La presión se mantiene constante en 6 lb/plg^2 (0,04228 kg/m^2).

La intensidad de la lluvia, el número de oscilaciones por minuto de los aspersores y el tiempo de duración de la lluvia se controlan a partir de un programa de cómputo denominado Fieldsim (20). El mensaje se emite a una caja de control (15) que recibe esta orden y, por una parte, pone a funcionar un motor (16) que a su vez hace girar el tubo (3) y con él, los aspersores (14), y por otra, inicia la simulación, dejando caer el agua al suelo. Una vez que comienza la oscilación de los aspersores, al llegar a las orillas estos dejan caer el agua sobre unas cajas de aluminio (17) que se conectan con un tubo de plástico (18) por medio del cual se recicla el agua hacia el depósito (10). Al no estar protegido lateralmente, el simulmador presenta una desventaja, pues el desplazamiento de las gotas de lluvia cuando las condiciones del viento son adversas puede generar errores en los resultados.

Variables hidrodinámicas medidas con lluvias simuladas

Se aplicaron dos intensidades de lluvia, una de 40 mm/h al suelo en estado seco y otra de 60 mm/h al suelo en estado húmedo. Después de una lluvia simulada, el registro de la curva de volúmenes escurridos y su variación de pendiente permite calcular los momentos de escurrimiento instantáneo que pueden ser expresados en función del tiempo para elaborar el hidrograma de escurrimiento (figura 2). Dependiendo de la lluvia simulada, se observan cuatro fases en el análisis presentado por Casenave y Valentin (1989). Estas fases ya han sido descritas por Reyes (1992, 1995) en trabajos realizados en la Reserva de la Biósfera de Mapimí (Durango, México) en parcelas de 1 m^2. En el presente trabajo se adaptaron las mismas fases de simulación en parcelas de 7 m^2.

Fase 1: Imbibición

Comprende el inicio de la lluvia justo al cabo del tiempo ti (figura 2), cuando aún no aparece el escurrimiento. Se caracteriza por la altura de lluvia, infiltrada o almacenada en superficie, llamada lluvia de imbibición. La infiltración en esta fase es total, la intensidad potencial de infiltración, en cada punto de la parcela es superior a la intensidad de lluvia. Los suelos se humectan progresivamente, la capacidad de infiltración disminuye y en ciertos puntos esa infiltración se torna inferior a la intensidad de lluvia. El agua comienza entonces a fluir y a rellenar las depresiones actuales de la parcela. Al cabo del tiempo ti los charcos se desbordan y el agua se pone en movimiento.

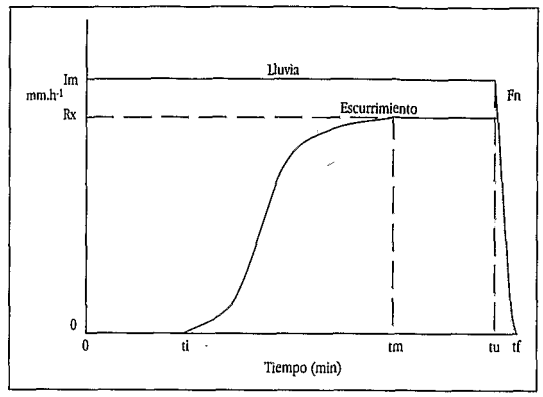


Figura 2
Hidrograma patrón de escurrimiento durante una lluvia simulada

Fase 2: Transición

En esta fase se inicia el escurrimiento, el hidrograma adopta una forma de S alargada que refleja la disminución de la intensidad de infiltración. Si todos los charcos se desbordan, el total de la superficie de la parcela participa del escurrimiento. La altura media de la lámina de agua en movimiento en la superficie aumenta.

Fase 3: Escurrimiento permanente

En esta fase, el escurrimiento superficial y la intensidad de la lluvia alcanzan el equilibrio y son aproximadamente iguales. La intensidad de infiltración es entonces mínima. Se establece un régimen de escurrimiento permanente. Si hay cambios en la intensidad de la lluvia, tal régimen varía durante un intervalo de tiempo hasta que la intensidad de escurrimiento y de infiltración alcanzan un nuevo equilibrio.

Fase 4: Vaciado

Cuando la lluvia termina al cabo del tiempo tu (figura 2), el escurrimiento decrece hasta el tiempo tf o desaparece. Esta es la fase de vaciado. La cantidad de agua que se escurre representa la fracción no infiltrada.

Coeficiente de infiltración (ki)

A cada lluvia simulada corresponde una lámina infiltrada:

$$Li = Pu - (Lr + Dr) = Pu - Lr$$

Li = lámina infiltrada durante la lluvia (mm)
Pu = altura total de la lluvia simulada (mm)
Lr = lámina escurrida durante la lluvia (mm)
Dr = detención superficial recuperable (mm); fracción de lluvia de escurrimiento medida después del final de la lluvia

A esta lámina infiltrada corresponde un coeficiente de infiltración:

$$ki = Li\ (100/Pu)\ \ (\%)$$

Coeficiente de escurrimiento (ke)

$$ke = Lr\ (100/Pu)\ \ (\%)$$

Humedad en el suelo

La humedad en el suelo se estimó mediante el método gravimétrico. Se tomaron muestras de suelo entre 0 y 10, 10 y 20, 20 y 30 cm de profundidad.

Producción de sedimentos

Los sedimentos se cuantificaron a partir de las muestras de escurrimiento tomadas cada 5 minutos durante la simulación de lluvia, las mismas que, en el laboratorio, se pasaron por papel filtro y se succionaron con aire al vacío para separar los sedimentos que fueron secados en estufa a 110 °C y pesados en balanza analítica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Lluvia y fases de la simulación de lluvia

La intensidad de lluvia aplicada y el estado inicial de humectación del suelo tienen efecto en la duración de cada evento de la simulación, hasta el momento en que el escurrimiento se torna constante a través del tiempo (cuadro 1). Así, para una intensidad de lluvia de 40 mm/h cuando el suelo se encontraba seco, la duración de la lluvia fue de 41,77 minutos y al aplicar una intensidad de 60 mm/h en suelo húmedo, tal duración disminuyó a 21,35 minutos (figuras 3 y 4).

Cuadro 1
Lámina de lluvia

I (mm/h)	Láminas Pu	Pi (mm)	Pe	Coeficientes ke (%)	ki
40	27,85	2,67	25,18	63,2	36,8
60	21,35	0,65	20,70	79,81	20,19

I: intensidad de la lluvia; Pu: lámina de lluvia útil; Pi: lámina de imbibición; Pe: lámina de lluvia efectiva; ke: coeficiente de escurrimiento; ki: coeficiente de infiltración

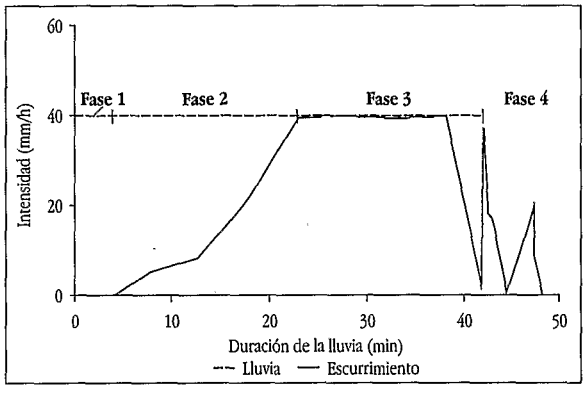


Figura 3
Hidrograma y fases de simulación de lluvia en tepetate (estado seco del suelo)

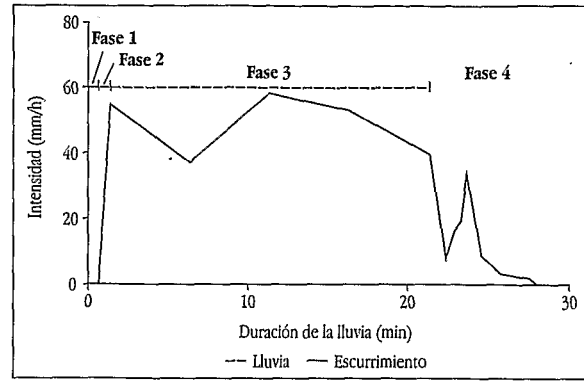


Figura 4
Hidrograma y fases de simulación de lluvia en tepetate (estado húmedo del suelo)

En la fase 1 (imbibición) es importante el tiempo de la simulación de lluvia, ya que de él depende el momento de inicio del escurrimiento. Cuando el suelo estaba seco, la duración de esa fase fue de 4 minutos (figura 3), tiempo al cabo del cual se inició el goteo hasta llegar a los 7,67 minutos. Entonces el escurrimiento se tornó continuo. Cuando el suelo se encontraba húmedo y la intensidad de lluvia fue superior, el tiempo transcurrido fue menor, registrándose a los 0,65 minuto el inicio del escurrimiento gota a gota y alcanzándose un flujo continuo al 1,35 minuto de iniciada la lluvia (figura 4).

Al finalizar esta fase, lo que coincidió con el inicio del escurrimiento que ocurrió cuando el suelo estuvo mojado, la infiltración fue menor que la intensidad de la lluvia. Lo anterior concuerda con lo que menciona Reyes (1992): a mayor intensidad de lluvia aplicada, mayor es el escurrimiento y menor la infiltración. Con intensidades menores de lluvia simulada, el escurrimiento fue menor, en el caso de un estado seco inicial del suelo. En lo anterior pudieron influir los poros que, en estado seco, admitieron más agua que en húmedo, además del hecho de que a mayor intensidad de la lluvia, la energía cinética de las gotas incide en la reorganización del suelo superficial, lo cual propició mayor escurrimiento y menor infiltración. Montenegro (1982) encontró que la macroporosidad en la parte superficial del suelo disminuye como consecuencia de la energía cinética de la lluvia y el cambio reduce la conductividad hidráulica así como la velocidad de infiltración.

El tiempo de aplicación de la lluvia en la fase 3 (régimen permanente) depende del número de observaciones que se quieran hacer, puesto que el escurrimiento y la infiltración fueron iguales. Al aplicar la intensidad de 40 mm/h (figura 3), el tepetate llegó a un equilibrio en la intensidad de escurrimiento máximo 27,67 minutos después del inicio de la lluvia. Sin embargo, cuando se aplicaron 60 mm/h de lluvia y el suelo ya estaba húmedo (figura 4), se alcanzó la intensidad máxima de escurrimiento a los 11,35 minutos. En este caso el tiempo se redujo. Esto indica que en la fase de escurrimiento máximo o permanente la humedad antecedente y la intensidad de la lluvia influyeron en las tasas de escurrimiento. El mismo comportamiento se presentó en el trabajo realizado por Rivera (1996) en un tepetate natural sin cobertura vegetal. La materia orgánica reduce el impacto de las gotas de lluvia y favorece la infiltración lenta del agua, reduciéndose el escurrimiento y la erosión (Ortiz-Villanueva y Ortiz, 1990), pero como la superficie del lote se encontraba desnuda, y además su capa superficial endurecida, se favoreció el escurrimiento.

Componentes de la lluvia

La lluvia simulada total aplicada (Pu) se divide en lluvia de imbibición (Pi) y lluvia efectiva (Pe). La primera corresponde a la altura de lluvia durante la fase de imbibición y la segunda a la altura de lluvia desde el momento en que se inicia el escurrimiento hasta el final de la lluvia. Reyes (1992) afirma que con intensidades de lluvia menores y un estado seco del suelo, la duración de la fase de imbibición se debe en parte a un déficit mayor de agua.

En el cuadro 1 se observa que la lámina de imbibición es cuatro veces mayor en estado seco del suelo que en húmedo, pese a que la lámina de lluvia útil difiere en un 25 %. Esto indica que mientras mayor es la lámina de imbibición, mayor es la lámina útil aplicada. La conductividad hidráulica de los suelos secos es superior, debido a una mayor tensión de la humedad del suelo. La capa entre 0-10 cm de espesor registró un mayor porcentaje de humedad después de la aplicación de la lluvia, el mismo que disminuyó gradualmente en las demás capas, lo que muestra que en la capa superficial hubo mayor retención de agua.

Coeficientes de escurrimiento e infiltración

Los coeficientes de escurrimiento e infiltración permiten conocer la capacidad de escurrimiento e infiltración en el suelo. En ellos interviene el total de lluvias aplicadas, tratándose de datos que varían con el estado de humectación del suelo y con la intensidad de lluvia. En el lote experimental, la infiltración fue lenta debido a que la superficie estaba endurecida y la mayor parte del agua de lluvia se escurrió.

En la figura 5 se muestra que el coeficiente de infiltración fue mayor (36,80 %) en estado seco del suelo que en húmedo (20,19 %). Esto se debió, en el primer caso, a que durante la fase de imbibición el suelo fue saturándose y se requirió mayor cantidad de agua. En el segundo caso el suelo ya estaba saturado y por lo tanto el coeficiente fue menor. Hubo mayor capacidad de escurrimiento cuando el suelo estaba saturado (79,81 %) que cuando estaba seco (63,20 %).

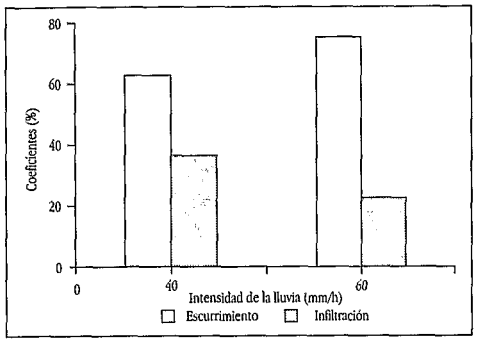


Figura 5 - Coeficientes de escurrimiento e infiltración (estado seco y húmedo del suelo)

Humedad en el suelo

En la figura 6 se aprecia que entre 0 y 10 cm de profundidad del suelo, la humedad varió en su estado inicial de 12,43 a 44,44 %, valor con que alcanzó la saturación. De 10 a 20 cm, la variación fue mínima y de 20 a 30 cm se mantuvo en su estado de

humedad. Esto muestra que el agua saturó completamente los primeros 10 cm y parte de las siguientes capas, en un tiempo determinado y es lo que corresponde a la fase 1 (de imbibición). El tiempo necesario para humedecer los primeros 10 cm del suelo seco explica también que el escurrimiento se inicie más tarde en suelo seco que en suelo húmedo.

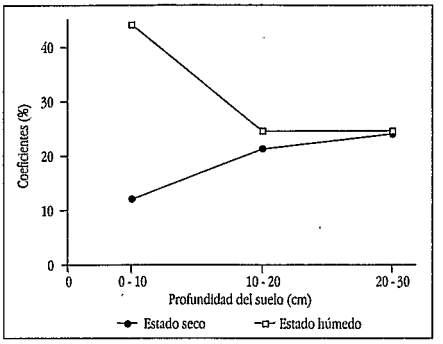


Figura 6 - Humedad en el suelo

Producción de sedimentos

La producción de sedimentos en estado seco del suelo fue proporcional a la intensidad de escurrimiento, excepto cuando se inició la fase 3 (régimen permanente) durante la cual siguió aumentando hasta alcanzar un máximo, a los 27,67 minutos de iniciada la lluvia. Luego, la producción de sedimentos disminuyó hasta el momento en que se detuvo la aplicación de lluvia (figura 7).

En estado húmedo del suelo, el comportamiento fue diferente (figura 8). La intensidad de escurrimiento no presentó un régimen permanente. A pesar de ello, la producción de sedimentos alcanzó su máximo, al igual que el escurrimiento, a los 11,35 minutos de iniciada la lluvia.

La intensidad de la lluvia y la producción de sedimentos (3.894,90 kg/ha) fueron mayores en estado húmedo del suelo que en seco (2.402,91 kg/ha). Un mayor escurrimiento y una mayor intensidad de la lluvia permitieron que se removieran con mayor facilidad las partículas de suelo y que fueran arrastradas por el escurrimiento. La mayor parte de lámina de lluvia aplicada se escurrió. Además de haberse registrado un 63 % de fragmentos de toba pumítica sueltos en la superficie endurecida, el impacto de las gotas de lluvia favoreció el desprendimiento de las partículas y el arrastre de las mismas, lo que ha sido favorecido por la pobreza del suelo en materia orgánica (0,42 %). Ortiz-Villanueva y Ortiz (1992) señalan, en efecto, que los suelos cuyos contenidos de materia orgánica son inferiores al 2 % se consideran erosionables. Asimismo, Figueroa (1975) afirma que contenidos de materia orgánica menores al 1 % solo necesitan un 10 % de suelo desnudo para que se produzcan pérdidas de suelo.

En la fase 4 (de vaciado), una vez que se detuvo la lluvia, el escurrimiento continuó, pero la producción de sedimentos ya no presentó altos y bajos como la intensidad de lluvia, sino que cada vez fue decreciendo.

Los fenómenos erosivos (escurrimiento y producción de sedimentos) no se explican por la cantidad de lluvia aplicada. En efecto, se pudo deducir que son las intensidades de

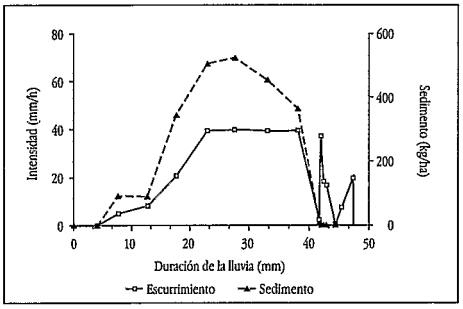


Figura 7 - Producción de sedimentos (estado seco del suelo, I = 40 mm/h)

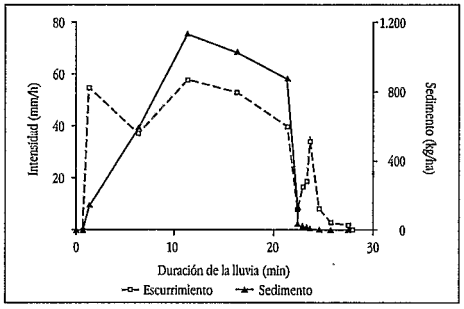


Figura 8 - Producción de sedimentos (estado húmedo del suelo, I = 60 mm/h)

las lluvias, su duración y el estado de humedad del suelo los que determinan la cantidad de agua escurrida, los coeficientes de escurrimiento y la producción de sedimentos.

CONCLUSIONES

El tiempo y la lámina de agua aplicada en la simulación de lluvia aumentaron de acuerdo con la intensidad de lluvia y el estado de humedad del suelo, y como el lote de tepetate estaba desprovisto de cubierta vegetal, el escurrimiento se presentó al cabo de poco tiempo y fue limitado.

Se reveló una relación directa entre el volumen de agua escurrida y la producción de sedimentos. El máximo escurrimiento tanto en estado seco como en estado húmedo del suelo se produjo simultáneamente con el máximo de producción de sedimentos, siendo mayor en estado húmedo del suelo.

El tepetate presentó poca capacidad de retención de agua y los factores que favorecieron el escurrimiento fueron la intensidad de la lluvia, el estado inicial de humectación sel suelo, la ausencia de cobertura vegetal y, aunado a ello, la superficie endurecida del tepetate, por lo que se consideró este tipo de material altamente erosionable.

Referencias bibliográficas

CASENAVE, A.; VALENTIN, C., 1989: Principios y características del simulador de lluvia modelo ORSTOM-Asseline, en *Los estados de superficie de la zona saheliana, influencia sobre la infiltración*, Traducción al español de V. M. Reyes, Ed. ORSTOM, Coll. Didactiques, París, Francia, p. 23-32.

FIGUEROA, S. B., 1975: *Pérdidas de suelo y nutrimentos y su relación con el uso del suelo en la cuenca del río Texcoco*, Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México, 170 p.

MONTENEGRO, H., 1982: *Efecto de la lluvia sobre la estructura interna de los suelos labrados*, Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México, 116 p.

ORTIZ-VILLANUEVA, B.; ORTIZ, C. A., 1990: *Edafología*, 7a, Universidad Autónoma de Chapingo, México, 394 p.

REYES, V. M., 1992: *Caracterización hidrodinámica en algunos suelos representativos del Norte árido de México. Reserva de la biósfera de Mapimí*, Tesis de Licenciatura, Universidad Juárez del estado de Durango, Durango, México, 75 p.

REYES, V. M., 1995: Hidrodinámica de suelos bajos en zonas áridas del Norte de México, en *Terra*, Vol. 13, Sociedad Mexicana del Suelo, Montecillo, N° 3, p. 244-254.

RIVERA, P., 1996: *Determinación del potencial hidrológico en tepetates tipo t3 con lluvia simulada*, Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, 165 p.

SARH, 1988: *Plano geológico de la microcuenca Chiquimitío, Municipio de Morelia, Michoacán*, escala 1:25:000, Morelia, Michoacán, México.

Caracterización hidrodinámica de un suelo volcánico endurecido del Ecuador (cangahua), influencia de los estados de superficie

Yann LEROUX, Jean-Louis JANEAU

Abstract

The bare and cultivated indurated pyroclastic formations of the Equatorian Sierra (cangahuas) *are strongly susceptible to pluvial erosion. Their reincorporation to agriculture allows a partial control of ground loss and offers an alternative solution for agriculture management. Rain simulation gives information about imbibition, infiltration, runoff and erodibility. The «quadrat point» method enabled us to observe the evolution of surface features (rugosity, crusting and sealing of porosity). We make three campaigns of simulation just after the soil preparation, before and after the harrowing. We observed the variations of hydrodynamic parameters and the evolution of superficial structural features. A rough soil preparation (coarse particle size) enhance the infiltration rate and reduce the soil loss. On the contrary, a fine sized preparation weakens the roughness and seals the porosity by a superficial crusting. Then the efficiency of the running water is enhanced.*

Keywords: *Agregates* - Cangahua - *Ecuador* - *Hydrodynamic* - *Infiltration* - *Quadrat Point* - *Surface Reorganization* - *Rugosity* - *Rainfall Simulation* - *Volcanic Soils* - *Sediment Moving* - *Turbidity*

INTRODUCCIÓN

La intensificación de la agricultura en el Ecuador se explica por un fuerte crecimiento demográfico desde mediados de siglo y se acompaña de un aumento en la demanda de superficies cultivables. Se observa un ascenso de los cultivos hacia las altas laderas del callejón interandino, donde las condiciones climáticas no son favorables a la agricultura y, frecuentemente, las técnicas de conservación de suelos son inexistentes (De Noni *et al.*, 1986). Esto se debe al abandono de las zonas de piedemonte, más propicias para los cultivos, debido a la erosión de los suelos agrícolas y al consecuente afloramiento de la cangahua.

La cangahua es un material proveniente de las antiguas proyecciones piroclásticas (más de 15.000 años), duro, estéril y sensible a la erosión hídrica. Su rehabilitación, que contribuiría a solucionar los problemas agrícolas, es objeto actualmente de un programa de estudio del ORSTOM con el aporte financiero de la Unión Europea (contrato ERB-

TS3*CT 930252). La finalidad de dicho programa es la valorización de esos suelos degradados que constituyen campos cercanos a las zonas de habitación, y el control parcial de la erosión de los mismos. Tal rehabilitación consiste en la roturación y la pulverización del material. Con el afán de caracterizar el comportamiento hidrodinámico de este material incorporado al cultivo, se utilizó la simulación de lluvia. Esta herramienta permite no solo determinar los parámetros elementales de la hidrodinámica superficial, sino también apreciar la erosión del suelo. De esta manera se puede observar la influencia de la técnica de preparación de los fragmentos de la cangahua así como de la pendiente y de la cobertura vegetal en la capacidad de infiltración y de escurrimiento de las diferentes parcelas cultivadas según ciertas prácticas locales.

MATERIAL Y MÉTODOS

El sitio de estudio

El sitio de estudio forma parte de la hacienda de la Tola perteneciente a la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Central de Quito. Está ubicado en la comuna de Tumbaco, 20 km al Este de la capital ecuatoriana, en las faldas del volcán Ilaló, a una altitud de 2 600 m.s.n.m. Según Custode *et al.* (1992), el sitio es representativo de las zonas de cangahua del callejón interandino. En esta región del piedemonte, el clima es de tipo ecuatorial seco de montaña. Se caracteriza por precipitaciones anuales promedio de aproxidamente 730 mm repartidas en un período de octubre a junio interrumpido por una corta estación seca de diciembre a febrero. Esta última puede provocar un déficit hídrico muy importante para los cultivos.

Las parcelas de estudio

La cangahua de La Tola es una toba alterada. Su granulometría (cuadro 1) es franco-arenosa. Contiene solamente 7 % de arcilla y 33 % de limo fino.

	Arcilla	Limo fino	Limo grueso	Arena fina	Arena gruesa	H_2O
La Tola	7,34	33,06	11,54	32,43	11,13	2,41

Cuadro 1 - Resultados granulométricos de la cangahua del sitio La Tola (en %)

Una vez despejado el suelo superficial con un buldózer a fin de no conservar sino la cangahua, el trabajo efectuado el 19 de febrero consistió en roturar la cangahua con la ayuda de un pico hasta una profundidad promedio de 25 cm y en una superficie de alrededor de 9 m^2 por parcela (lo que requiere para cada parcela 3 horas de trabajo por persona). Posteriormente, se prepararon las parcelas rompiendo los bloques de tierra de modo que se obtuvieran tres tamaños promedio de agregados. El número de parcelas instaladas en el sitio fue de 11. Seis estaban destinadas a las medidas en condiciones de simulación de lluvia y las otras cinco expuestas a las lluvias naturales. Estas últimas permiten apreciar la representatividad de las lluvias simuladas. Las parcelas fueron acondicionadas siguiendo la topografía irregular del terreno, tenían pendientes del 4,4 al 21,2 por ciento. Para delimitar el área de medición, se instalaron parcelas de 1 m^2. Se dejaron algunas parcelas al desnudo (T), otras se sembraron con maíz (M) o cebada (O), y se escogieron diferentes tratamientos de cultivo a fin de apreciar la influencia de las diversas coberturas vegetales en la hidrodinámica superficial (cuadro 2).

Lluvias	Simulación						Lluvias naturales				
Nombre	STFT	SFT	SFM	SGT	SGM	SGO	NFT	NFM	NGT	NGM	NGO
Tipo de préparación	muy fina	fina	fina	gruesa	gruesa	gruesa	fina	fina	gruesa	gruesa	gruesa
Cultivo	testigo	testigo	maíz	testigo	maíz	cebada	testigo	maíz	testigo	maíz	cebada
Pendiente (por ciento)	4,4	11,6	16,4	15,9	21,2	5,8	9,8	13,1	11,6	15,9	15

Cuadro 2 - Características de las parcelas de estudio

Se distinguen tres tipos de preparación del suelo (cuadro 3):

Preparación estructural	muy fina	fina	gruesa
> 5 cm	0	14	39
de 2,2 a 5 cm	5,6	16	11
de 0,3 a 2,2 cm	57,7	39	33
< 0,3 cm	36,7	31	17

Cuadro 3
Granulometría de los agregados obtenidos a partir de las diferentes preparaciones (% del peso húmedo total)

- la preparación «muy fina» (TF) se compone de agregados inferiores a 5 cm con una mayoría de fragmentos comprendidos entre 0,3 y 2,2 cm;
- la preparación «fina» (F) es heterogénea con un predominio de fragmentos inferiores a 2,2 cm (poco diferente a la muy fina) pero contiene algunos agregados superiores a 5 cm;
- la preparación «gruesa» (G) está constituida de partes iguales de fracciones gruesas de tamaño superior a 5 cm y de fragmentos finos comprendidos entre 2,2 y 0,3 cm.

El tamaño promedio de los agregados resultantes de la preparación de la cangahua, la pendiente, y la cobertura vegetal son las principales variables capaces de influir en la hidrodinámica superficial.

El simulador de lluvia

El mini-simulador de lluvia, diseñado por Asseline y Valentin (1978), permite reproducir el hidrograma generado por la lluvia simulada sobre las parcelas (Figura 1) y obtener los siguientes parámetros :

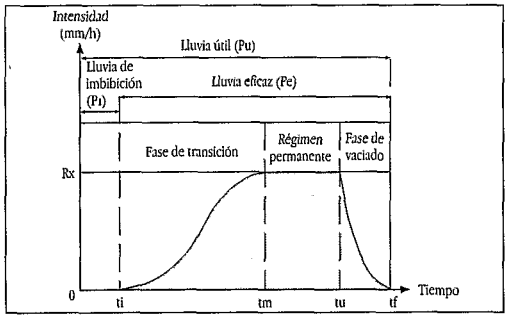


Figura 1 - Hidrograma de una lluvia simulada

- la lluvia de imbibición (Pi) que, según Lafforgue (1977), corresponde a la suma de la altura de agua (wi) infiltrada en el suelo en un tiempo ti y de la altura de la lámina de agua almacenada en la superficie bajo la forma de charcos, antes de la aparición del escurrimiento Si = S (ti), de modo que Pi = wi + Si;
- el coeficiente de infiltración mínima. Durante la fase de imbibición, la capacidad de infiltración del suelo es superior a la intensidad de la lluvia;

posteriormente disminuye tornándose, en un momento dado, inferior a la intensidad de la lluvia y apareciendo entonces el escurrimiento. Durante esta fase llamada también régimen transitorio, la infiltración baja. La capacidad de infiltración del suelo sigue disminuyendo hasta un valor mínimo (Fn). Es el régimen permanente de infiltración mínima que corresponde al régimen permanente de escurrimiento máximo (Rx), de modo que : Fn = I - Rx;

- la lámina escurrida (Lr) es medida directamente en el desagüe de la parcela lo que permite comparar el comportamiento de las diferentes parcelas ante el escurrimiento, pues la altura de las láminas precipitadas es idéntica para todas. Ella no toma en cuenta los componentes de la lámina escurrida total que incluye las retenciones superficiales recuperables (Dr). Por ello, se utilizará el coeficiente de escurrimiento útil Kru calculado de la siguiente manera: Kru = (Lr + Dr) / Pu x 100.

Por otro lado, las muestras de agua del escurrimiento recolectadas permiten, una vez que la muestra de agua turbia ha sido secada y pesada, obtener la carga sólida (turbiedad) y el peso de los sedimentos transportados. Dicha turbiedad corresponde a la eficiencia de la lámina escurrida, en función de la intensidad del aguacero, para desplazar los materiales arrancados por el efecto *splash* y por el flujo de esa misma lámina de agua. A la escala del metro cuadrado, esos sedimentos representan el transporte sólido (C, en g/m^2), utilizándose generalmente el término erosión en una superficie mínima de una hectárea (E en t/ha/año).

Protocolo de simulación

Con el fin de apreciar las variaciones del comportamiento en función del grado de reorganización superficial de las parcelas, se efectuaron tres campañas de simulación (I, II y III), las mismas que tuvieron lugar inmediatamente después de la preparación de las parcelas, antes del primer aporque y después del mismo.

Con el objeto de acercarnos a las características pluviométricas naturales del sitio, se decidió proceder a tres series de lluvia (1, 2 y 3) con cuatro intensidades diferentes de 20 minutos cada una (figura 2). Las dos últimas intensidades simuladas, 60 y 80 mm/h, representan intensidades excepcionales para el sitio de estudio. Se determinaron intervalos de 3 y 12 horas entre las lluvias, lo que permitió obtener tiempos diferentes de secado del suelo.

Las medidas del micro-relieve

Las medidas del micro-relieve y de la cobertura vegetal se efectuaron mediante el método del punto cuadrado. La herramienta de medición consiste en una tabla vertical

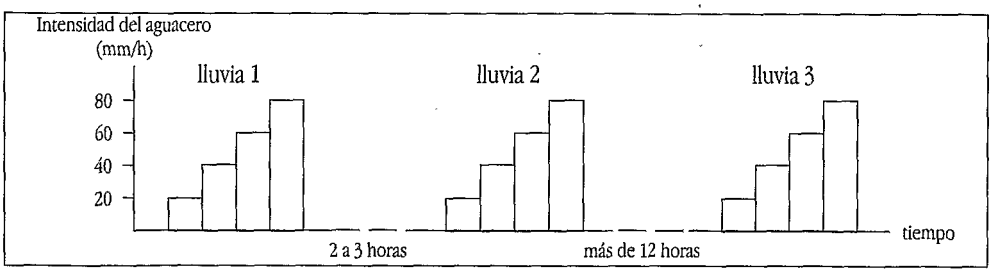


Figura 2 - Intensidades del protocolo de simulación

sobre la que se deslizan un conjunto de agujas separadas por una distancia de 5 cm. Esta tabla se coloca sobre la parcela de estudio de 1 m^2 y se desplaza cada 5 cm, lográndose medir la altura de 361 puntos de la parcela en cuestión.

Los cambios del relieve corresponden a la suma de las diferentes alturas entre dos medidas, deduciéndose de ella el índice de rugosidad del suelo (IR) que es el cuociente entre la línea quebrada B y la línea recta L. La longitud de B se calcula sumando las hipotenusas que unen las bases de dos agujas (5 cm).

Las reorganizaciones superficiales corresponden a las variaciones de los tipos de organización de la superficie. Se distinguieron dos tipos, particular y pelicular (Casenave y Valentin,1989).

Las primeras reúnen todos los agregados de la superficie clasificados según su tamaño, mientras que las segundas corresponden a las costras arcillo-limosas. Se encuentran principalmente:

- las costras estructurales de gran rugosidad;
- las costras de erosión formadas por un solo micro-horizonte muy poco espeso y que corresponden al decapado de la costra estructural;
- las costras de escurrimiento compuestas de micro-horizontes arenosos que alternan con delgadas películas plásmicas, y se distinguen por su grano-clasificación, en este caso no muy marcada.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Las lluvias de imbibición

La figura 3 representa las lluvias de imbibición acumuladas a todo lo largo del estudio. Se puede observar una clara diferencia en el comportamiento de la imbibición por una parte entre las parcelas y por otra entre las campañas de simulación.

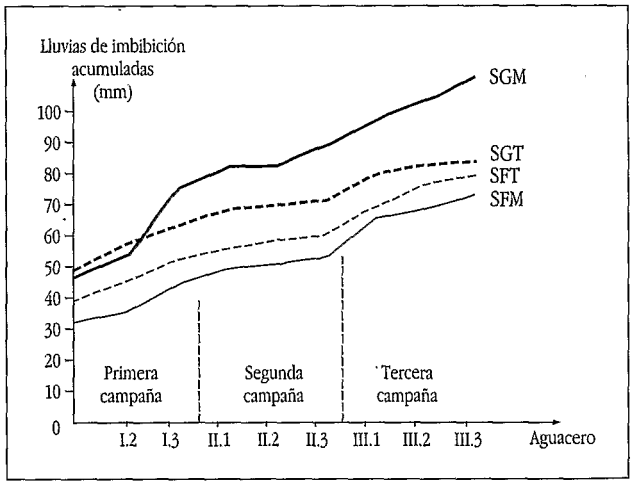


Figura 3
Lluvias de imbibición acumuladas

En efecto, desde la primera lluvia, las parcelas con preparación gruesa (SGT y SGM) reciben hasta 10 mm de lluvia adicionales con respecto a las parcelas con preparación

fina (SFT y SFM) antes del escurrimiento. Esta diferencia se mantiene a todo lo largo de los aguaceros de cada campaña. Se observará también que la parcela «gruesa» de fuerte pendiente (SGM) presenta una capacidad de imbibición mayor que su homóloga de pendiente débil (SGT), pero la primera está cultivada con maíz y la segunda desnuda. En todas las parcelas se observa (figura 3) que las pendientes son más fuertes en el caso de la primera y tercera campañas. Esto refleja una altura de agua infiltrada más importante que la de la segunda campaña.

La relación Pi = wi + Si, con wi = C(Hs - Ho) permite verificar la influencia de los factores y de las condiciones estructurales sobre las lluvias de imbibición.

- (Hs - Ho) es el déficit de saturación de agua del suelo, en donde Hs es la humedad relativa después de la lluvia y Ho la humedad relativa antes de la lluvia;
- C es un coeficiente independiente de Ho en relación con la intensidad de la lluvia;
- Si es un término que reúne los factores de intercepción (de la lluvia), de almacenamiento y de resistencia a la imbibición.

Los diferentes parámetros de esta ecuación (cuadro 4) muestran que existe una correlación entre el déficit de humectación del suelo y las alturas de las lluvias de imbibición que son función del tamaño de los fragmentos. Mientras más fina es la preparación, más se acercan globalmente esos coeficientes al valor 1 o, dicho de otra manera, mientras más gruesa es la preparación, menos dependiente es la lluvia de imbibición de ese déficit hídrico.

Preparación	muy fina	fina		gruesa		
Nom	STFT	SFT	SFM	SGC	SGT	SGM
Pendiente (por ciento)	4,4	11,6	16,4	5,8	15,9	21,2
Coeficiente de correlación	0,943	0,429	0,465	0,650	0,268	0,263
Si	3,15	2,65	2,32	1,35	4,69	7,03

Cuadro 4 - Parámetros de la ecuación Pi = wi + Si, en las parcelas de simulación

Por otro lado, los factores de intercepción no son homogéneos, aunque son mayores en las parcelas «gruesas» (4,69 y 7,03) que en las «finas» (2,32 y 2,65). La débil pendiente en la parcela «muy fina» (STFT) aumenta el valor del índice de intercepción. La heterogeneidad de los bloques de la preparación gruesa favorece el secado del suelo (evaporación más importante que en la preparación fina); el déficit de humectación aumenta pero es ante todo la importancia de los accidentes del micro-relieve lo que determina las alturas de las lluvias de imbibición. La preparación fina, en cambio, reduce los factores de intercepción de la superficie (excepto en una pendiente débil), pero el déficit de humectación influye en gran medida en las alturas de las lluvias de imbibición.

Estas primeras observaciones permiten poner en evidencia que la altura del agua que imbibe el pedazo superficial de tierra trabajada es mayor en la preparación gruesa que en la fina.

La infiltración mínima

Lafforgue (1977), Collinet y Valentin (1979) proponen un modelo para apreciar la variación de la intensidad mínima de infiltración Fn en función de la intensidad del aguacero I.

Como en las parcelas de este estudio no se respetan las condiciones de superficie homogénea, la ecuación en este caso es una función lineal creciente:

$Fn = (1 - K) I + KI_1$

en donde K es una constante para las condiciones iniciales del suelo e I_1 es la intensidad límite de escurrimiento.

Las pendientes de las funciones Fn = f (I) así como los valores de I_1 están ligados a las características de los estados superficiales y a los estados hídricos iniciales. Según los mismos autores, a medida que aumenta el déficit de saturación de agua del suelo, se incrementa la pendiente de la función Fn = f(I) y el valor I_1.

Las representaciones gráficas (figura 4) de las funciones de Fn = (I) permiten diferenciar la capacidad de infiltración durante cada campaña de simulación.

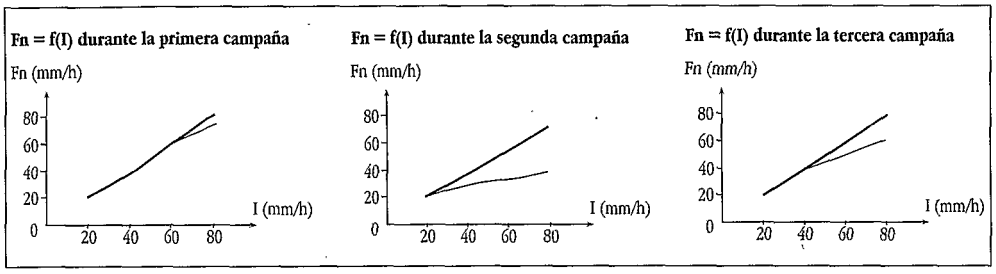


Figura 4 - Representación gráfica de Fn = f(I)

Durante la primera campaña posterior a la preparación de las parcelas, el aspecto general de las líneas traduce una importante porosidad superficial y un aumento en la capacidad de infiltración debido a una estructura sumamente porosa y una sumersión parcial de la superficie debida a la lámina de agua. Los coeficientes de infiltración (Kfn = Fn / I x 100) son del orden de 100 a 91,8 % en el caso de las parcelas gruesas y de 100 a 96,6 % en el de las finas.

Durante la segunda campaña, el aspecto de las líneas se distingue en función del tipo de preparación. Las parcelas gruesas conservan un comportamiento similar al observado cuando la primera campaña, mientras que las parcelas revelan un nivel mínimo de infiltración (Fn) alcanzado desde intensidades de aguacero de 60 mm/h, con coeficientes de infiltración mínima del orden del 60 %.

Durante la tercera campaña que sigue al aporque, se observa de nuevo un comportamiento similar al de la primera campaña, aunque las intensidades de infiltración mínima de las parcelas finas tienden a bajar progresivamente. La amplitud de las variaciones de Fn es del 33,4 % en el caso de las parcelas finas y del 4 % en el de las parcelas gruesas.

La observación de las variables de la ecuación $Fn = (1 - K)I + KI_1$ (cuadro 5) permite, como explican Lelong y Trevisan (1992), obtener una apreciación de la conductividad hidráulica.

$K = V / i$

en donde: V es la velocidad de infiltración
i la gradiente de carga hidráulica
K la conductividad saturada puntual del área sumergida.

Tratamientos y pendiente (porcentaje)	Testigo (TF) 4,4		Testigo (F) 11,6		Maíz (F) 16,4		Cebada (G) 5,8		Testigo (G) 15,9		Maíz (G) 21,2	
	1-K	I_1 mm/h	1-K	I_1 mm/h	1-K	I_1 mm/h	1-K	I_1 mm/h	1-K	I_1 mm/h	1-K	I_1 mm/h
Ref. lluvias	Primera campaña											
I.1	1,22	28,44	1,00	33,72	1,02	28,14	1,01	31,89	1,00	21,68	1,00	9,23
I.2	1,31	25,41	1,01	20,23	1,02	10,00	1,06	25,70	1,03	22,36	1,01	18,81
I.3	1,11	20,80	1,01	22,35	1,04	21,15	1,08	24,20	1,12	24,46	1,02	26,50
	Segunda campaña											
II.1	2,12	23,14	2,00	21,24	1,65	22,25	1,06	18,01	1,36	19,71	1,10	23,70
II.2	2,91	19,76	2,11	17,64	2,11	20,36	1,08	17,44	1,32	9,88	1,08	16,51
II.3	3,18	17,64	2,18	15,90	1,88	13,95	-	-	1,33	10,30	1,08	12,89
	Tercera campaña											
III.1	-	-	1,05	25,50	1,05	22,57	-	-	1,12	27,01	1,03	26,08
III.2	-	-	1,20	22,21	1,48	24,35	-	-	1,13	13,36	1,02	17,32
III.3	-	-	1,30	18,70	1,92	20,49	-	-	1,18	16,34	1,03	20,57

Granulometría: TF = muy fina, F = fina, G = gruesa

Cuadro 5 - Variables de la ecuación Fn = f(I) de las parcelas

En el presente caso, mientras mayor es el índice (1 - K) —o el valor absoluto de K—, mayor es el cuociente V/i, o, dicho de otro modo, menor es la carga hidráulica. Se observa entonces que la degradación de la conductividad hidráulica es tanto más importante cuanto más fina es la preparación, lo que se explica por el relleno de la porosidad superficial por parte de las particulas finas.

Las medidas del micro relieve: rugosidad, reorganizaciones superficiales.

La reducción de la infiltración se acompaña de una variación del micro-relieve. En efecto los índices de rugosidad (cuadro 6) según el tipo de clasificación granulométrica muestran una disminución de la rugosidad del suelo, más importante en la preparación fina que en la gruesa.

Referencia parcela	SFT	SGT
Preparación (T)	fina	gruesa
Antes de la primera campaña	1,09	1,15
Antes de la segunda campaña	1,04	1,10
Antes de la escarda	1,02	1,13
Después de la escarda	1,16	1,32
Antes de la tercera campaña	1,13	1,29

Cuadro 6
Resumen de los índices de rugosidad de dos parcelas representativas

De manera general, la rugosidad disminuye hasta el final de la segunda campaña, antes de la formación de camellones. El aporque remodela la superficie y aumenta entonces el índice de rugosidad, el mismo que es correlacionado con las diferentes capacidades

de infiltración. Como lo explica Raheliarisoa (1984), la heterogeneidad de la superficie retrasa la aparición del escurrimiento aumentando la capacidad de almacenamiento de la superficie bajo forma de charcos, tornando más lenta la formación de la costra de superficie e incrementando la porosidad que se ofrece a la infiltración. Las parcelas gruesas con un alto índice de rugosidad presentan una mayor capacidad de infiltración.

Las medidas de las diversos tipos de organización superficial (figura 5) permiten poner en evidencia que las formaciones laminares (costras) son numerosas en la parcela de preparación fina durante el período anterior al aporque. La movilización de las partículas más finas para la formación de costras se ve favorecida por el crecimiento del flujo de la lámina escurrida, el mismo que es facilitado por un bajo índice de rugosidad. La sinuosidad de la superficie disminuye la velocidad de la lámina y por lo tanto su capacidad de erosión favoreciendo la sedimentación. Las costras (principalmente estructurales y de erosión) alcanzan, antes del aporque, un recubrimiento del 50 % en las parcelas finas, y solo del 35 % en las gruesas.

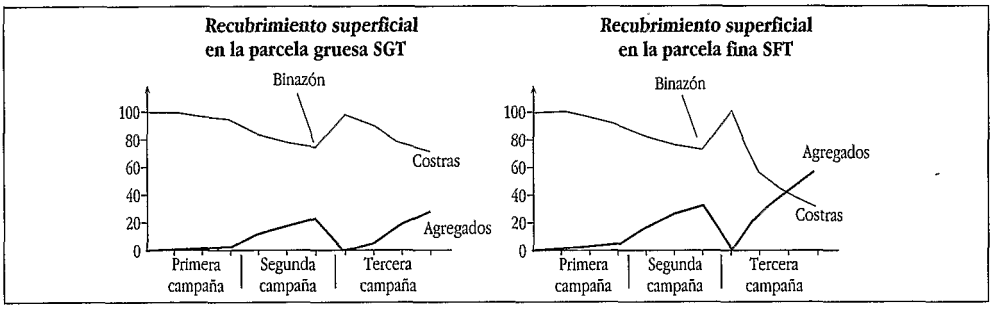


Figura 5 - Evolución del recubrimiento superficial en las parcelas testigo

El aporque reinstaura temporalmente una macroporosidad, pero la permanencia de su efecto depende de la estabilidad de las estructuras y del tamaño de las partículas. En efecto, durante la tercera campaña, las costras aparecen más rápidamente que durante la primera, aunque son menos extensas en la preparación gruesa que conserva un elevado índice de rugosidad.

Lámina de escurrimiento

Influencia del tipo de preparación y del tiempo de secado entre las campañas de simulación de lluvia

La lámina escurrida acumulada es claramente dependiente del tipo de preparación de las parcelas (figura 6) aunque también del tiempo de secado entre lluvias.

Durante la primera campaña, los totales escurridos son relativamente bajos y poco diferenciados en las dos preparaciones, lo que se explica por una importante infiltración debida a una porosidad suficientemente gruesa que, sin embargo, en una fuerte pendiente, genera un flujo interno entre el horizonte no trabajado y el suelo roturado.

Durante la segunda campaña, se observa un aumento casi lineal de las alturas de escurrimiento, que corresponde a un descenso de los valores de los niveles de infiltración mínima. La infiltración es menor y por lo tanto el escurrimiento más importante en las

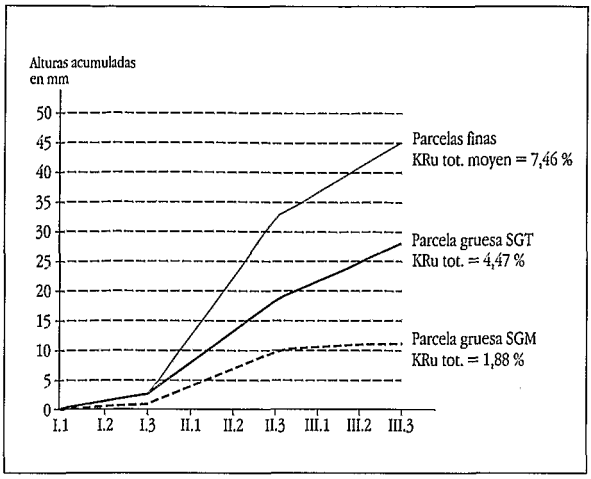


Figura 6 - Lámina escurrida acumulada

parcelas finas. Así, al final de la segunda campaña, las alturas acumuladas en esas parcelas alcanzan valores cercanos a los 33 mm frente a apenas 10 a 17 mm en el caso de las parcelas gruesas. Los coeficientes de escurrimiento útil (KRru), que representan la altura del agua que sale de la parcela con respecto a la altura total precipitada, confirman este resultado.

El trabajo del suelo entre la segunda y tercera campañas explica que las láminas escurridas obtenidas durante la última campaña, aunque elevadas, sean menores que aquellas obtenidas durante la segunda y ello en el caso de ambos tipos de preparación.

Nombre	SFT		SGT	
Preparación	fina		gruesa	
Pendiente (por ciento)	11,6		15,9	
Referencia lluvias	Coef. de apl.	Dr (mm)	Coef. de apl.	Dr (mm)
Primera campaña	46,7	43	61,8	8
Segunda campaña	42,2	668	56,4	413
Avant le sarclage	34,2	-	48,8	-
Tercera campaña	80,2	177	87,0	165
Después de la tercera campaña	46,3	-	85,4	-

Cuadro 7
Coeficiente de aplanamiento y retención recuperable en dos parcelas representativas

Incidencia de la lámina de escurrida en la rugosidad

La lámina escurrida total se compone de la altura de agua escurrida durante el aguacero y de la altura del agua recuperable (Dr) una vez terminado el aguacero. El cuadro 7 permite poner en evidencia que las retenciones recuperables dependen ante todo de la rugosidad y por lo tanto de la capacidad de la superficie para restituir la lámina de agua residual después del aguacero. Esta es superior cuando la infiltración es menor. Así, es en las parcelas finas cuya porosidad se ha degradado donde se observan los mayores volúmenes retenidos recuperables.

Además, los coeficientes de aplanamiento de la rugosidad que corresponden a los porcentajes de altura comprendidos entre 1 y -1 cm con respecto al promedio, están bien correlacionados con las retenciones recuperables.

Incidencia de la lámina escurrida en el transporte sólido

La lámina de escurrimiento se acompaña de una carga sólida en suspensión, la turbiedad (Cm), que es proporcional a las alturas de escurrimiento. A fin de apreciar la evolución de este transporte sólido en función de la intensidad del aguacero, la ecuación Cm = aI + b

permite obtener las correlaciones (r) entre las cantidades de sedimentos transportados y las características físicas y de cultivo de cada parcela (cuadro 8). Es así como se obtiene la intensidad límite de lluvia ($I_{lím}$) a la que corresponde una turbiedad nula.

Ref. parcelas	STFT		SFT		SFM		SGC		SGT		SGM	
Preparaciones	muy fina				fina				gruesa			
Tratamientos y pendiente (por ciento)	Testigo 4,4		Testigo 11,6		Maíz 16,4		Cebada 5,8		Testigo 15,9		Maíz 21,2	
Ref. lluvias	I_{lim} mm/h	r	I_{lim} mm/h	r	I_{lim} mm/h	r	I_{lim} mm/h	r	I_{lim} mm/h	r	I_{lim} mm/h	r
Primera campaña	28,30	637	-	-	-	-	31,70	406	-	-	-	-
Segunda campaña	36,76	856	24,81	777	26,66	789	-	-	19,57	590	22,53	889
Tercera campaña	-	-	26,40	870	29,17	830	-	-	28,12	794	23,33	954

Cuadro 8 - Intensidad límite de las lluvias correspondientes a un transporte nulo y coeficiente de correlación de Cm = f(I)

Los resultados son heterogéneos y aparentemente contradictorios: el transporte sólido se inicia con menores intensidades en las parcelas gruesas que en las finas. Sin embargo, hay que recordar que la exportación total de materiales es la suma de los sedimentos que constituyen la turbiedad y de elementos más gruesos desplazados por reptación debido a la energía del flujo de la lámina escurrida y depositados a la salida de la parcela. Tal reptación es el modo de transporte predominante en todas las parcelas y aumenta la capacidad de la lámina escurrida para transportar los sedimentos. Por otro lado, la amplitud de la pendiente y la capacidad de la lámina escurrida de transportar los sedimentos dependen del tamaño de los agregados, el mismo que puede o no favorecer el fenómeno. El aumento de la pendiente en las parcelas finas incrementa la eficiencia de la lámina escurrida y por lo tanto la exportación de material. El flujo de la lámina escurrida es en cambio menos eficaz en las parcelas gruesas. En ese caso es la amplitud de la pendiente, reducida por la rugosidad de la superficie, la que amplifica el transporte sólido total.

Las medidas de la turbiedad frente a intensidad de la lluvia permitiron observar un aumento del transporte sólido con la intensidad del aguacero. La abrasión del material es más pronunciada en las parcelas finas.

El comportamiento de la parcela gruesa de fuerte pendiente (21 por ciento) cultivada con maíz, caracterizado por una importante infiltración y posteriormente una reducida lámina escurrida, puede explicarse por el efecto de la cobertura vegetal (poco significativo durante este primer año de cultivo) que reduce la susceptibilidad de una partícula a desprenderse de un agregado por el efecto *splash* bajo la influencia de la energía cinética de la lluvia o del flujo de escurrimiento. Además, la fuerte pendiente permite la evacuación del agua infiltrada bajo la forma de un flujo interno.

CONCLUSIÓN

La caracterización hidrodinámica de los suelos volcánicos endurecidos y rehabilitados permite la comprensión de los fenómenos de escurrimiento y de transporte sólido.

Gracias a la simulación de lluvia, que modeliza ciertos parámetros pluviométricos naturales, se pueden analizar las diferentes fases de la hidrodinámica superficial así como interpretar los comportamientos frente a la imbibición y la infiltración, en función de los diferentes tratamientos de las parcelas.

En tales comportamientos hidrodinámicos influyen directamente la rugosidad de la superficie que caracteriza a los tipos de preparación del suelo y la evolución de la reorganización superficial del suelo.

Así, debido a la roturación y pulverización de la cangahua, una preparación gruesa (de al menos 50 % de agregados de tamaño superior a 5 cm) propicia un índice de rugosidad importante, estable, y una macroporosidad mayor en el tiempo y en el espacio que en el caso de la preparación fina. Esto se traduce en una mayor altura de agua de imbibición hasta la saturación del horizonte de cangahua cultivado, y por lo tanto en un retraso en el inicio del escurrimiento con respecto a la parcela de preparación fina.

La disminución de la infiltración y por lo tanto de los recursos hídricos para las plantas depende directamente de la estructura superficial del suelo y de la pendiente. En la preparación fina, la conductividad hidráulica se degrada rápidamente debido al desmenuzamiento de los agregados, al taponamiento de los poros y a la rápida formación de costras superficiales.

La altura acumulada de lámina escurrida es mayor en las parcelas de preparación fina. El escurrimiento es tanto más importante cuanto menor es la rugosidad de la superficie. Los numerosos obstáculos de la preparación gruesa frenan el flujo y disminuyen las alturas de escurrimiento. Este proceso es más marcado después de la segunda campaña de medidas y se atenúa por el trabajo del suelo al inicio de la tercera campaña. El umbral de la intensidad de las lluvias que desencadenan el transporte de sólidos es en cambio menor o igual en una parcela gruesa que en una parcela fina.

La disminución del fenómeno de transporte sólido y consecuentemente de la erosión posterior a la rehabilitación de la cangahua para la agricultura, es posible mediante una preparación gruesa, en una pendiente inferior al 16 por ciento. En efecto, se ha observado a nivel del metro cuadrado, la existencia de un escurrimiento interno en una pendiente fuerte indica que la disociación estructural entre el horizonte trabajado y la cangahua puede facilitar los fenómenos de solifluxión.

El estudio demuestra que una preparación gruesa permitiría minimizar las pérdidas de suelo por escurrimiento y favorecería la retención del agua necesaria para los cultivos. Sin embargo se deben tomar precauciones al rehabilitar la cangahua en una pendiente inferior al 16 por ciento (acondicionamiento de terrazas) con el fin de evitar todo riesgo de escurrimiento interno en el horizonte subyacente no trabajado.

Referencias bibliográficas

ASSELINE, J.; VALENTIN, C., 1978: Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion, dans *Cahiers ORSTOM*, Série Hydrologie, 15, 4, p. 321-347.

CASENAVE, A.; VALENTIN, C., 1989: *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*, ORSTOM, Paris, France, 242 p.

CUSTODE, E.; DE NONI, G.; TRUJILLO, G.; VIENNOT, M., 1992: La cangahua en el Ecuador: caracterización morfo-edafológica y comportamiento frente a la erosión, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 332-346 .

De Noni, G.; Trujillo, G.; Viennot, M., 1986: L'érosion et la conservation des sols en Équateur, dans *Cahiers ORSTOM*, Série Pédologie, XXII, 2, p. 235-245.

Henin, S., 1976: *Cours de physique du sol. Tome II : L'eau et le sol - Les propriétés mécaniques - La chaleur et le sol*, ORSTOM Paris et EDITEST Bruxelles, 221 p.

Lafforgue, A., 1977: Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Application à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées, dans *Cahiers ORSTOM*, Série Hydrologie, 14, 4, p. 299-243.

Lelong, F; Trevisan, D., 1992: Influence de la dégradation structurale superficielle sur le ruissellement enregistré sous pluies simulées, dans *Science du Sol*, 2, 1, p. 43-56.

Raheliarisoa, M. A., 1984: *Influence des techniques culturales sur le comportement hydrodynamique et la susceptibilité à l'érosion de sols limoneux et sableux. Experimentation au champ sous pluies simulées en région centre*, Thèse de Doctorat, Géologie appliquée, (hydrogéologie), Université d'Orléans, 205 p.

Wainwright, J.; Abrahams, A.; Parsons, A., 1995: A Simulation Study of the Role of Raindrop Erosion in the Formation of Desert Pavements, in *Earth Surface Processes and Landforms*, 20, p. 277-291.

Organización superficial de los tepetates cultivados, Texcoco (México)

Marc LAUFFER, Yann LEROUX,
Christian PRAT, Jean-Louis JANEAU

Abstract

In Mexico, there is very few information about the soil surface crusting in relation to the rain. When creating a new soil from a indurated volcanic tuff, it is important to study the behaviour and dynamics of the new structure under the action of rain and cultivation practices. We followed 6 terraces during 3 years on different kinds of soil and tepetate, *as well as different kinds of soil tillage and crops. We used the «rugosimeter» and a «crop covermeter» of 2 m² with a precision of 10 cm² for each measure. We measured the humidity and the crusting of the soil after every runoff-producing event and the vegetation covering once a week. At the same time, we followed the state of the row and their ruptures along every terrace.*

This study confirms and details the 4 different kinds of crusting of this new soil. They are following this dynamic: 1) a structure crust with predominance of plasma is formed; 2) then come the erosion crust; 3) then the runoff crust and nearly in the same time; 4) the deposit crust. To pass from the phase 1 to 2, the cumulated energy of the rain must be higher than 560 MJ/h. In the case of the beginning of the destruction of the row, this energy is nearly the same: 530 for the tepetate *and 580 MJ/ha for the soil (phæozem).*

Laboratory tests and the following of aggregates bigger than 5 cm show that in the case of terraces with manure, the structure of the soil is more stable. But in the fields, there is not such a clear difference with the other treatments. The protection of the soil by vegetation is clearly better with associations than with monoculture. It does not only protect the aggregates but also the row. In effect, corn produces a stem flow which destroys the row at the foot of the plant, while the association of corn and string bean limits this influence by the captation of the rain by the string bean. In the case of barley, the erosion is laminar and diffuse but, at the base of the terrace, it is possible to notice a clear runoff concentration. In the case of corn, water is concentrated inside the row and only under certain conditions occurs a movement from one row to the other one due to their rupture. Erosion is more visible but really less intense than with barley because there is runoff only during strong and exceptional rains, while with barley runoff occurs during quite all rains over 3 mm. Cleaning of the fields during the rainy season could be good for the plants and could reduce soil erosion if well done. Otherwise, it could have catastrophic results. Under this climate, we recommend rows with little rain catchment and with an association of corn and string bean to limit destruction of the furrows and soil erosion.

Keywords: Tepetate - *Mexico - Crusts - Structural Degradation - Tillage Practices - Soil Erosion - Barley - Corn - String Bean*

INTRODUCCIÓN

La formación de un nuevo suelo a partir de tepetates roturados implica un cambio drástico en la estructura de este material. Al cultivarlo, se generan procesos a lo largo de la temporada de lluvia que van a favorecer o impedir la penetración del aire y del agua en el nuevo suelo. Estos fenómenos tendrán un efecto directo tanto en la productividad de los cultivos como en la intensidad del escurrimiento y del arrastre de sedimentos. Por estas razones, es indispensable relacionar estudios agronómicos y erosivos con el estudio de la cobertura vegetal y de la organización superficial.

En México, este tipo de estudios es poco usual y en cuanto a los tepetates, se cuenta únicamente con el trabajo de Jerome (1991) y Jerome y Janeau (1992) realizados con parcelas Wischmeier. En el marco del programa UE-ORSTOM-CP-UAT-UG, se trabajó durante 3 temporadas de lluvias (1994 a 1996) con parcelas de tepetate t3 cultivado bajo distintas modalidades, comparándolo con un suelo arcilloso y un tepetate no roturado.

Después de caracterizar y cuantificar los procesos y formas de reorganización superficial y de la cobertura vegetal, el propósito es establecer relaciones entre estos datos y los de escurrimientos y arrastres ocurridos en las parcelas así como con los datos de desarrollo y producción de los cultivos. El objetivo final es proponer soluciones y formular recomendaciones técnicas para limitar la degradación de los nuevos suelos.

METODOLOGÍA

La zona de estudio se encuentra en San Miguel Tlaixpan (Edomex) aproximadamente 15 km al este de Texcoco. Está localizada en la parte oriental de la cuenca de México, a nivel de los 98° 47' 55" de longitud norte y los 19° 29' 53" de latitud oeste. La altitud es de 2.555 m.s.n.m. El clima, según la clasificación de Köppen modificada por García E., es del tipo C(w1)(w), es decir templado subhúmedo, con un régimen de humedad ústico-údico (Peña y Zebrowski, 1992).

Características de los aguaceros

Se colocaron 3 pluviómetros a una distancia de 100 m entre ellos a lo largo del área de experimentación. Uno de ellos se localizó cerca de un pluviógrafo de registro diario. En otro artículo presentado en este volumen (Prat, 1997), se detalla la metodología adoptada.

Características de las terrazas estudiadas

Las características de la preparación del tepetate t3 así como de las parcelas aparecen de manera detallada en el artículo de Báez *et al.* (1997) presentado en este volumen. Se diseñaron 7 terrazas que fueron trabajadas de diferente manera, a fin de intentar corroborar el efecto de un parámetro en otro, desde un punto de vista tanto agronómico como de conservación de suelos (cuadro 1).

En el cuadro 2 se presentan los cultivos sembrados de 1993 a 1996.

Los tratamientos tienen como objetivo comparar los siguientes parámetros: asociación gramíneas + leguminosas vs. monocultivo, roturación normal vs. roturación profunda, aplicación de estiércol vs. aplicación de abonos minerales, pendiente del 5-10 por ciento vs. pendiente plana, tepetate vs. suelo y, en 1996, surcos con contreo (T5) y sin contreo (T6).

Medición del relieve y de la cobertura vegetal

Se trabajó con pequeñas parcelas de casi 2 m^2 delimitadas por un rugosímetro o punto cuadrado, que utiliza el sistema de mallas y clavos (Jerome, 1991) que se desplazan

Tratamiento	Ref.	Área (m^2)	Substrato	Prof.* (m)	Pendiente (%)
Referencia tepetate desnudo y no roturado	T0	1.800	Tepetate desnudo	**	2 a 10
Efecto profundidad roturación	T2	470	Tepetate roturado	0,60	4,7
Referencia monocultivo	T3	773	"	0,46	3,2
Efecto estiércol	T4	732	"	0,43	3,4
Efecto preparación de la tierra y plana (fina)	T5	792	"	0,44	2,5
Referencia (hasta inicios de 1995)	T6	1.152	"	0,40	4,4
A partir de inicios de 1995	T6a	733	"	0,40	4,4
Referencia suelo	T7	713	Suelo arcilloso	0,53	5,9

*: Profundidad promedio de roturación, **: no roturado

Cuadro 1 - Características de las terrazas después de la roturación (salvo T0 no roturada)

Ref.	1993	1994	1995	1996
T2	Cebada + veza	Maíz + Haba + Frijol	Maíz + Haba	Cebada + Medicago p.
T3	Cebada	Maíz	Maíz	Cebada
T4	Cebada + veza	Maíz + Haba + Frijol	Maíz + Haba	Cebada + Medicago p.
T5	"	"	"	Maíz + Haba contreo
T6	"	"	"	Maíz + Haba
T7	"	"	"	Cebada + Medicago p.

Cuadro 2 - Sistemas de cultivo aplicados en las parcelas de estudio de 1993 a 1996

dentro de un marco estático. La cobertura vegetal se mide en las mismas pequeñas parcelas, con el mismo cuadro y las mismas líneas siguiendo la metodología de estimación de superficie a través de miras divididas en cuadrantes. El sistema permite la medición de 198 puntos, es decir un punto cada 10 cm^2.

Las lecturas con el rugosímetro se efectuaron después de cada lluvia fuerte mientras que en el caso de la vegetación se realizó una por semana (lo que es suficiente debido a la velocidad de crecimiento). Estas últimas mediciones fueron interrumpidas cuando la cobertura vegetal alcanzó el 80 %, pues al tamaño de las plantas superaba la capacidad del aparato de medición, y se cuidaba de no dañarlas.

Los seguimientos fueron realizados en 1994 por Y. Leroux y J.-L. Janeau (Leroux, 1994), en 1995 por M. Lauffer (1996) y en 1996 por A. Báez, E. Ascencio y C. Prat. Sin embargo, se presentan aquí únicamente los resultados de los trabajos efectuados en 1994 y 1995 con maíz y maíz-haba. El cuadro 3 presenta la localización de las pequeñas parcelas estudiadas.

Con base en la clasificación de los diferentes modos de organización superficial definidos por Casenave y Valentin (1989), se describieron y clasificaron las estructuras superficiales en cada medición con el punto cuadrado. Esto permite disponer no solamente de datos cualitativos sobre la dinámica de dichos modos de organización, sino también datos cuantitativos que se pueden relacionar con valores de otros fenómenos.

Ubicación	T0	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Cerca del vertedor				1994-1995		1994-1995	
Parte central de la terraza	1994	1996	1994-1996	1996	1996	1996	1994-1995-1996
Lado opuesto al vertedor				1994-1995		1994-1995	

Cuadro 3 - Ubicación de las pequeñas parcelas experimentales en los diferentes años de estudio

Mediciones complementarias

Para complementar estos datos, se efectuó la medición de la humedad superficial del suelo, a través de muestreos gravimétricos de los 10 primeros centímetros.

Se estableció también el porcentaje de superficie ocupada por los más pequeños agregados no incorporados a las costras (diámetro mínimo).

A partir del seguimiento del diámetro de una decena de agregados a lo largo de la temporada de lluvia, se determinaron tanto la velocidad como el momento de desaparición de dichos agregados.

Observaciones de los surcos

Se analizó también la evolución del estado de los surcos a lo largo y ancho de cada terraza a través de un levantamiento semi-cuantitativo. El objetivo era relacionar las mediciones obtenidas mediante el punto cuadrado con los fenómenos que ocurren en las terrazas estudiadas, los cuales tienen, evidentemente, una repercusión en la cantidad y calidad de sedimentos arrastrados y aguas escurridas, recolectados en las piletas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Humedad superficial

Entre la parte alta del surco y la baja, hay una diferencia de aproximadamente un 10 % de humedad. También se observan diferencias de humedad entre la parte alta y baja de la terraza, siendo la segunda más humeda. Esto se explica tanto por el agua que se acumula en el fondo de los surcos como por la concentración de los escurrimientos hacia la parte baja de cada terraza.

Debido a la variabilidad de las precipitaciones, tanto en términos de cantidad como de repartición durante la temporada de cultivo, hay variaciones muy fuertes de la humedad superficial. La superficie de los suelos presenta, alternativamente, fases de secamiento y de humedecimiento, es decir que el porcentaje de humedad puede variar del 40 al 20 % y viceversa en algunos días.

Diámetro mínimo

La medición del porcentaje de superficie ocupado por los agregados de un diámetro inferior a 5 cm después de las labores agrícolas, muestra que independientemente del trabajo que se realice en el suelo, los agregados de T7 representan menos del 40 % de la superficie, mientras en las demás terrazas dicho porcentaje es mucho mayor.

Son notables las variaciones de una terraza a la otra y de una fecha de laboreo a otra. Ello se debe tanto a la heterogeneidad del trabajo como al estado del suelo, en particular a su grado de humedad al momento del trabajo. Así, tal como lo mostró Le

Bissonnais (1988), se pudo constatar que mientras más húmedo está el suelo, más la reorganización de su superficie propicia la formación de agregados grandes.

Se puede observar también que el deshierbe genera casi dos veces menos agregados grandes que el laboreo. Mientras el laboreo levanta el material a las lomas de los surcos, el deshierbe desestructura la costra estructural de manera localizada y superficial.

	T3 parte media	T4 parte alta	T4 parte baja	T6 parte alta	T6 parte baja	T7 parte media
Después de la 1ª labor (03/08/94)	70%	72%	51%	64%	44%	37%
Después del deshierbe (05/08/94)	42%	44%	37%	34%	47%	37%
Después de la 2ª labor (16/08/94)	80%	57%	65%	65%	15%	32%

Cuadro 4 - Porcentaje de superficie del punto cuadrado, ocupado por los agregados de diámetro inferior a 5 cm

Desmenuzamiento de los agregados

El comportamiento del desmenuzamiento de los agregados es muy diferente según el material de que están constituidos. Los pedazos de tepetate se desmenuzan muy poco. Su destrucción se origina en la formación de fisuras dentro del bloque favorecidas por los procesos de humectación-desecación.

Los agregados del suelo eólico-coluvial (T7) se desmenuzan muy rápidamente participando en el selladura de la porosidad superficial. No tienen una estructura masiva y su desagregación en el agua es total. Su composición de arena y arcilla explica este comportamiento.

En cuanto a los agregados de suelo formados por el tepetate roturado y trabajado (T2 a T6), presentan una desagregación parcial cuando se sumergen en el agua. Es su contenido previo de agua lo que influye en su comportamiento: los agregados secos deberían destruirse más lentamente que los más húmedos, pero los primeros son más sensibles a la humectación y a la desecación ya que se agrietan y se abren. En el caso de T4, donde se efectuó un aporte de estiércol, el proceso de destrucción es más lento. La acción hidrófoba de la materia orgánica podría explicar este fenómeno. Sin embargo, el proceso es solamente retardado ya que al final de la experimentación, los agregados también se desmenuzan parcialmente.

Caracterización de los modos de organización superficial

A lo largo de las observaciones, y con base en la clasificación de Casenave y Valentin (1989) y en el trabajo de Ruiz (1983), se reconocieron los siguientes 4 tipos de costras:

Costra estructural con predominio de plasma (ST1)

Está conformada por una película estructural que envuelve a los agregados y corresponde a la primera fase de reorganización de los suelos trabajados, arcillosos o limosos. Cierra la porosidad superficial, contrastando de esta manera con el horizonte subyacente donde se puede mantener una fuerte macro-porosidad (Casenave y Valentin, 1989) — figura 1 —.

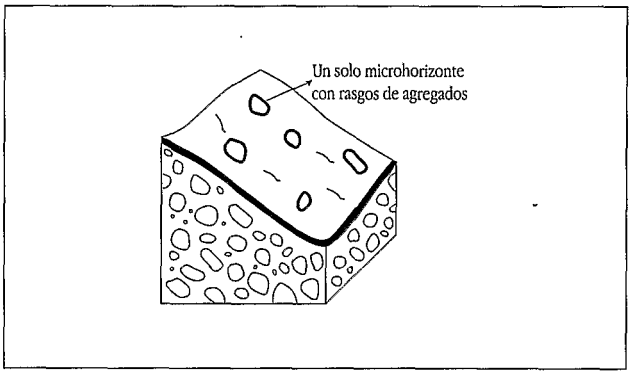


Figura 1
Costra estructural con predominio de plasma

Costra de erosión (ERO)

Está formada de un solo microhorizonte que corresponde a una película plásmica sumamente delgada (Casenave y Valentin, 1989). Los agregados desaparecen progresivamente, la rugosidad disminuye y la superficie encostrada es homogénea. En caso de erosión importante, se forman ranuras. Este tipo de costra aparece preferentemente en los lados de los surcos. Es la zona de producción de elementos finos que serán desplazados a lo largo de la temporada de lluvia (figura 2).

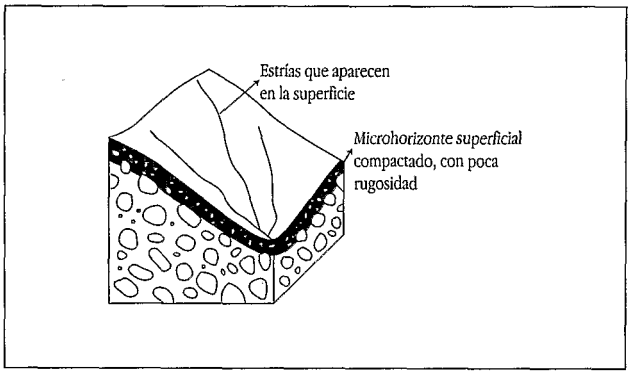


Figura 2
Costra estriada de erosión (ERO)

Costra de escurrimiento (RUI)

Se forma en las depresiones donde el escurrimiento superficial depende del micro-relieve (Casenave y Valentin, 1989). Bajo estas condiciones, las partículas en suspensión se depositan en función de su tamaño y de la velocidad del escurrimiento. Por ello, hay una alternación de material fino y grueso. La superficie es heterogénea con franjas de colores diferentes. Además, por lo general, este tipo de costra recubre otras costras estructurales anteriores, llegando a tener hasta varios centímetros de espesor (figura 3).

Costra de decantación (DEC)

Se debe a la sedimentación de las partículas en suspensión en los charcos formados en las depresiones del micro-relieve: la clasificación granulométrica, muy marcada,

con los elementos gruesos en el fondo y finos en la parte superior, favorece la formación de grietas durante la desecación (Casenave y Valentin, 1989) — figura 4 —.

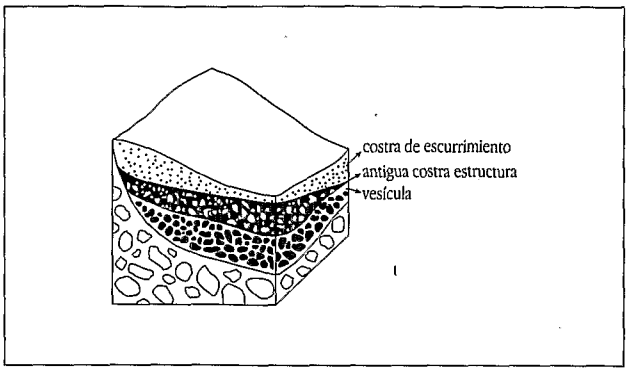


Figura 3
Costra de escurrimiento (RUI)

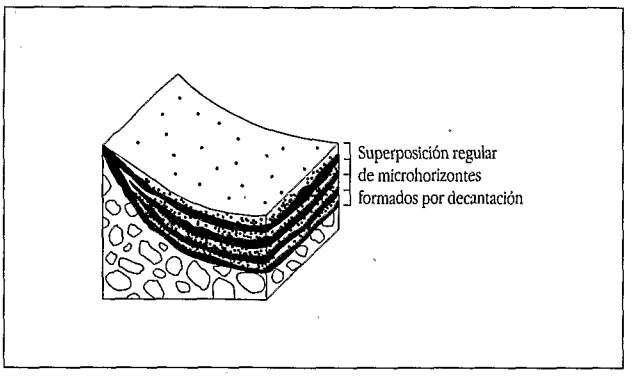


Figura 4
Costra de decantación (DEC)

Evolución del micro-relieve a lo largo de una temporada de lluvia

La diferencia de altitud de un mismo punto en fechas de medición distintas determina la evolución del relieve.

Evolución de los tipos de organización superficial a lo largo de una temporada de lluvia

A partir de la clasificación establecida anteriormente y de las observaciones de campo después de cada aguacero, se estableció un diagrama del porcentaje de cada tipo de costra a lo largo de la temporada lluviosa (figura 5).

Este diagrama es válido para cada parcela estudiada, aunque existen notables variaciones. Muestra que el proceso de encostramiento puede dividirse en varias etapas, en cada una de las cuales predomina un tipo de encostramiento y ello siempre en el mismo orden. En este caso, no se diferenciaron las costras RUI y DEC pues las dos provienen de procesos similares resultantes del transporte de sedimentos.

En la primera fase, hay la aparición de las costras estructurales, provenientes de la alteración de los agregados libres. Retomando la clasificación de Casenave y Valentin (1989), el estado superficial es de tipo C1, es decir que hay una ausencia de costras o

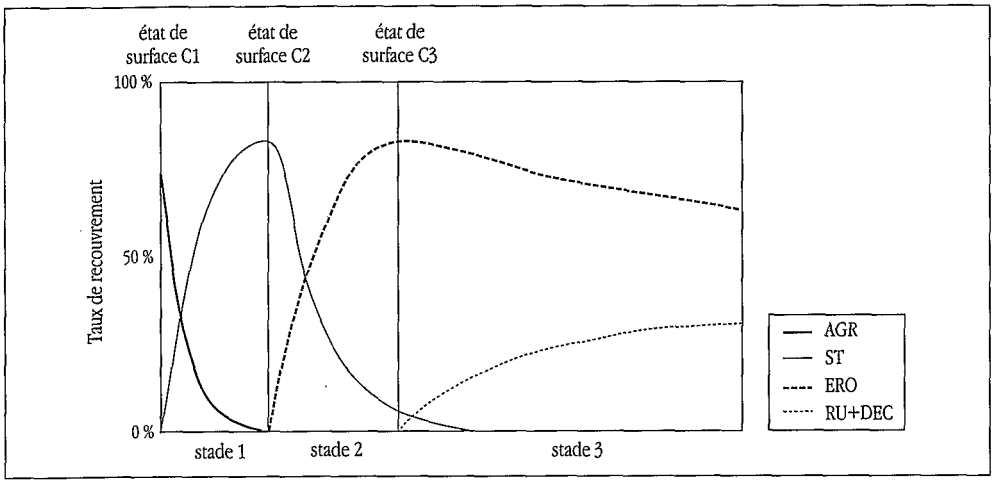


Figura 5 - Diagrama representativo de la evolución de los porcentajes de ocupación de la superficie por parte de cada tipo de encostramiento

predominan las costras estructurales. La segunda fase se inicia con la aparición de costras de erosión, resultado de la degradación de las costras estructurales. Estas últimas llegan a desaparecer casi por completo, mientras que predominan las de erosión. Se tiene entonces un estado de superficie de tipo C2 donde coexisten costras ST, ERO y RUI. La tercera y última fase empieza con la aparición de las costras de escurrimiento y de decantación y la diminución de las de erosión. El estado de la superficie es de tipo C3 donde predominan las costras RUI. Finalmente, se llega a cierto equilibrio entre estos 3 tipos de costras, siempre y cuando no ocurra algún evento excepcional ya sea de orden climático o debido a la intervención humana (labores de campo).

Índice de encostramiento

Considerando que los procesos de transformación de las costras son (teóricamente) irreversibles, se estableció un índice de encostramiento, el mismo que resulta de la suma de 3 factores, estando cada uno asociado a una de las 3 fases definidas anteriormente. Cada factor está comprendido entre 0 y 1 durante el periodo correspondiente, debiendo luego ser constante. Así, el índice I se escribe de la siguiente manera:

$$I = \underbrace{\frac{ST + ERO}{AG + ST + ERO}}_{\text{índice fase 1}} + \underbrace{\frac{ERO}{ST + ERO}}_{\text{índice fase 2}} + \underbrace{\frac{RUI + DEC}{ST + ERO}}_{\text{índice fase 3}}$$

El ciclo de cultivo se inicia con un arado de suelos secos, formando camellones profundos (40 cm) de materiales blandos, con muchos agregados. La cobertura vegetal es por supuesto inexistente hasta después el inicio de las lluvias. Este periodo recibirá el nombre de periodo 1. La escarda manual y/o con yunta, que se efectúa en julio, es

superficial y no logra romper todas las costras aparecidas desde el principio de las lluvias. Este trabajo se efectúa por lo general en suelos muy húmedos, lo que limita la formación de agregados. En ese momento, el maíz ya ha crecido un tanto (≤ 90 cm) y la cobertura vegetal representa menos del 50 %. Este periodo será llamado 2.

Observando las curvas de correlación entre I y la energía cinética acumulada (Ec cum) de las precipitaciones, se observa que todas presentan el mismo aspecto en cada periodo: están constituidas por 2 fases separadas por un valor pluviométrico bastante constante, independientemente del sitio considerado. Las pendientes obtenidas por regresión lineal entre I y Ec cum muestran que la velocidad de encostramiento es muy similar entre los diferentes sitios estudiados, aunque los valores son un tanto mayores en los aquellos localizados cerca del vertedor. Esta diferencia se debe al mayor escurrimiento en esta parte de las terrazas lo que favorece una aparición más rápida de las costras RUI y DEC. En todas las parcelas, el I tiene un valor cercano a 2, y el cúmulo de energía cinética es igual a 560 J/m^2. Después de la escarda (segundo periodo), el I crece muy poco, siendo de 10 a 15 veces menos rápido que en la fase 1. Por ello, se puede considerar que el fenómeno de encostramiento llega a un nivel de equilibrio. El I es de 2,5 en los tepetates y de casi 3 en el suelo eólico-coluvial (T7). Es interesante anotar que en el caso de T7, se observaron únicamente costras de tipo DEC en el fondo de los surcos, lo que muestra que no hay transporte de sedimentos por escurrimiento a lo largo del surco, sino solamente una desagregación de los camellones *in situ*. En cuanto a la energía cinética acumulada, el nivel es mayor en T6 (650 J/m^2) donde la cobertura vegetal es muy importante, y menor en T4 (250 J/m^2) donde ella es menor y la escarda fue más superficial e irregular.

En cuanto a los coeficientes de correlación (cuadro 5), si bien llegan casi al 100 % en el primer periodo, no son tan buenos en el segundo. Eso implica que existen otros factores que intervienen.

	Correlación I y Ec cum				Correlación I y K cum			
	Periodo 1		Periodo 2		Periodo 1		Periodo 2	
	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2
T4 parte alta	0,99	0,92	-	0,85	1,0	0,92	-	0,95
T4 parte baja	0,95	0,72	0,78	0,56	0,98	0,72	0,86	0,58
T6 parte alta	0,96	0,89	0,99	0,82	0,96	0,90	0,99	0,84
T6 parte baja	0,97	0,99	0,94	0,97	0,99	0,97	0,95	0,96
T7	0,96	0,93	-	-	0,98	0,93	-	-
promedio	0,97	0,89	0,90	0,80	0,98	0,90	0,93	0,83

Cuadro 5 - Coeficientes de correlación entre I y Ec Cum, e I y K cum por cada periodo y fase de encostramiento (Lauffer, 1996)

Añadiendo el factor cobertura vegetal a la modelización, donde K = energía cinética de la lluvia * (1 - coeficiente de cobertura vegetal), se constata que el coeficiente de regresión del primer periodo no cambia, mientras que el del segundo mejora. Por su modo de formación, la superficie de las costras de decantación (DEC) es necesariamente superior a la de las costras de escurrimiento (RUI). Por ello, cuando las costras de tipo DEC predominan sobre las RUI, el I será mayor, lo que podría explicar la disminución en

los coeficientes de correlación entre I y K cum en las segundas fases de los dos periodos. Se podría también mejorar aún más los coeficientes de regresión añadiendo otros factores como el contenido de agua del suelo y el micro-relieve.

La comparación de los datos entre T6 y T4 no muestra diferencias de comportamiento, lo que indica que la presencia de materia orgánica aplicada en la parcela T4 no cambia sus características de funcionamiento hídrico.

Comparación de la pluviometría y del micro-relieve

Se trata de medir la velocidad a la que los camellones desaparecen y correlacionarla con un valor de energía cinética acumulada. Comparando las alturas obtenidas mediante el punto cuadrado con el índice K cum que toma en cuenta la cobertura vegetal, se logran también definir 2 fases después del arado, mientras que después de la escarda, se consigue determinar una sola fase. En todos los casos, existe una correlación lineal entre estos parámetros, ya que el coeficiente de correlación está comprendido entre 0,97 y 0,99 (salvo T6b en el segundo periodo donde es de 0,90).

De la misma manera que anteriormente, se calculó el valor pluviométrico que determina el paso de la fase 1 a la fase 2 del proceso de destrucción de los camellones. Este valor es de 530 J/m^2 en las terrazas con tepetate mientras que en el caso de T7, es de 580 J/m^2. No hay diferencias de comportamiento entre T6 y T4.

El proceso de destrucción de los camellones está condicionado por los mismos factores que los que provocan el encostramiento de los suelos. También se pueden determinar 2 fases, con niveles muy similares de energía cinética acumulada, aunque un tanto inferiores. Asimismo, el tepetate cultivado ofrece una resistencia menor a la destrucción de sus camellones que el suelo eólico-coluvial de T7.

Procesos de ruptura de los camellones a nivel de una terraza

La ruptura de un camellón se inicia primeramente con la aparición de una pequeña ranura de erosión en un lado del camellón (figura 6). Luego, en una segunda fase, esa ranura se profundiza de tal forma que se abren los dos lados del camellón a nivel de la parte superior (figura 7). En una tercera fase, cuando el nivel de conexión entre dos surcos se encuentra unos centímetros por encima de su fondo, se forma una brecha del camellón que se amplía con cada escurrimiento (figura 8). La última fase corresponde al aplanamiento del fondo de la brecha debido a los sedimentos arrastrados. Se amplia aún más el ancho de la brecha, y el camellón deja de ser por completo un obstáculo para la circulación del agua (figura 9).

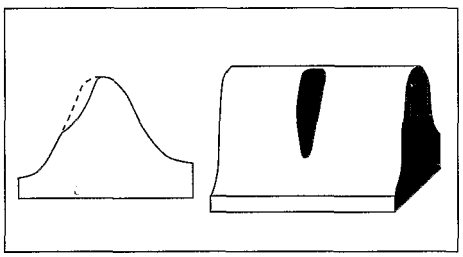


Figura 6 - Primera fase de degradación de un camellón

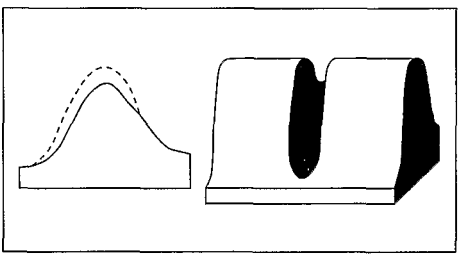


Figura 7 - Segunda fase de degradación de un camellón

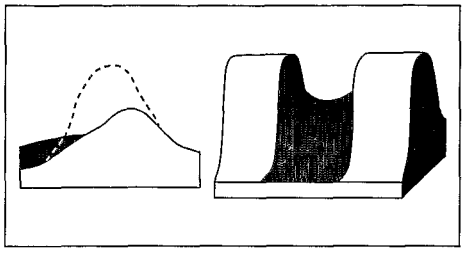


Figura 8 - Tercera fase de degradación de un camellón

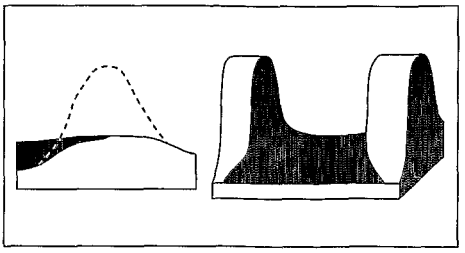


Figura 9 - Cuarta fase de degradación de un camellón

Es importante anotar que las dos primeras fases del proceso de ruptura del camellón reponden a ciertos factores, mientras que las otras dos se deben a otros procesos. En el primer caso, la aparición de una ranura proviene de la conjunción de una presión hídrica localmente amplificada y una debilidad del camellón. Es notable el papel del maíz a este respecto. La conformación, en esta planta, de las hojas en forma de embudo determina una concentración del agua de las precipitaciones hacia el tallo, de tal forma que al pie de la planta, se escurren grandes cantidades de agua. Es el fenómeno de *stemflow* que afecta a la zona, discontinua por naturaleza, entre las raíces y el suelo. Este proceso no se observó en el cultivo de haba, lo que muestra que este protege mucho más y mejor al suelo de la agresión de las lluvias.

Por otro lado, se pudo constatar que el trabajo de escarda no es homogéneo. En muchas partes, los camellones fueron levantados de manera muy superficial, limitándose el arado a empujar la tierra superficialmente sin que se logre conformar realmente un camellón. El resultado es que muchas veces se forma una depresión al pie del maíz, donde se acumula el agua, tanto la caída directamente en ese lugar, como la proveniente del *stemflow*. La impermeabilización del fondo de estas micro-depresiones mediante antiguas costras de tipo DEC o RUI, amplifica la presión hídrica en sus lados, los cuales son agredidos al mismo tiempo por el escurrimiento que se forma en el fondo del surco. En estas condiciones, el tiempo transcurrido hasta la ruptura es muy corto, y basta con una lluvia para ella se produzca.

En las otras dos fases, el factor principal de la ruptura y ampliación de la brecha del camellón es el escurrimiento que se concentra en el fondo del surco y que se acumula hacia la parte baja de la terraza. Una vez abierto un camellón, se forma un depósito de sedimentos que tapa la otra parte del surco, de tal forma que el escurrimiento es desviado directamente hacia el surco aguas abajo. Obviamente, este segundo surco, al recibir una mayor cantidad de agua, genera una presión en el camellón aguas abajo que no tarda en romperse. Así, se amplia el fenómeno, generándose una reacción en cadena. En realidad lo catastrófico es esa reacción pues es a partir de ese momento cuando se generan grandes cantidades de escurrimientos que provocan importantes movimientos de tierra y daños a las plantas al exponer sus raíces al aire y favorecer su posible caída. Estos dos procesos ocurren más con el maíz que con el haba, ya que el sistema de raíces de estos cultivos es muy distinto.

Dinámica de rupturas de los camellones a nivel de las terrazas

La ruptura de los camellones empezó a producirse después de la escarda, iniciándose en la T2 y T3, para luego afectar, mucho más tarde, a las demás terrazas. En todos

los casos, ocurrió cuando la mayor parte de los camellones estaban al final de la fase 2 del proceso de ruptura. En T2 y T3, la red de interconexión entre surcos se desarrolló bajo una forma más ramificada, con numerosas rupturas de un ancho de aproximadamente 10 cm, mientras que en las otras parcelas se producía una sola ruptura pero de un ancho mucho mayor (20 a 30 cm). Si bien este segundo caso es más espectacular, finalmente es el más fácil de controlar y el que menos arrastre genera. Además, al parecer, a nivel del micro-relieve, las terrazas T2 y T3 presentan más micro-depresiones a su largo y ancho que las demás. Tales depresiones provocan una concentración de agua en varias partes, lo que favorece un mayor número de rupturas pero de un tamaño menor. Es importante señalar también que el monocultivo de maíz en T3 genera, debido a los procesos de *stemflow*, una mayor degradación de los camellones. El resultado se refleja claramente en las tasas de escurrimiento y de arrastre, más elevadas en esta terraza. En T4, las pérdidas de tierra se producen poco tiempo después de la aparición de las ranuras y de la formación de las costras de tipo RUI. En T5 y T6, se observan los mismos fenómenos pero con una intensidad menor y con un desfase mayor entre la aparición de las costras RUI y las pérdidas de tierra.

La pérdida de sedimentos está relacionada no solamente con las tasas de escurrimiento sino también con la capacidad de este de transportarlos. Se pudo observar, a veces, durante algunos aguaceros muy breves pero sumamente intensos, que se supera la capacidad de almacenamiento de los camellones. El agua acumulada pasa por encima de ellos pero sin que se produzcan rupturas. En las partes bajas de las terrazas, se acumulan sedimentos finos, rellenando los surcos y formando costras de decantación (DEC) bastante impermeables. Es en esos momentos cuando empieza la exportación de sedimentos, aunque los camellones presenten pocas rupturas. Esta dinámica es la que prevalece desde la siembra hasta la escarda. Es también la única que se pudo observar en T7.

El papel esencial de los tipos de reorganización superficial en el proceso global de erosión que afecta a las parcelas de tepetate cultivado es la impermeabilización de la superficie del suelo. Es a partir de la formación de las costras de escurrimiento (RUI) y del recubrimiento por parte de ellas de una gran parte de la superficie de los surcos y camellones que se establece un régimen de escurrimiento suficiente como para dañar a estos últimos. Estos procesos son más acentuados en las plantas de maíz (por la densidad de siembra y su altura). Después, los tipos de organización superficial varían poco y los principales factores de erosión, además de la agresividad de las lluvias, *son aquellos que contribuyen al desarrollo de una red hídrica superficial. En todo caso, el cierre de la porosidad superficial durante el encostramiento parece ser el factor que da inicio la erosión.

CONCLUSIONES

El proceso de reorganización superficial es común a todas las parcelas de tepetate cultivado. Retomando la clasificación de Casenave y Valentin, se observaron 4 tipos de encostramiento, que aparecen siempre según un mismo patrón y una misma secuencia cronológica. A la formación de costras estructurales le sigue la de las costras de erosión, y luego aquella de las de escurrimiento y de decantación. La comparación de las mediciones de la superficie ocupada por cada tipo de reorganización superficial con las del micro-relieve muestra que existen estrechas relaciones entre estos dos parámetros.

La energía cinética de las lluvias es el factor principal en la formación y destrucción tanto de los tipos de reorganización superficial como de los agregados, en la evolución del micro-relieve y en la desaparición de los camellones y rellenos de los surcos. Así, el

valor de 560 J/m^2 de energía cinética acumulada marca para los tepetates la aparición de las costras de decantación y escurrimiento que impermeabilizan el fondo de los surcos. Por ello, a partir de este momento, el escurrimiento es mayor a nivel de la terraza, lo que genera un mayor número de camellones destruidos, especialmente en la parte baja, zona donde se acumula el agua.

La cobertura vegetal permite proteger el suelo en la medida en que las hojas interceptan la energía de las gotas de lluvia. Sin embargo, si bien el haba es muy eficaz en este aspecto, el maíz, al concentrar el agua a nivel de la caña (*stemflow*) provoca la destrucción de los camellones, en particular si el trabajo de escarda no ha sido realizado adecuadamente. Por ello, T3, cultivada con maíz como monocultivo, presenta mayores rupturas de camellones y mayores escurrimientos y arrastres de sedimentos. Así, se recomienda sembrar siempre la asociación maíz-haba.

El trabajo del suelo puede ser muy positivo, en particular la escarda que, al romper las costras, restablece la permeabilidad del suelo, aunque puede también ser nefasta. Una escarda mal realizada, con suelos muy húmedos, al no destruir correctamente las costras y no formar buenos camellones, pero sí quitar la protección que ofrecen las adventicias, va a aumentar el escurrimiento y los procesos de destrucción de los camellones fragilizados debido a ese trabajo. Una recomendación consistiría en efectuar 2 escardas en vez de una para destruir las costras y volver a formar los camellones alterados. La solución de sembrar utilizando la técnica del contreo (fondo de los surcos cerrado por un pequeño bordo formando así microcuencas en los surcos), al disminuir la cantidad de agua que puede escurrirse a lo largo de los surcos, también podría disminuir la degradación de los camellones.

Los resultados obtenidos en T4, terraza donde se aplicó estiércol en lugar de fertilizantes químicos, son muy similares a los obtenidos en las demás terrazas. Así, se concluye que, en las condiciones de esta experimentación, la materia orgánica no tiene efecto alguno en los agregados, la velocidad o los tipos de encostramiento, ni en la destrucción de los camellones.

El hecho de tomar en cuenta los diferentes tipos de organización superficial así como su dinámica permite no solamente entender los procesos erosivos sino definir estrategias para limitarlos. Por ello, es indispensable seguir las recomendaciones aquí realizadas para asegurar una eficaz recuperación de los tepetates recién roturados. Además, en condiciones climáticas distintas, más agresivas, sería necesario realizar trabajos de investigación orientados por los patrones aquí adoptados.

Referencias bibliográficas

BAÉZ, A.; ASCENCIO, E.; PRAT, C.; MARQUÉZ, A., 1997: *Análisis del comportamiento de cultivos en tepetate t3 incorporado a la agricultura pluvial (1993 a 1995), Texcoco, México*, en este volumen.

CASENAVE, A.; VALENTIN, C., 1989: *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*, ORSTOM, Paris, France, 240 p.

JANEAU, J.-L.; JEROME, G., 1992: Evolución estructural de la superficie de suelos con tepetate, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México.

JEROME, G., 1991: *Étude des réorganisations superficielles sous pluies naturelles sur sol volcanique induré*, tepetate, *dans la vallée du fleuve Texcoco au Mexique*, Mémoire de fin d'études, ISTOM, Le Havre, France.

LAUFFER, M., 1996: *Facteurs et processus de réorganisations superficielles sur* tepetates *cultivés. Cuenca del río Texcoco, Edomex (Mexique)*, Mémoire de maîtrise ISTOM, Paris, France, 93 p.

LE BISSONNAIS, Y., 1988: *Analyses des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action de la pluie*, Tesis INRA, Paris, France, 196 p.

LEROUX, Y., 1994: *Étude des réorganisations superficielles de différentes parcelles de* tepetate *cultivées sur un versant nord-est de la vallée de Mexico, au Mexique*, Mémoire de maîtrise, ISTOM, París, France, 77 p.

PEÑA, D.; ZEBROWSKI, C., 1992: *Estudio de los suelos volcánicos endurecidos (tepetates) de las cuencas de México y Tlaxcala (México). Informe del mapa morfopedológico de la vertiente occidental de la Sierra Nevada*, anexo al informe final, Contrato CCE-ORSTOM N° TS2-0212, 101 p.

PRAT, C. 1997: *Análisis de las características de las precipitaciones de 1992 a 1995 en el área experimental de San Miguel Tlaixpan (Texcoco, México)*, en este volumen.

RUIZ F., J. F., 1983: *Les micro-organisations pelliculaires superficielles formées sous pluie simulée sur sols ferralitiques de savanes (centre nord de Côte d'Ivoire). Comportement hydrodynamique et mécanique de ces pellicules de battance en relation avec la texture, la couverture du sol et la levée du riz pluvial*, Thèse INA-PG, ENA (Paris, France) et UACh, (Texcoco, México), 167 p.

Síntesis del tema 5
Manejo agrícola y problemas socioeconómicos

Rubén Peñaloza, Iván Álvarez P.

INTRODUCCIÓN

La tarea de sintetizar los conceptos, ideas, experiencias y resultados de los diversos trabajos presentados sobre la temática del manejo agrícola y los problemas socioeconómicos que se originan en los suelos volcánicos endurecidos, no solo es compleja, también implica un riesgo.

Este riesgo está ligado fundamentalmente a la posibilidad, muy cierta además, de no hacerlo adecuadamente, y por lo tanto de no incorporar aquello que sus autores consideran relevante o de mayor importancia. Es también un riesgo, por cuanto cabe la opción de un sesgo personal, crítico, que propenda a desvirtuar el énfasis de los autores en algunos aspectos de índole socioeconómico o étnico-cultural, como sustento de sus experiencias técnicas o motivaciones ideológicas.

Con todo y aun considerando que los trabajos son presentados *in extenso* en las memorias del simposio, se estima que es necesario hacer una presentación de la temática del taller para dar paso después a una escueta síntesis de los trabajos por temas, y concluir con algunas consideraciones de índole general.

LOS TRABAJOS PRESENTADOS

Los 6 trabajos presentados hacen especial referencia al uso, a la recuperación y a la productividad de los suelos volcánicos endurecidos, tanto en México como en el Ecuador; los altos costos de rehabilitación de estos suelos y su incorporación a procesos productivos, de autoconsumo en una gran mayoría, son tratados con casos muy ilustrativos.

Tres de los seis trabajos exponen los resultados de encuestas realizadas en el ámbito campesino, en medios caracterizados por la presencia de suelos volcánicos endurecidos (Muñoz y Navarro, Prat *et al.*, Zebrowski y Vicuña). Dos se refieren a experiencias de rehabilitación de la cangahua en el Ecuador, pero en condiciones diferentes: uno (Cangás y Trujillo) trata de la rehabilitación realizada por un agricultor con sus propios medios, y el otro (Terán) menciona casos ejemplares de sistemas de organización social y los buenos resultados obtenidos con trabajos participativos o comunitarios (mingas) donde tanto la familia completa o simplemente las mujeres y sus hijos colaboran en las pesadas faenas agrícolas ayudando a miembros de la comuna en áreas campesinas. Finalmente, Zebrowski y Sánchez exponen los costos de rehabilitación de los suelos volcánicos endurecidos en el Ecuador y en México.

APORTES DE LAS PRESENTACIONES

Costos de rehabilitación

Zebrowski y Sánchez analizan diferentes métodos de conservación y recuperación del tepetate y de la cangahua para dedicarlos a la agricultura y forestación.

Los autores recuerdan los diferentes pasos para la rehabilitación de estos suelos: roturación (manual y mecanizada), corrección de las carencias químicas y protección de los suelos ya incorporados al manejo agrícola, mediante la aplicación de medidas anti-erosivas.

Respecto a los métodos manuales utilizados en la rehabilitación de suelos cangahuosos, los autores señalan que se trata de métodos prácticamente abandonados en México, pero que todavía están vigentes y son utilizados masivamente en el Ecuador por los campesinos, sobre todo por aquellos de escasos recursos.

En cuanto a los métodos mecanizados, son de uso común en México, pero en el Ecuador utilizados solamente por algunos agricultores. Se mencionan las diferentes maquinarias que podrían emplearse, así como las ventajas y desventajas de cada una de ellas. En lo que se refiere a los costos, se entrega una detallada información respecto a valores de las diversas formas de roturación manual y mecanizada y a los correspondientes rendimientos productivos.

Las medidas anti-erosivas tendientes a proteger los suelos están difundidas de distinta manera en cada unos de los países: en México son mencionadas como de conocimiento y aplicación general, en el Ecuador hasta hace poco tiempo no eran practicadas por los campesinos. Entre ellas se pueden señalar muros de contención (conocidos como «pircas»), que retienen la tierra y que con el tiempo permiten la formación de terrazas. En México se usan las terrazas planas que son realizadas al momento del subsoleo.

Se advierte que debido a su elevado costo de elaboración (métodos mecanizados), la gran mayoría de ellas son realizadas únicamente en el marco de algún programa institucional gubernamental. Cuando la rehabilitación es efectuada por campesinos, se hace apenas un subsoleo y se edifica un borde de tierra al pie de la parcela.

Sin embargo, todas las prácticas de conservación son necesarias para una recuperación duradera de estas formaciones.

En lo que se refiere a un mejoramiento de las propiedades nutritivas de estos suelos, se circunscribe a la creación de un reserva de materia orgánica (importantes aportes en forma de abono), que conlleve un mejoramiento de la estructura del suelo y con ello de la porosidad del mismo.

En lo que respecta a prácticas de reforestación en cangahua, en el Ecuador las pruebas se realizaron básicamente con eucalipto por parte del MAG, mientras que en México la reforestación de las zonas de tepetate implicó la aplicación de técnicas variadas y la utilización de diversas especies arbóreas como pino, eucalipto, ciprés, fresno, etc.

Los costos de reforestación varían de acuerdo al método utilizado: formación de terrazas y subsoleo con maquinaria; preparación del suelo, producción y plantación.

Caracterización del medio campesino

Los tres trabajos correspondientes fueron realizados en el marco del segundo contrato CEE/ORSTOM, mediante encuestas en el medio campesino caracterizado por la presencia de suelos volcánicos endurecidos, pero con metodologías diferentes.

En México, Muñoz y Navarro prosiguieron el estudio ya iniciado durante el primer contrato en el ejido de Tlalpan. En ese municipio realizaron, en 1996, un estudio de los

sistemas de producción (SEF) de 32 agricultores. Caracterizan los SEF tomando en cuenta los medios de producción, los tipos de cultivos practicados tanto en suelo agrícola como en tepetate, el destino de la producción y la rentabilidad de los cultivos. Observan una buena correlación entre el tamaño de las explotaciones y estos factores.

Los pequeños agricultores (con superficies menores a 5 ha) cultivan el maíz para autoconsumo. No es un cultivo rentable y tienen que conseguir ingresos extra agrícolas para sobrevivir.

Quienes tienen propiedades más grandes, con medios de producción a veces importantes, a pesar de cultivar también el maíz para autoconsumo, se dedican a cultivos comerciales (trigo) y practican una agricultura más rentable.

La caracterización del medio rural se extendió a otras comunidades de México. Así, Prat *et al.* estudiaron los sistemas de producción de 4 comunidades del eje neovolcánico según la metodología de la escuela francesa Mazoyer-Dufumier. Los resultados son muy similares a los obtenidos por Muñoz y Navarro en Tlalpan. El análisis de los sistemas de producción permitió clasificar las unidades de producción (UP) en pequeñas explotaciones dedicadas a cultivos de autoconsumo (maíz) y en explotaciones, pequeñas o grandes, orientadas hacia especulaciones rentables (ya sea ganadería o cultivos comerciales). Las primeras, que representan alrededor del 80 % de las UP, están por debajo del nivel de supervivencia y necesitan el aporte de ingresos extra agrícolas.

En el Ecuador, dada la limitada extensión de los suelos de cangahua (80.000 ha) en comparación con la de los tepetates en México, fue posible realizar encuestas en toda la zona que presenta ese tipo de suelos (Zebrowski y Vicuña).

Las zonas encuestadas fueron seleccionadas a partir de mapas edafológicos de las regiones en las que se encuentran suelos con cangahua. El correspondiente cuestionario aborda diferentes temas entre los que se pueden mencionar: estructura familiar, tenencia y origen de la tierra, superficie y composición de las UP (naturaleza de las tierras, equipos, presencia de animales) y los diferentes cultivos realizados (modos de cultivo, rendimiento y destino de la producción).

En las zonas donde la cangahua está presente a una profundidad reducida, el medio rural se caracteriza por:

- un minifundio típico: el 82,3 % de todas la UP encuestadas posee menos de 3 ha y el 55 % menos de 1 ha;
- un bajo nivel de instrucción de los agricultores, sobre todo en el medio indígena;
- medios de producción casi inexistentes salvo en pocas UP de gran tamaño;
- una limitada productividad agrícola debida, entre otras cosas, a prácticas de cultivo deficientes. Sin embargo, es importante destacar lo que afirman Zebrowski y Vicuña respecto a la incorporación de abono (práctica muy difundida), indicando que del total de los agricultores, aproximadamente entre un 74 y un 92 % la realiza (dependiendo de los cultivos). No ocurre lo mismo con el empleo de fertilizantes y tratamientos químicos (herbicidas, fungicidas), mucho menos frecuente (excepto en el caso de la papa).

En estas condiciones, la producción está destinada principalmente al autoconsumo, pero incluso en mayor medida que en México, el campesino debe recurrir a ingresos externos para vivir. La doble actividad es característica de los agricultores que poseen menos de 1 ha. En efecto, con ciertas raras excepciones, en tales explotaciones, no se alcanzaría el umbral de reproductividad económica, lo que explica la migración, temporal e incluso a veces definitiva, de los campesinos.

La incorporación de las tierras erosionadas a la agricultura es entonces primordial en estas regiones de minifundio, a fin de aumentar la superficie agrícola útil. Del 69 % de la totalidad de UP encuestadas, el 86,8 % ha recuperado tales suelos, básicamente en forma manual por falta de conocimientos y sobre todo de medios económicos para realizar una preparación adecuada del suelo que incluya un subsoleo profundo.

Experiencias de rehabilitación

Mientras que en México la rehabilitación del tepetate es realizada hoy en día mecánicamente, la recuperación de la cangahua, debido a sus elevados costos y al bajo nivel económico de la mayoría de campesinos, se efectúa manualmente, salvo en unos pocos casos. Así, Cangás y Trujillo exponen en su trabajo el caso de una rehabilitación realizada mecánicamente por un campesino con suficientes recursos económicos.

Los autores presentan la manera y el método más rentables de recuperar estos suelos cangahuosos, señalando los diferentes tipos de maquinarias a utilizarse, el costo y el tiempo que se necesita para la rehabilitación de 1 ha de cangahua.

Además, presentan un programa de cultivos y de mezclas forrajeras a ser practicados, una vez recuperados esos suelos cangahuosos. Paralelamente, señalan tipos de abonos y dosis de aplicación. Obtienen resultados interesantes en términos de rendimientos.

El trabajo presentado por Terán expone la rehabilitación de zonas cangahuosas en el marco de un proyecto desarrollado por una ONG. Dicha rehabilitación ha sido realizada en el marco de trabajos comunitarios (mingas), con roturación manual en un una primera fase y mecanizada en una segunda fase. Es interesante anotar que en este proyecto se aplicaron medidas anti-erosivas (lo que es raro en el Ecuador) consistentes en terrazas de formación progresiva, las cuales, según Zebrowski y Sánchez, tienen un costo mucho menor que las terrazas planas.

El proceso de recuperación mecanizada de la cangahua en este estudio comprende varias etapas: recuperación primaria (roturación, pulverización y obras de protección y conservación), y en forma paralela, aporte de los elementos nutritivos esenciales para el suelo, mediante la aplicación de abonos verdes, abono orgánico y una rotación-mezcla de cultivos.

El proyecto también aborda algunos problemas sociales de la comunidad como: salud, mujer, organización, infraestructura, etc.

CONCLUSIONES

La problemática en torno a este tema del simposio fue abordada con algunos trabajos de gran calidad, tanto por los resultados de las experiencias realizadas y por las encuestas que ilustran la precaria condición socio-cultural y económico-social de las comunidades que viven (o tratan de hacerlo....) en sectores de condiciones climáticas y edáficas extremas, así como por los decidores costos y cifras que implica la recuperación de los suelos endurecidos y degradados y por la descripción de las estrategias productivas y formas como los grupos étnicos locales enfrentan su dura realidad.

Más allá de los resultados y experiencias singulares que se presentan y por ende de las propias conclusiones de cada trabajo, se puede intentar configurar una suerte de conclusión global, partiendo de las siguientes premisas:

- Los tepetates y cangahuas (suelos endurecidos) son la consecuencia de procesos antiguos de uso inadecuado que el hombre ha dado a los suelos volcánicos en diferentes partes de América, afectando principalmente a las etnias locales en ciertas zonas de México y del Ecuador.

- Estas comunidades indígenas que, antes de la llegada de europeos al continente, eran autosuficientes y desarrollaban sus propias culturas y métodos de trabajar la tierra, fueron paulatina y crecientemente confinadas a sectores extremos (altos) por la introducción de animales y cultivos que coparon sus tierras y asentamientos originales.
- Este proceso de aislamiento (confinamiento) de las etnias locales terminó por conculcar no solo sus opciones de desarrollo, sino también sus valores culturales y, en definitiva, su arraigo ancestral a la tierra.
- Aquellas comunidades que aún se mantienen en diferentes áreas de suelos endurecidos, llevan una existencia precaria y raramente subsisten con lo que producen, debiendo migrar o salir esporádicamente de sus terrenos para obtener dinero en trabajos marginales.
- Diversos trabajos de investigadores y profesionales del agro han probado sistemas y métodos para rehabilitar los suelos degradados de estas comunidades campesinas. Se ha demostrado que técnicamente es posible revertir los procesos de degradación edáfica y hacer a los suelos productivamente utilizables, aun cuando los costos de los métodos de recuperación son altos y de largo retorno.
- Los grupos familiares de las comunidades y etnias locales poseen escasa superficie de terreno y su marginalidad socioeconómica les impide acceder a los sistemas actuales de créditos y préstamos de entidades bancarias o instituciones públicas.
- Los casos «exitosos» de sectores campesinos que reciben colaboración de ONG, de fundaciones o de esporádicos programas gubernamentales o bilaterales (internacionales), muestran capacidad de organización, elemento vital aún de las comunidades, para superar parcialmente su desmedrada situación.
- La familia, el grupo, la tribu o la comunidad campesina aún mantiene muchas de sus tradiciones y son los más genuinos representantes de cada región o nación, con ancestros nativos. Mantienen su apego a la tierra y han demostrado que pueden sobreponerse a su adversidad histórica, cuando tienen el apoyo adecuado y suficiente.

Con base en estas premisas y solo en función de las situaciones abordadas en este taller, sin pretender ningún alcance o connotación ideológica, se pueden inferir algunas conclusiones que emanan tanto de los trabajos presentados como de las discusiones consiguientes:

1. Se ha demostrado que la recuperación de los suelos erosionados, degradados y endurecidos, es factible, a un costo financiero alto pero con un costo social bajo y tranquilizador, si el gobierno (Estado) lo considera dentro de las prioridades de desarrollo nacional, tales como lo son la educación, la salud y los servicios (urbanos y comunales). Solo con un programa permanente y de largo aliento se podrá integrar a la economía de cada país este segmento de la población que representa las raíces mismas de cada pueblo.
2. La marginalidad actual de la población rural e indígena no es la resultante de un plan o esquema previamente formulado, simplemente obedece a un largo y doloroso proceso de adaptación a un sistema individual de tenencia o usufructo de la tierra, y no comunal como era la tradición.
3. Ningún gobierno, partido o clase social es necesariamente responsable de lo sucedido, pero sí lo serán los actuales si no asumen como suya la urgente tarea de otorgar recursos y asistencia técnica para que sus poblaciones indígenas sean consideradas ciudadanos y se integren al país al que pertenecen y al que dieron su origen.
4. Lo anterior implica que la problemática agrícola considerada en el taller, más que una solución técnica o económica, requiere una voluntad social y una decisión política para ser resuelta. Esta no tiene por qué ser socialista o caritativa, simplemente tiene que ser una opción de vida, digna y humana

Los costos de rehabilitación de los suelos volcánicos endurecidos

Claude ZEBROWSKI, Benjamín SÁNCHEZ

Abstract

Reclamation and conservation methods for agriculture and reforestation in indurated and eroded volcanic soils are reported. Mechanized methods used especially in Mexico, have lower costs than manual methods still practised in Ecuador. In that country, the realization of progressive development terraces has lower costs than flat terraces built simultaneously to the sub-soiling.

Some reforestation methods used in Mexico have a cost similar to those of reforestation in non indurated soils of Ecuador.

Keywords: *Ecuador - Mexico* - Tepetate - Cangahua - *Reclamation Costs*

INTRODUCCIÓN

La rehabilitación de los suelos volcánicos erosionados y endurecidos, conocidos con el nombre de tepetate en México y cangahua o cancahua en el Ecuador, es una práctica común en los dos países, en zonas de fuerte densidad poblacional.

La incorporación de estas formaciones a la agricultura se ha realizado de manera tradicional, una vez roturado manualmente el horizonte endurecido, aproximadamente hasta los años 1970. A fines de la década de los 1960, se introdujeron los métodos mecanizados, que se extendieron rápidamente en México, y muy poco en el Ecuador, donde los métodos tradicionales siguen vigentes. Es igualmente a partir de ese período cuando surgen algunos programas de reforestación de las zonas erosionadas y endurecidas.

Algunos autores han tratado de calcular los costos de rehabilitación de estas formaciones. En México, Sánchez (1992) expuso los costos de reforestación, mientras Calva Orduño (1992) presentaba los costos de roturación mecanizada del tepetate. Navarro y Zebrowski (1994) hicieron una primera síntesis comparativa, entre el Ecuador y México, de los costos de rehabilitación de estas tierras.

Este artículo tiene por objeto recordar brevemente los diferentes métodos utilizados hoy en día en los dos países, y proporcionar, en el caso de cada método, los costos actualizados de rehabilitación, tanto para la incorporación a la agricultura como para la reforestación.

LA INCORPORACIÓN A LA AGRICULTURA DE LOS SUELOS EROSIONADOS Y ENDURECIDOS

La incorporación a la agricultura implica la roturación del horizonte endurecido hasta la obtención de agregados lo suficientemente pequeños como para permitir una

buena germinación de las plantas, así como la suplencia de carencias químicas, actualmente muy conocidas, mediante el aporte de fósforo y nitrógeno. Sin embargo, es necesario proteger los suelos así incorporados a la agricultura, por lo que se deben tomar además medidas anti-erosivas.

La roturación de los horizontes endurecidos

La roturación mediante explosivos ya no se realiza actualmente, pues es delicada y costosa. Solo se utilizan métodos manuales y mecanizados.

Métodos manuales

Estos métodos han sido prácticamente abandonados en México; en el Ecuador todavía son utilizados de manera general por los campesinos de escasos recursos económicos.

La roturación se practica durante la estación lluviosa, período en el cual la cangahua, húmeda, es más fácil de trabajar. Se rompe la cangahua con la ayuda de un pico, a una profundidad de 20 a 30 cm. El campesino deja luego «podrir» los bloques de cangahua por algunos meses, agrega generalmente pequeñas cantidades de abono proveniente de su ganado, y lo mezcla con el suelo, rompiendo los bloques de cangahua resultantes de la roturación, antes de efectuar la siembra. Esta preparación del suelo es generalmente ruda y poco propicia para un buen crecimiento de las plantas.

Métodos mecanizados

Estos métodos son de uso común en México, pero en el Ecuador solo son empleados por algunos agricultores. Sin embargo, han sido aplicados en el marco de algunos proyectos gubernamentales de incorporación de la cangahua a la agricultura entre los años 1970 y 1975, y están siendo nuevamente empleados en el marco de un proyecto realizado por la Central Ecuatoriana de Servicios Agrícolas (CESA) para la incorporación a la agricultura de 600 ha de cangahua.

La roturación es realizada por subsoleo cruzado mediante un buldózer. La potencia de este último debe ser suficiente como para que el trabajo sea efectivo. Sánchez (1992) recomienda una potencia equivalente a la de los Caterpillar de tipo D4 a D8. Sin embargo, el D4 es un tanto débil para los suelos de gran dureza y no puede trabajar en pendientes superiores al 30 por ciento. Así, en México, Maquinaria para las Tierras del Estado de Tlaxcala (MATET) utiliza sobre todo modelos D5 y D7, y en el Ecuador, los trabajos actualmente en curso se realizan con buldózers de potencia por lo menos igual a la del D6, generalmente equivalentes al D7 o D8.

La longitud de los dientes es de 80 cm, lo que conduce a una profundidad efectiva de subsoleo de 40 a 50 cm. Aunque es más fácil realizar el subsoleo en estado húmedo, la fracturación de los horizontes endurecidos es más completa en estado seco.

Los bloques resultantes del subsoleo son pulverizados aplicando varias veces un pulverizador de discos. El tamaño óptimo final de los agregados es en sí difícil de definir. Debe ser tal que la retención de agua sea máxima y la erosión mínima. Martínez y García (1990) mostraron que un tamaño promedio de agregados de tepetate de 3 a 4 mm, garantiza una buena capacidad de retención de agua, una estabilidad estructural máxima y una erodabilidad mínima. Sin embargo, Leroux y Janeau (1996) recomiendan un tamaño mayor de agregados, ya que estos se desintegran con el tiempo. Jérôme (1992) observó en efecto una fundición progresiva de los agregados de 4 mm o menos, que propicia el endurecimiento superficial, la escorrentía y la erosión. Custode *et al.* (1992) señalan

algunas pérdidas de tierra que alcanzan hasta 92 t/ha en parcelas de cangahua subsoleadas y desintegradas, con una pendiente del 20 por ciento. Es necesario entonces tomar medidas anti-erosivas.

Medidas anti-erosivas

Los métodos de conservación utilizados consisten en terrazas planas o de formación lenta, las mismas que están difundidas de diferente manera en el Ecuador y en México.

Hasta hace poco, las medidas anti-erosivas eran poco comunes en el Ecuador. No eran practicadas por los campesinos, ni aun por los pocos programas oficiales de rehabilitación de cangahua. Fueron difundidas durante los años 1980 en el marco de algunos programas de conservación, sobre todo el Programa Nacional de Conservación de Suelos (PRONACOS), el Proyecto de Manejo y Uso Sostenible de Tierras Andinas (PROMUSTA) y el Proyecto de Conservación de Suelos y Sistemas Agro-silvo-pastorales (PROCOSA). Las terrazas son por lo general realizadas manualmente y los bloques de cangahua extraídos durante el proceso se colocan en forma de muro de contención de la terraza.

Algunas pruebas de terrazas de formación lenta fueron realizadas por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), y posteriormente en el marco del proyecto ORSTOM-CEE de rehabilitación de los suelos volcánicos endurecidos. Esta técnica es interesante (De Noni *et al.*, 1992, 1996) en lo que se refiere a la protección de la cangahua incorporada a la agricultura. Es menos costosa que la construcción de terrazas planas. La CESA emplea actualmente este método en su programa de rehabilitación de zonas erosionadas. Los bloques de cangahua sacados a la superficie en el momento del subsoleo son dispuestos en forma de muretes («pircas») que retienen la tierra, la misma que al acumularse con el tiempo forma terrazas.

En México, las terrazas son planas y se realizan en el momento del subsoleo. Se acostumbra limitarlas con bordes de tierra levantados con la lámina de un buldózer. Debido al elevado costo de su realización, las terrazas se utilizan por lo general únicamente en el marco de programas en los que alguna institución oficial —como MATET o el Plan del lago de Texcoco (CLT)— es el maestro de obras. El campesino que financia íntegramente la roturación de su parcela de tepetate, se contenta generalmente con efectuar un subsoleo y edificar un borde de tierra en su base, como único medio de protección contra la erosión.

Mejoramiento de las propiedades químicas

Creación de una reserva de materia orgánica

La desintegración de las partículas de tierra conlleva con el tiempo una compactación y por lo tanto una disminución de la porosidad y de la retención de agua creadas artificialmente por el subsoleo. Solo la creación de una estructura mediante aporte de materia orgánica permite evitar estos problemas. El aporte de elevadas dosis de materia orgánica en forma de abono es generalmente incompatible con la realidad del mundo campesino latinoamericano. El abono orgánico, disponible en cantidades reducidas, es costoso y su aplicación se realiza en dosis muy limitadas. Tanto en México como en el Ecuador, únicamente los terrenos situados cerca de los lugares de residencia se benefician de él. En cambio, algunos agricultores en el estado de Tlaxcala (México) utilizan las pajas y en algunas regiones del Ecuador el humus de lombrices.

Aporte de fertilizantes

Experimentos realizados en laboratorio (Etchevers *et al.*, 1992) mostraron que solo el nitrógeno y el fósforo son los factores que limitan la integración del tepetate a la agricultura. Estas carencias se confirmaron en el Ecuador (Cisneros *et al.*, 1996).

Las pruebas realizadas en el campo en México por Márquez *et al.* (1992) muestran que dosis de 60 U de fósforo y 100 U de nitrógeno son generalmente suficientes para obtener rendimientos aceptables. Los agricultores, tanto en el Ecuador como en México, no toman en consideración las propiedades de la cangahua o del tepetate y fertilizan los cultivos en estas formaciones de la misma manera que en otros suelos agrícolas. Los aportes son a menudo suficientes, a veces demasiado elevados en México y casi siempre demasiado reducidos o inexistentes en el Ecuador.

LA REFORESTACIÓN DE LOS SUELOS VOLCÁNICOS ENDURECIDOS Y EROSIONADOS

Al igual que la incorporación a la agricultura, la reforestación implica roturación del material, protección contra la erosión y aplicación de abono. Estas diferentes operaciones se realizan en cierta medida en el Ecuador y en México.

En el Ecuador, las pruebas de reforestación de cangahua fueron efectuadas por el MAG con eucalipto, el mismo que fue plantado, sin abono, en huecos cuyo volumen (20 x 20 x 20 cm) no era suficiente para garantizar un buen crecimiento de los árboles. No se instaló ninguna obra de protección contra la erosión.

En México, la reforestación de las zonas de tepetate supuso la utilización de técnicas variadas y se plantaron numerosas especies: pino, eucalipto, ciprés, fresno, etc.

La reforestación fue particularmente eficaz en ciertas zonas críticas como la cuenca de México en la cual las 5.000 ha reforestadas por el proyecto Lago de Texcoco permitieron frenar casi totalmente la erosión (Llerena y Sánchez, 1992).

No se aportaron abonos al momento de la plantación pero la aplicación de medidas anti-erosivas (rellanos en la pendiente, zanjas, terrazas) fue general.

Actualmente, Sánchez recomienda la excavación de zanjas en pendientes superiores al 15 por ciento o un subsoleo con terrazas en pendientes inferiores a ese valor.

Las zanjas

Se realizan manualmente y deben tener 40 cm de ancho por 40 cm de profundidad. La tierra removida se dispone en taludes aguas abajo de la zanja, en los cuales se plantan los árboles jóvenes, aunque es preferible volver a poner la tierra en la zanja y plantar allí los árboles.

Se efectúan dos tipos de zanjas:

- zanjas trincheras: de 5 a 7 m de largo separadas por cojinetes de tierra no trabajada de 10 cm de ancho. La densidad de plantación es de 800 árboles/ha;
- tinas ciegas: zanjas de 5 m de largo dispuestas en tresbolillo. El espacio entre dos zanjas es de 5 m, la separación entre dos filas de zanjas es de 8 a 10 m. Se plantan 4 árboles por zanja, lo que produce una densidad de 400 plantas por hectárea.

Subsoleo y terrazas

Aunque la reforestación puede efectuarse después del subsoleo, sin terrazas (se plantan los árboles en las grietas resultantes del subsoleo), la realización de estas contribuye a que la protección contra la erosión sea más eficaz. Las terrazas, realizadas conjuntamente con el subsoleo, deben tener un ancho máximo de 4 m. Se recomienda separar

tres terrazas de absorción (terrazas planas) por una terraza contra-pendiente que sirve de canal de evacuación de las aguas. Los árboles se plantan en las terrazas de absorción, e igualmente en las terrazas-canal a razón de 1.000 árboles por hectárea.

La reforestación en terrazas es más eficaz que la realizada en zanjas. Así, según las mediciones y observaciones realizadas por SARH-CNA, proyecto Lago de Texcoco (1990), en la cuenca oriental del ex-lago de Texcoco, la supervivencia de los árboles y la cobertura vegetal han alcanzado tasas del 50 y el 60 al 100 % respectivamente en el primer caso, mientras han sido solamente del 23 % frente a un 15 a 30 % en el caso de la reforestación en zanjas.

COSTO DE LOS TRABAJOS

Los costos han sido establecidos con base en la recopilación de artículos, en encuestas efectuadas a particulares o a organismos que hayan realizado trabajos de rehabilitación de suelos endurecidos y en medidas efectuadas por nosotros mismos. Si bien, de acuerdo a los diferentes autores, los costos por hora de los trabajos son bastante similares en el Ecuador y en México, los tiempos necesarios para realizarlos varían según las fuentes. Pareció interesante presentar en un anexo todos los resultados de nuestras encuestas. Los valores que aparecen en el cuadro 1 corresponden a los costos de trabajos realizados en condiciones medias.

Trabajos		Precios en US$ por ha (en 1996) México	Ecuador
Incorporación a la agricultura			
Roturación	mecanizada	360	330 a 550
	manual		300 a 1200
Roturación + terraza plana	mecanizada	1.600 a 2.100	2.100 a 2.200
	manual		3.000 a 22.500
Subsoleo			330 a 550
terraza formación lenta (p = 20 %, 4 muretes)			500
Total			830 a 1.050
Reforestación			
Subsoleo + terrazas		810 a 1.080	
Costo de las plantas (1.000/ha)		135 a 200	
Total		945 a 1.280	
Tinas ciegas		160 a 200	
Costo de las plantas (400/ha)		95 a 110	
Total		255 a 310	

Cuadro 1 - Costo de los trabajos

Incorporación a la agricultura

Roturación

El tiempo necesario para el subsoleo de una hectárea depende evidentemente de la dureza del horizonte, de la pendiente, del estado de la superficie de la zona (presencia de yunques, desniveles, etc.) y del tipo de buldózer utilizado.

En pendientes inferiores al 20 por ciento, con un D7, el tiempo necesario estimado por los diferentes autores es de 5 a 10 horas. Sin embargo, un agricultor de Bolívar (Ecuador) señaló que podían requerirse 30 horas cuando era preciso nivelar los yunques.

Con un D5, el tiempo sería, según MATET (encuesta de abril de 1996), dos veces mayor. Este organismo habla de 5 a 6 horas con un D7 y de 8 a 12 horas con un D5. Considerando que los costos por hora son de 30 US$ en el caso de un D5 y de cerca de 60 US$ en el de un D7 (55 US$ en el Ecuador), los costos por hectárea son casi idénticos para estos dos tipos de buldózer. Es por ello que todos los autores recomiendan el empleo del D7, o inclusive del D8.

En condiciones medias óptimas, los costos de subsoleo varían entonces entre 330 y 550 US$/ha, pero pueden triplicarse en condiciones difíciles. Así, calculamos un tiempo de 39 horas/ha cuando se realiza un subsoleo con un D5 de una parcela de 6.200 m^2 (pendiente del 10 por ciento) de tepetate que presentó algunas partes particularmente resistentes en las que, dada la insuficiente potencia del buldózer, el maquinista tuvo que trabajar a menudo con un solo diente en lugar de los tres habituales.

Los costos de roturación manual son difíciles de evaluar ya que los tiempos necesarios para la roturación de una hectárea dependen de la dureza del material. Así, la roturación de una hectárea efectuada a pico en un proyecto realizado por CESA requirió 100 hombres durante una jornada de 8 horas (12,5 m^2 /hombre/ hora). Considerando que el salario es de 3 US$ por hombre y por día, el costo total de la roturación se eleva a 300 US$/ha. Sin embargo, nuestras medidas, efectuadas probablemente en una cangahua más dura, mostraron que se necesita 4 veces más tiempo ya que un hombre trabajó únicamente 3 m^2 por hora. En esté caso, el costo sería de 1.200 US$/ha.

Roturación y elaboración de terrazas

El costo de las terrazas realizadas conjuntamente con el subsoleo, en una pendiente promedio del 15 por ciento fue evaluado por MATET entre 1.600 y 2.100 US$/ha en 1992, lo que es bastante similar al costo calculado por nosotros en los trabajos realizados tanto en México como en el Ecuador (2.100 a 2.200 US$/ha). Aunque elevado, es inferior al de las terrazas realizadas manualmente. Wendt (1996) habla en efecto de 3.000 US$/ha y Zambrano *et al.* (1993) citan cifras que pueden alcanzar 22.500 US$/ha.

La realización de terrazas planas en el momento del subsoleo incrementa entonces considerablemente el costo de la incorporación de los suelos volcánicos endurecidos a la agricultura. Al parecer, es preferible hacer terrazas de formación lenta. En efecto, la realización de muretes de aproximadamente 1 m de alto y 50 cm de ancho tiene un costo, según la CESA, de apenas 500 US$/ha, tomando en cuenta que un hombre que percibe 3 US$/día construye 3 m/día y que en una pendiente del 20 por ciento basta con un espacio de 25 m entre los muretes. El costo total del subsoleo y de la terraza de formación lenta es entonces en este caso de 830 a 1.050 US$/ha. En pendientes más débiles, los precios son evidentemente menores.

Preparación del suelo antes de la siembra

Consiste en la aplicación de una rastra de discos con el fin de romper los bloques de cangahua resultantes del subsoleo. El costo de esta operación es mínimo en relación al de la roturación y al de la realización de la terraza. MATET estima en efecto en una hora el tiempo necesario para una hectárea y cobra por ello 9 US$ (en 1996). Nuestras observaciones mostraron que la operación bien realizada puede durar de 2 a 3 horas lo que significa, tanto en el Ecuador como en México, entre 20 y 30 US$/ha.

Reforestación

Según Llerena y Sánchez (1993, 1994) y Pimentel (1995), el costo de la reforestación de una hectárea de tepetate es muy diferente según el método empleado.

En el caso de terrazas realizadas con un D8 conjuntamente con el subsoleo, los costos totales son de 945 a 1.280 US$/ha, considerando un precio de 810 a 1.080 US$ para la preparación del suelo y de 135 a 200 US$ para la producción y plantación de los 1.000 árboles necesarios.

Los costos de reforestación después de la elaboración de tinas ciegas es en cambio de apenas 255 a 310 US$/ha, es decir 160 a 200 US$ para la excavación y 95 a 110 US$ para la producción y la plantación de 400 árboles.

Estos últimos precios son apenas superiores a los indicados por la Empresa de Desarrollo Forestal (EMDEFOR) en el Ecuador para una reforestación en suelo no endurecido. Esta empresa calcula en efecto 235 US$/ha, de los cuales el 45 % está destinado a la mano de obra.

CONCLUSIÓN

Los costos de incorporación de los suelos volcánicos endurecidos a la agricultura son difíciles de evaluar de manera exacta. Si bien los costos en horas, básicamente idénticos en México y en el Ecuador, permiten comparar los costos totales en los dos países, la variabilidad de los tiempos de trabajo citados por los diferentes autores lleva a una dispersión en los resultados. Tal variabilidad se explica en parte por la naturaleza de las parcelas trabajadas. Una gran dureza del material y una pendiente más fuerte aumentan el tiempo de trabajo. Además, los costos promedio citados han sido calculados por hectárea. Es evidente que mientras más pequeña es la parcela, mayor es el tiempo y por lo tanto superior el costo.

Los costos de la roturación mecanizada son generalmente menos elevados que los de la roturación manual. Aunque el CESA cita cifras más o menos equivalentes o incluso superiores en el caso de la roturación mecanizada, no ha vacilado en reemplazar la operación manual por la mecanizada que es más rápida y ciertamente mucho menos costosa cuando el material es muy duro.

Así, si la roturación manual se concibe en un medio campesino de escasos recursos económicos, en el cual el agricultor no contabiliza su trabajo, los proyectos de incorporación de estas formaciones a la agricultura deben aplicar métodos de roturación mecanizada.

Las obras de conservación son necesarias para una rehabilitación duradera de estas formaciones. La realización de terrazas planas en el momento del subsoleo representa un costo menor con métodos mecanizados, de uso corriente en México, que con métodos manuales todavía utilizados en el Ecuador. Sin embargo, la realización de terrazas de formación lenta tal como se practica actualmente en el Ecuador resulta particularmente interesante. En efecto, el costo total del subsoleo y de las terrazas está comprendido entre 830 y 1.050 US$/ha en una pendiente del 20 por ciento. En países como el Ecuador, donde las terrazas pueden ser realizadas gratuitamente durante los trabajos comunitarios («mingas»), el costo del subsoleo, de 330 a 550 US$/ha, sería el único a tomarse en cuenta. Sin embargo, los trabajos de conservación que deben realizarse al emplear este método, implican nuevos subsoleos, al cabo de algunos años, por lo menos en la parte superior de la terraza. Queda por determinar la frecuencia de esas operaciones, ligada a la intensidad de la erosión. Finalmente, los aportes de materia orgánica en forma de abono representan una parte importante en los costos de rehabilitación de estas formaciones.

Pueden ser disminuidos si se remplaza el abono orgánico por abonos verdes enterrados durante el primer año de cultivo, pero el campesino pierde un año de producción, lo que no siempre está dispuesto a aceptar. Las ventajas de un método en relación a otro merecerían ser estudiadas.

Los costos de la reforestación son mucho mayores cuando se realiza subsoleo y terrazas (800 a 1.066 US$/ha) que cuando se forman zanjas para limitar la erosión. Este método, que tiene un costo de 250 a 330 US$/ha en México, resulta apenas más costoso que la reforestación en suelo no endurecido en el Ecuador (235 US$/ha).

Referencias bibliográficas

CALVA ORDUÑO, D., 1992: Rescate de tierras tepetatosas erosionadas en Tlaxcala, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 557-560.

CISNEROS, G.; FLOR, J.; TRUJILLO, G., 1996: Diagnóstico del contenido de elementos en dos cangahuales de la provincia de Pichincha, en este volumen.

CUSTODE, E.; DE NONI, G.; TRUJILLO, G.; VIENNOT, M., 1992: La cangahua en el Ecuador: caracterización morfoedafológica y comportamiento frente a la erosión, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 332-346.

DE NONI, G.; VIENNOT, M.; CUSTODE, E., 1996: Ruissellement et érosion sur des parcelles de *cangahua* réhabilitée (période 1994-1996), en este volumen.

DE NONI, G.; TRUJILLO, G.; VIENNOT, M., 1992: Análisis histórico, social y económico de la cangahua en Ecuador, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 503-514.

ETCHEVERS, J.; ZEBROWSKI, C.; HIDALGO, C.; QUANTIN, P., 1992: Fertilidad de los tepetates. II Situación del fósforo y del potasio en tepetates de México y Tlaxcala, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 385-391.

JEROME, G., 1992: *Étude des réorganisations superficielles sous pluies naturelles sur un sol volcanique induré, le* tepetate, *dans la vallée du fleuve Texcoco au Mexique. Comparaison avec un sol non induré*, Mémoire de fin d'études, ISTOM, Cergy Pontoise, Francia, 119 p.

LEROUX, Y.; JANEAU, J.L., 1996: Caracterización hidrodinámica de un suelo volcánico endurecido del Ecuador: influencia de los estados de superficie, en este volumen.

LLERENA, A.; SÁNCHEZ, B., 1992: Recuperación de tepetates en la vertiente oriental del valle de México, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 302-308.

LLERENA, A.; SÁNCHEZ, B., 1993: *Hidrologic Development of Ex-lake Texcoco Basin*, Report prepared for the IV International Conference on the Development of Arid Regions. México, D.F.

MÁRQUEZ, A.; ZEBROWSKI, C.; NAVARRO, H., 1992: Alternativas para la recuperación de tepetates, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 465-473.

MARTÍNEZ, M.; GARCÍA, R., 1990: *Naturaleza de los cementantes de algunos tepetates del valle de México*, Tesis de Licenciatura, UACH, Chapingo, México.

NAVARRO, H.; ZEBROWSKI, C., 1994: La réhabilitation agricole des sols volcaniques indurés et érodés en Équateur et au Mexique, en *Actes du 15e Congrès Mondial de la Science du Sol, Acapulco*, Vol. 6a, p. 592-610.

PIMENTEL, L., 1995: Técnicas de plantación forestal en suelos degradados (experiencias en la vertiente oriental de la cuenca de México), en *Memorias del IV curso sobre Desertificación y desarrollo sustentable en América Latina y el Caribe*, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

SÁNCHEZ, B., 1992: Análisis de costos en la utilización de maquinaria para la recuperación de suelos volcánicos endurecidos, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio

Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 550-556.

SÁNCHEZ, B.; LLERENA, A., 1994: *Evaluation Technical and Economics of Soil and Water Conservation Program in the Eastern Valley of Mexico Basin*, Report prepared for the 15th World Congress of Soil Science, Acapulco, México.

SARH-CNA, *Proyecto Lago de Texcoco, 1990: Evaluación del Programa de reforestación del Proyecto lago de Texcoco (zona oriental)*, AGRIPEFOR, Chapingo, Montecillo, México.

TRUJILLO, G.; ARIAS, J., 1996: Productividad en cangahua rehabilitada: ensayos agronómicos, en este volumen.

WENDT, J. 1996: *Estudio sobre el costo beneficio de obras de conservación del suelo y manejo de laderas en unas comunidades de la provincia del Tungurahua*, PROBONA-INEFAN, Quito, Ecuador.

ZAMBRANO, S.; MENA, V.; COELLO, T.; INSUASI, T., 1993: *Estudios de los impactos sociales, económicos, ecológicos y los problemas en la implementación de obras de conservación de suelos*, PROCOSA, Riobamba, Ecuador.

Anexo
ALGUNOS COSTOS Y TIEMPOS DE TRABAJO SEGÚN DIFERENTES AUTORES

Costos (en US$ en 1996)

	México	Ecuador
Jornalero/día	3	3
Estiércol (tonelada)		33
Buldózer/hora		
D5	30	
D7	60	55

Tiempo de trabajo (horas/hectárea)

ROTURACIÓN MECANIZADA

Tipo de buldózer	Fuente			
	MATET 1996 (México)	Agricultor de Bolívar (Ecuador)	CESA (Ecuador)	Medidas propias parcela de 6.200 m², p = 10 % en Hueyotlipán (México)
D5	8 - 12			39
D7	5 - 6	10	6 - 10	

ROTURACIÓN + CONSTRUCCIÓN DE TERRAZAS (MECANIZACIÓN)

Tipo de buldózer	Fuente					
	MATET (México)		Medidas propias en parcelas en			PLT[2] (México)
			Tlalpán (México)		Licto (Ecuador)	
	1992	1996[1]	S = 2.000 m² p = 5 %	S = 1.200 m² p = 2 %	S = 1.400 m² p = 18 %	
D5	45 - 60		70			
D6				48	40	
D7	30 - 35	40 - 70				
D8						20 - 22

[1]: con buldózer usado; [2]: para forestación

El cultivo de la cangahua en el medio campesino tradicional en el Ecuador

Claude Zebrowski, Azucena Vicuña

Abstract

In the Callejón Interandino *(the plateau between the two cordilleras), where eroded volcanic soils (*cangahua*) are present, a survey has been done to estimate the proportion and methods of reclamation of these soils.*

Other topics such as family structure, agricultural production unit (PU) area, crops and yields have also been studied.

Results have shown that small farmers have a low educational level and small PU. Nearly all of them are poor.

In these conditions cangahua *reclamation is practised in order to increase the PU area. Although crop yields are very low, they are quite similar to those obtained from cropland soils.*

Keywords: Cangahua - *Ecuador - Production Unit - Family Structure*

INTRODUCCIÓN

Los suelos volcánicos endurecidos cubren una superficie de 240.000 ha en la parte septentrional del callejón interandino, entre Alausí y Tulcán (Zebrowski, 1996). Están localizados en las laderas internas de las cordilleras, a una altura comprendida entre 2.400 y 3.600 m.s.n.m. Las vertientes inferiores de estos relieves, ubicadas a menos de 3.200 m.s.n.m., presentan un clima ecuatorial templado, lo que permite una amplia gama de cultivos. Estas partes bajas han sido cultivadas desde la época pre-incásica y fueron poco a poco erosionadas. Las zonas desnudas y endurecidas ocupan superficies importantes. Se estima en efecto en 80.000 ha la superficie de las zonas antiguamente cultivadas que hoy en día están erosionadas y en las cuales los suelos ya no tienen sino una profundidad inferior a 20 cm. De esas 80.000 ha, cerca de la mitad está completamente erosionada y su horizonte endurecido, llamado localmente «cangahua», aflora en la superficie.

Situadas en zonas densamente pobladas, estas formaciones erosionadas son a menudo incorporadas a la agricultura después de un trabajo de roturación del suelo endurecido. Si bien hubo algunos intentos oficiales de recuperación a partir de los años 1970, la incorporación de estos suelos a la agricultura se practica sobre todo en el contexto del medio campesino tradicional (De Noni *et al.*, 1992). Se desconocían sin embargo la magnitud y los resultados de esta rehabilitación.

En el marco del proyecto «Regeneración y conservación de los suelos volcánicos endurecidos de América Latina» (contrato CEE-ORSTOM nº TS3*CT 930252) se realizó, con la colaboración de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE), un estudio que permitió precisar la magnitud del fenómeno de incorporación de la cangahua a la agricultura en las Unidades de Producción agrícola (UP). Este trabajo, efectuado mediante encuestas, permitió no solamente estudiar el problema, sino además reubicarlo en el contexto del mundo rural de la Sierra ecuatoriana.

METODOLOGÍA

Se efectuaron dos series de encuestas. La primera, general, fue realizada en el conjunto de las zonas que presentaban afloramiento de cangahua, y la segunda, más detallada, en zonas testigo representativas.

La primera serie estuvo a cargo de estudiantes del Departamento de Investigaciones Geográficas y Estudios Ambientales de la Facultad de Ciencias Humanas de la PUCE, bajo la conducción de algunos profesores del departamento. Las primeras encuestas se efectuaron en el Norte de la Sierra (provincias de Carchi, Imbabura y Pichincha) durante el año lectivo 1994-1995 y las segundas tuvieron lugar en el Sur (provincias de Cotopaxi, Tungurahua y Chimborazo) durante el año 1995-1996.

Las zonas de encuesta se delimitaron una vez ubicados en los mapas topográficos a escala 1:50.000, los límites, extraídos de mapas edafológicos, de las zonas en las que están presentes los suelos con cangahua. En todas las zonas, las encuestas se realizaron al azar.

Los temas abordados fueron:

- estructura familiar;
- tenencia y origen de las tierras;
- superficie y composición de las UP (naturaleza de las tierras, equipo, presencia de animales);
- cultivos practicados: modos de cultivo, rendimientos, destino de la producción.

Después de la primera encuesta, se efectuaron algunos cambios en los cuestionarios, en función de las dificultades encontradas por los estudiantes. Pareció interesante igualmente introducir el origen étnico de la familia. Este factor no fue por lo tanto tomado en consideración en la zona Norte, pero sí en las tres provincias meridionales.

El número total de encuestas generales conservadas después de examinar los resultados (algunas debieron ser eliminadas por estar incompletas o mal hechas) fue de 799 (cuadro 1).

Solo pudieron realizarse dos encuestas detalladas, las mismas que fueron efectuadas por estudiantes franceses según una metodología idéntica, en el marco de un análisis sistémico de los sistemas de producción. La primera tuvo lugar en la región de Bolívar (Coudray y Legeait, 1995) y las 73 UP encuestadas permitieron identificar los 9

	Norte	Cotopaxi			Tungurahua			Chimborazo			Total
		I	M	total	I	M	total	I	M	total	general
nº de encuestas	333	53	52	105	82	81	163	145	33	178	799
nº de personas/familia	1 - 15	1 - 11	1- 10		1 - 12	1 - 11		1 - 10	1 - 8		
promedio	5,7	5,6	5,6		5,1	5,6		5	4,7		

I: indígenas, M: mestizos

Cuadro 1 - Número de encuestas y estructura familiar

sistemas representativos de la zona de estudio. La segunda se efectuó en la región de Cangahua (Gasselin, 1995) y en su transcurso se estudiaron todas las UP presentes en la zona de estudio (384).

RESULTADOS

Los resultados se presentan según los diferentes temas y han sido agrupados por provincias, cuando estas presentan una diferencia, con excepción de la zona norte en la que los tratamientos se efectuaron globalmente. En los cuadros aparecen igualmente algunos resultados de las encuestas detalladas (Bolívar y Cangahua).

Estructura familiar

Las familias encuestadas presentan de 1 a 15 miembros con un promedio, relativamente constante, comprendido entre 4,7 y 5,7 miembros por familia (cuadro 1). El nivel de instrucción (cuadro 2) de los padres es poco elevado, sobre todo en el medio indígena en el cual más de la mitad de los padres de familia y cerca del 70 % de las madres no han recibido instrucción escolar alguna. Sin embargo, la mayoría de los hijos están actualmente escolarizados, y algunos de ellos siguen estudios secundarios o inclusive universitarios.

Nivel de instrucción	Padres				Niños					
	Padre		Madre		6 - 12 años		12 - 20 años		> 20 años	
	I	M	I	M	I	M	I	M	I	M
N	52,7	28,6	69,6	45,3	18	1,5	5,9	2,3	16,9	3
P	45,2	63,3	29,6	51,7	82	98,5	81,2	68,5	61,9	59,4
S	2,1	5,4	0,8	4,1	-	-	12,9	29,2	18,7	30,3
U	0	2,7	0	0,7	-	-	-	-	2,5	7,3

N:ninguna, P: primaria, S: secundaria, U: universitaria; I: indígenas, M: mestizos

Cuadro 2 - Nivel de instrucción (en %)

Origen de las tierras

Casi la totalidad de los campesinos son propietarios de sus tierras (93,2 % de todas las UP). La renta de la tierra y el trabajo al partir son poco comunes (menos del 4 %). Algunos campesinos no poseen tierra.

Un alto porcentaje de explotaciones agrícolas está formado únicamente por tierras heredadas: 46,7 al 68,3 % según las regiones. Estas cifras son superiores a las mencionadas en la encuesta MAG-ORSTOM (1982) realizada en 1975 en todo el medio rural (21 al 57 %), no por las particularidades del medio restringido en el que se realizaron las encuestas, sino debido a herencias posteriores a la Reforma Agraria de 1973.

La compra es un fenómeno importante (cuadro 3). Si bien la mayor parte de los campesinos compraron sus tierras de una sola vez, una parte importante agrandó su explotación mediante compras posteriores. Parecería entonces que los agricultores tienen tendencia a aumentar el tamaño de sus explotaciones antes que a venderlas. En toda la zona encuestada, solo el 5,5 % de los jefes de familia estaría dispuesto a vender sus explotaciones.

	herencia	herencia y compra	compra (una vez)	compra (varias veces)
Norte	38	8,7	43,7	9,6
Cotopaxi	43,5	14,8	40,6	1,1
Tungurahua	33,5	11,6	54,7	0,2
Chimborazo	55,9	12,4	28,8	2,9

Cuadro 3 - Origen de las tierras (en % de todas las UP)

Sería sobre todo el abandono de explotaciones demasiado pequeñas, acompañado de una migración definitiva, lo que explicaría la importancia de las transacciones de tierras de la última década (cuadro 4).

Fecha	< 1954	1954-1963	1964-1973	1974-1983	1984-1995
Norte	2	12	21	38	53
Cotopaxi	10,0	16,7	3,3	36,7	33,3
Tungurahua	7,9	9,2	19,7	30,3	32,9
Chimborazo	9,2	9,2	26,3	26,4	28,9

Cuadro 4 - Fecha de compra (en % de las compras totales)

Superficies y naturaleza de las tierras

Las superficies de las UP son reducidas ya que fuera de la región de Bolívar, más del 75 % de ellas tienen una superficie menor a 3 ha y más de la mitad inferior a 1 ha (Cuadro 5).

Superficie (ha)	< 1	1 - 2,99	1 - 5	5,01 - 10	10,01 - 50	> 50	S. media
Norte	50,6	26,1	8,4	6,8	7,5	0,6	3,91
Cotopaxi	54,5	32,3	7,1	5,1	1	0	1,42
Tungurahua	62,7	23,9	10,4	0,7	1,6	0,7	2,15
Chimborazo	63,5	31,9	4,2	0,7	0	0	0,9
Bolívar	24,7	24,7	13,7	21,9	15,1	0	-
Cangahua	67,4	23,5	7,3	1,8	0	0	1,16

Cuadro 5 - Superficies de las UP (en %)

Es sobre todo cerca de las ciudades donde las superficies son más reducidas: el 95 % de las UP de las parroquias de Calderón y Cumbayá, situadas cerca de Quito, tienen una superficie inferior a 1 ha. No es sorprendente entonces que la tasa de actividad secundaria en las UP de estas parroquias sea particularmente elevada (76,9 % en Cumbayá; 91,3 % en Calderón).

La cangahua en las UP

La proporción de cangahua en la composición de las tierras de las UP es importante. Cerca del 60 % de las UP de la región Norte presentan cangahua, pero esta proporción es mucho mayor en las provincias de Cotopaxi, Tungurahua y Chimborazo (74,8 a cerca del 90 %), donde la superficie de las UP es más reducida. Resulta entonces natural que sea sobre todo en esas provincias donde los campesinos han incorporado a la agricultura los suelos con cangahua: 93 al 96,5 % de los campesinos que tienen cangahua la han incorporado parcial o totalmente al cultivo (cuadro 6).

	Superficies (en % de la superficie total)				Proporción de UP con cangahua	Proporción de UP con cangahua cultivada
	SA	CR	CN	CN + CR		
Norte	64,9	21,7	13,5	35,2	59	72
Cotopaxi	23,5	71,2	5,3	76,5	89,9	95,5
Tungurahua	65,5	26,4	8,1	34,5	74,8	93
Chimborazo	41,8	48,4	9,8	58,2	79	96,5
Bolívar	-	-	-	-	24,7	50
Cangahua	-	-	-	-	64,6	65,3

SA:suelo agrícola, CR:cangahua cultivada, CN:cangahua no cultivada

Cuadro 6 - Naturaleza de las tierras

La recuperación de la cangahua es entonces un fenómeno común y constituye una necesidad para los campesinos ya que les permite aumentar la superficie de suelo agrícola útil. Son raros los agricultores que han roturado la cangahua mediante subsoleo con buldózer. Desgraciadamente, no se pudo contabilizar el número total de esos agricultores a nivel de la encuesta general, ya que dentro de la respuesta «roturación mecanizada» (cuadro 7) se mezclaron las de quienes emplearon un buldózer y las de quienes intentaron romper la cangahua mediante labranza con tractor agrícola.

En la región de Bolívar, donde la roturación mediante buldózer está relativamente difundida, solo 1 de los 9 agricultores que recuperaron la cangahua utilizó este método para incorporar a la agricultura 28 ha de ese tipo de suelo (Coudray y Legeait, 1995). En la región de Cangahua, todos los campesinos que incorporaron la cangahua a la agricultura (162) la roturaron manualmente. En efecto, este método es casi generalizado entre los campesinos de escasos recursos. Se rompe la cangahua con un pico, generalmente durante el período de lluvias, ya que presenta menor resistencia en esa época. Esto implica, como lo subraya Gasselin (1995), un trabajo sumamente duro, que se realiza en

varios días o inclusive en varios meses. Este autor estima que son necesarias 150-200 horas de trabajo para la roturación de una hectárea, lo que permite suponer que consiste solamente en un raspado superficial ya que esto corresponde a 50 m^2/hombre/hora, mientras que las mediciones realizadas en la operación objeto de este artículo durante una roturación a 20-30 cm de profundidad mostraron que un hombre podía roturar únicamente de 2 a 3 m^2 por hora.

	Roturación		Utilización de	
	manual	mecanizada	estiércol	fertilizantes
Norte	62	38	77,3	32,9
Cotopaxi	65,3	34,7	52,6	22,1
Tungurahua	68,9	31,1	70,7	33,5
Chimborazo	77,6	22,4	91,6	9,1

Cuadro 7 - Rehabilitación de la cangahua (en % de las UP que la han rehabilitado)

En la superficie así removida, la mayoría de los campesinos (del 52,6 al 91,6 %) esparcen, en la medida de sus posibilidades, escasas cantidades de abono proveniente de su ganado y lo dejan podrir durante algunos meses antes de sembrar.

Los medios de producción

Equipos y maquinaria en las unidades de producción

	Arado	Tractor
Norte	17,8	2
Cotopaxi	17,1	7,6
Tungurahua	58,1	12,5
Chimborazo	47,7	4,5
Bolívar	41	4,1
Cangahua	13	0

Sin contar algunas UP de gran tamaño, el equipo agrícola no rudimentario es poco frecuente. Si bien el 12,5 % de las UP de Tungurahua posee un tractor, esta proporción es menor en las UP de las otras provincias (2 al 7,6 %). La presencia de arado es más frecuente: 17,8 al 58, % de las UP en Tungurahua poseen uno (cuadro 8).

Cuadro 8 - Equipos y maquinaria en las UP
(en % de todas las UP)

Animales

La presencia de animales en las explotaciones es generalizada (cuadro 9), aun en aquellas de superficie reducida. Se observa la alta proporción de UP que posee bovinos y si bien es cierto que están presentes sobre todo en las explotaciones de tamaño superior a 3 ha (más del 70 % de ellas poseen bovinos), existen igualmente en las UP de tamaño muy reducido, donde se «crían las vacas sin pasto» (informe MAG-ORSTOM, 1982). En efecto estas pastan a lo largo de los caminos.

Cuadro 9
Animales en las UP
(en % de todas las UP)

	Bovinos	Ovinos	Porcinos	Cuyes	Aves
Norte	43,2	16,8	51,9	-	68,8
Cotopaxi	62,8	29,5	65,7	51,4	45,7
Tungurahua	69,3	25,1	60,1	62,6	66,9
Chimborazo	67,8	55,6	52,8	54,5	67,9

Mientras que los porcinos y ovinos (carne y lana) pueden ser vendidos para satisfacer necesidades financieras, las aves de corral y la leche son generalmente autoconsumidos. Los pequeños agricultores, como lo anota Gasselin (1995), «buscan primero asegurar al máximo su alimentación antes de razonar en términos de ingresos».

Los cultivos

El cultivo más frecuente en las UP es siempre el maíz (cuadro 10), lo que es muy normal ya que las encuestas se realizaron en el «piso del maíz». Allí, el fréjol es cultivado sobre todo en la región norte (en particular en las provincias de Carchi e Imbabura), los cereales como el trigo y sobre todo la cebada en la provincia de Chimborazo y la papa en la provincia de Tungurahua.

Cultivo	Maíz	Fréjol	Papa	Cebada	Trigo	Haba	Arveja
Importancia del cultivo en las UP (en %)							
Norte	76,3	39,9	21	14,4	10,2	-	10,5
Tungurahua	66,3	8,3	44,2	23,2	7,4	8,3	8,3
Chimborazo	72,3	11,8	24,7	43,8	21,3	16,9	14
Empleo del tractor para la preparación del suelo (en %)							
Norte	39,2	62,8	34,5	68,8	71,4	-	42,9
Cotopaxi	62,5	-	59	42,8	-	-	-
Tungurahua	26,9	0	37,5	35,9	41,7	21,4	0,8
Chimborazo	32,1	61,9	18,2	23	23,7	20	36

Cuadro 10 - Cultivos y preparación del suelo

Modos de cultivo

La preparación del suelo, aunque principalmente manual, se realiza a menudo, debido al reducido número de tractores y de arados existentes en las UP, con equipos alquilados. Los diversos tratamientos y las cosechas se efectúan manualmente.

La aplicación de abono es muy difundida. Del 74 al 92 % (según los cultivos) del total de los agricultores la realiza (cuadro 11) pero a menudo en dosis bajas a muy bajas. El empleo de fertilizantes y de tratamientos químicos (herbicidas, fungicidas) es mucho

menos frecuente, salvo en el caso de la papa (el 58 % de los agricultores la fertiliza, el 50 % utiliza fungicidas).

Cultivo	Maíz			Fréjol			Papa			Cebada			Trigo			Haba			Arveja		
Producto	MO	Fe	Fu	MO	Fe	Fu	MO	Fe	Fu	MO	Fe	Fu	MO	Fe	Fu	MO	Fe	Fu	MO	Fe	Fu
Norte	88	28	23	71	42	35	90	57	57	75	25	50	56	56	29	-	-	-	80	34	37
Cotopaxi	83	50	17	-	-	-	73	64	36	86	28	14	50	0	0	50	0	0	-	-	-
Tungurahua	94	48	39	99	43	14	93	63	57	95	51	46	83	67	50	93	64	57	93	43	43
Chimborazo	99	20	12.	99	43	28	98	48	34	96	20	23	99	26	24	93	23	13	100	28	28
Total	92	31	23	74	42	32	91	58	50	90	27	32	79	50	29	91	35	26	89	34	35

Cuadro 11 - Utilización de abonos y fungicidas (en %)

A pesar de la pobreza de la cangahua en nitrógeno y en fósforo, los aportes de abono y la fertilización de los cultivos en ese tipo de suelos no son más elevados que en suelo agrícola normal.

El riego es relativamente frecuente; se lo practica, por gravedad, en el 49 % de las UP, pero solo concierne al 28 % de las UP de la provincia de Chimborazo. En la región de Cangahua, el 97 % de las explotaciones carece de agua.

La erosión es un fenómeno común: el 65 % de los agricultores señala su existencia pero no toma ninguna medida para limitarla.

Los rendimientos

Durante la primera encuesta, se intentó, sin éxito, evaluar los rendimientos. La dificultad para obtener resultados confiables, debida en parte a que los agricultores ignoran los rendimentos o los expresan de maneras diferentes, rara vez en quintales, a menudo en «bultos» o «cargas» de tamaño y peso diferentes de un agricultor a otro, llevó a suprimir esa pregunta en las encuestas del Sur. Los resultados presentados en el cuadro 12 correspondientes a cada una de las provincias provienen de las estadísticas del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) de 1993. Se han incluido igualmente en dicho cuadro los rendimientos promedio, obtenidos por Coudray y Legeait en la región de Bolívar, que son bastante similares a los de la provincia (Carchi), así como la gama de rendimientos indicados por Gasselin en lo que se refiere a la región de Cangahua (provincia de Pichincha).

Los rendimientos son generalmente bajos a muy bajos. Esto se explica por una serie de dificultades que van desde la preparación del suelo hasta la cosecha, pasando por semillas no adaptadas, fertilización, tratamientos deficientes, etc.

No se pudo establecer ningún resultado confiable en lo que se refiere a las posibles diferencias de rendimientos entre los cultivos en suelo agrícola y en cangahua. Sin embargo, numerosos campesinos aseguraron que, en condiciones climáticas y con tratamientos iguales, los rendimientos eran idénticos. No obstante, estos son generalmente menores que los mencionados por el INEC (1993) para la provincia en su conjunto. En efecto, los suelos con cangahua se encuentran en regiones secas, donde, a falta de riego, los rendimientos son bajos. Así, en la región de Cangahua, los rendimientos de los cereales (maíz, trigo) y de fréjol, cultivados a menos de 3.200 m.s.n.m., son menores a los rendimientos promedio de la provincia de Pichincha.

Cultivo	Maíz (suave seco, grano)	Fréjol (seco, grano)	Papa	Cebada	Trigo	Haba (seca, grano)	Arveja (seca, grano)
Carchi	1,06	0,62	11,78	1,1	1,84	0,63	0,44
Imbabura	0,70	0,78	2,8	0,79	0,66	0,36	0,28
Pichincha	0,43	0,81	9,97	0,73	1,02	0,61	0,21
Cotopaxi	0,35	0,26	6,86	0,50	0,44	0,34	0,35
Tungurahua	1,07	0,71	8,50	0,58	0,61	0,53	0,39
Chimborazo	0,37	0,56	4,95	0,82	0,40	0,26	0,17
Bolívar	0,99	0,85	10,6	1,1	1,3	-	0,78
Cangahua	0,22 - 0,6	0,1 - 0,6	4 - 9,5	0,3 - 1,4	0,3 - 0,65	0,3 - 0,85	-

Fuente: INEC, 1993 (provincias); Coudray y Legeait, 1995 (Bolívar); Gasselin, 1995 (Cangahua).

Cuadro 12 - Rendimientos (t/ha)

CONCLUSIÓN

La cangahua se localiza en la región septentrional interandina, entre Chunchi y Tulcán, bajo los 3.200 m.s.n.m., en las laderas internas de las cordilleras, a profundidad. En estas regiones, el medio rural se caracteriza por:

- un minifundio típico: el 82,3 % del conjunto de las UP encuestadas tiene en efecto menos de 3 ha y el 55 % menos de 1 ha;
- un bajo nivel de instrucción de los agricultores, sobre todo en el medio indígena, aunque los hijos tienen un nivel de instrucción superior;
- medios de producción casi inexistentes (a pesar de la práctica de riego en el 49 % de las explotaciones), con excepción de algunas raras UP de gran tamaño;
- una productividad agrícola baja debida, entre otras cosas, a malas prácticas de cultivo.

En estas condiciones, la producción se destina principalmente al auto-consumo, pero aquí, aún más que en México, el campesino debe recurrir a ingresos exteriores para vivir. Según las encuestas, el 60 % de los agricultores tiene una doble actividad, pero Gasselin afirma que esta situación concierne al 92 % de los agricultores de la región de Cangahua. La doble actividad es característica de los campesinos que poseen menos de una hectárea. Para ellos, más del 65 % de los ingresos familiares totales provendría, según el informe MAG-ORSTOM (1982), de fuentes exteriores a la UP. Con algunas raras excepciones, en tales explotaciones no se alcanzaría el límite mínimo de reproductividad económica (de 3,98 millones de sucres, es decir aproximadamente 1.675 US$ según Gasselin). Este mismo autor señala inclusive que ninguna de las explotaciones de Cangahua alcanza el límite mínimo de supervivencia (1,2 millones de sucres, es decir 540 US$), lo cual explica la migración temporal y a veces hasta definitiva de los campesinos.

Sin embargo, algunos agricultores, entre los más jóvenes y dinámicos, se orientan hacia una producción destinada a la venta, acudiendo a insumos ampliamente utilizados y a una mano de obra no familiar, y alcanzan el límite mínimo de reproductividad en superficies a veces inferiores a una hectárea, sobre todo si la especialización tiende hacia la ganadería como lo observaron Coudray y Legeait en Bolívar. Este fenómeno es frecuente en esta región gracias a la proximidad de la carretera Panamericana y del mercado colombiano.

Existe igualmente en la provincia de Tungurahua, debido a la especialización de ciertas UP en la producción frutal, pero es muy raro en la provincia de Chimborazo.

La incorporación a la agricultura de las zonas erosionadas con cangahua es primordial en estas regiones de minifundio, a fin de aumentar la superficie agrícola útil. Del 69 % de UP encuestadas que presenta cangahua, el 86,8 % la ha recuperado efectivamente, esencialmente de forma manual, por falta de conocimiento y sobre todo de medios económicos para realizar una correcta rehabilitación, que incluya un subsoleo profundo.

Al igual que sucede en México con el tepetate, la cangahua, a pesar de su pobreza inicial, no es cultivada de manera diferente al suelo agrícola. No es sorprendente entonces que los rendimientos sean muy bajos. Dadas las potencialidades agronómicas de la cangahua (Trujillo y Arias, 1996), su presencia en la región templada de la Sierra que permite una amplia gama de cultivos, así como las posibilidades de riego existentes en el Ecuador, este tipo de suelo merecería ser incorporado a la agricultura de manera más exitosa. Sin embargo, los elevados costos de su rehabilitación, que pueden alcanzar 830 a 1.050 US$ por hectárea (Zebrowski y Sánchez, 1996), incompatibles con los recursos económicos de la gran mayoría de los campesinos implicados, supone un programa de ayuda gubernamental. Sin embargo, paralelamente a tal programa, se debe proseguir o emprender un esfuerzo dirigido a aumentar los rendimientos de la agricultura en la Sierra en general. Se plantea en efecto un problema mayor, la explicación de los bajos rendimientos debe buscarse a lo largo de todo el ciclo de cultivo: calidad de las semillas, modos de cultivo, adecuación de las dosis de abono, eficacia de los tratamientos, etc.

Referencias bibliográficas

COUDRAY, J.; LEGEAIT, V., 1995: *Analyse-diagnostic des systèmes agraires passés et actuels d'une petite région andine d'Équateur*, ORSTOM, Quito, 60 p. + figuras y anexos.

DE NONI, G.; TRUJILLO, G.; VIENNOT, M., 1992: Análisis histórico, social y económico de la cangahua en Ecuador, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos Volcánicos Endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 503-514.

GASSELIN, P., 1995: *Systèmes de production minifundistes sur sols volcaniques indurés et érodés en Équateur*, ORSTOM, Quito, 57 p. + anexos.

INEC, 1993: *Sistema estadístico agropecuario nacional. Resultados de 1993*, Quito.

MAG-ORSTOM, 1982: *Diagnostic socio-économique du milieu rural équatorien. Volume de synthèse*, ORSTOM, Quito.

TRUJILLO, G.; ARIAS, J., 1996: Productividad en cangahua rehabilitada: ensayos agronómicos, en este volumen.

ZEBROWSKI, C. 1996: Los suelos con cangahua en el Ecuador, en este volumen.

ZEBROWSKI, C.; SÁNCHEZ, B., 1996: Los costos de rehabilitación de los suelos volcánicos endurecidos, en este volumen.

Los sistemas agropecuarios de producción en tepetates, en cuatro comunidades del altiplano mexicano

Christian PRAT, Boun-Tieng LY, Isabelle LEPIGEON,
Garance FAUGÈRE, Jean-Louis ALEXANDRE

Abstract

The agricultural rehabilitation of tepetates, *indurated and sterile volcanic tuffs located along the mexican neovolcanic ridge, is technically possible. However, it is necessary to know in detail the agro-socioeconomical factors of the peasant communities which have these kind of lands, to give them technical answers appropriate to local realities. The studies of 4 communities located in the states of Mexico, Tlaxcala, Jalisco and Michoacán, show that the climatic conditions are mostly difficult (long dry season, irregular rains, early frosts). The use of irrigation is limited. Each producer family cultivates a small surface of land which is principally* ejidal. Tepetates *areas are the last pieces of land still not distributed and of common use (firewood and pasture). Most peasants can survive with the help of an external job, while field production ismainly for self-consumption. During the last 20 years, capitalisation occured through the purchase of cattle. So, the number of animals is growing up and by consequence, the pressure on the natural pastures too, favouring the apparition and extension of* tepetates. *Breaking the* tepetates *to give them a new agricultural use means, in addition to technical help at the beginning, the creation and development of forage crops. Actually, this type of crops are not very common. It is also necessary to propose forest management and/or wood-fire plantations. The costs of this rehabilitation are too high (nearly 1,000 $/ha) for most peasants, in spite of the increasing value of the land after this works and a recuperation of the investment after 5 and 8 years in the production systems which use animal and mechanical tractions. So those investments requiere external help (State, NGOs, credits...) at the beginning.*

Keywords: *Mexico* - Tepetate - *Rural Community - Crops - Cattle - Land - Family Work - Agrosocioeconomy - Production Systems*

INTRODUCCIÓN

En el marco del programa de investigación UE-ORSTOM-CP-UAT-UG sobre la rehabilitación de los tepetates en México (Quantin, 1992), se hizo énfasis en los aspectos técnicos, agronómicos, edáficos, para convertir estos horizontes volcánicos endurecidos y

estériles en tierras productivas (Zebrowski *et al.*, 1992). Sin embargo, se carecía de elementos socioeconómicos, en particular en zonas situadas fuera del área de acción del programa (Navarro y Prat, 1996). Por ello, a través del trabajo de tesis de ingeniería de cuatro estudiantes de agronomía tropical del CNEARC de Francia se trató de tener una visión más global en cuanto al papel de los tepetates en la vida de las comunidades campesinas.

Los objetivos de estos estudios son: conocer las características y la historia agraria de la comunidad campesina, estudiar las características técnicas y socioeconómicas de los sistemas de producción de la comunidad, y determinar el impacto de los tepetates en la dinámica socioeconómica y las estrategias de funcionamiento de los sistemas familiares de producción.

El trabajo se centra en dos niveles de enfoque: por un lado, el estudio de la comunidad a nivel general, incluyendo el medio físico, el contexto histórico y económico, y por otro, un análisis más preciso de cada tipo de sistema de producción encontrado en la comunidad y sus inter-relaciones.

A pesar de ser estudios muy puntuales (se trata de comunidades de dos a cuatro mil personas), las comunidades seleccionadas, por sus condiciones ambientales, humanas y socioeconómicas, son representativas de sus entornos: Santa Catarina del Monte (Ly, 1993) en el valle de México, a unas pocas decenas de kilómetros de la capital; Tlalpan (Lepigeon, 1994) en el estado agrícola de Tlaxcala; Las Cruces (Faugère, 1995) en Los Altos de Jalisco, zona aislada, rural y sumamente pobre; El Pedregal y La Reunión (Alexandre, 1996) en el estado de Michoacán, situadas a aproximadamente 40 km de Morelia, capital del estado, en condiciones algo parecidas a las de Tlalpan.

METODOLOGÍA

Los estudios siguieron el patrón de la metodología de diagnóstico socioeconómico elaborada por la escuela francesa de agronomía, cuyas principales etapas son las siguientes:

Estudio bibliográfico

Estas informaciones permiten ubicar la comunidad en su contexto y se realizan paralelamente al trabajo de campo

Estudio del medio ambiente y observaciones del paisaje

La primera etapa del trabajo de campo consiste en observar el medio ambiente según el método de los transectos, y destacar las grandes zonas agro-ecológicas que conforman la comunidad. Se elabora un mapa de suelos, basado en la clasificación campesina local, complementada y comparada con los sistemas habituales de nomenclatura en edafología (USA, Francia). El análisis de mapas del INEGI y de fotografías aéreas de la zona complementan las observaciones del terreno. Esta primera etapa ayuda a comprender la organización de la actividad agrícola. Se observan asimismo los tipos de cultivos, la parcelación y las técnicas empleadas. Entrevistas informales y recorridos con campesinos permiten precisar estas observaciones.

Historia

Para comprender la situación actual y la dinámica social, es indispensable estudiar la historia de la comunidad y la evolución del sistema agrario. Estos datos se obtienen a partir de lecturas bibliográficas y de encuestas semi-abiertas a personas de edad de la comunidad.

Pre-tipología de los sistemas de producción

Las primeras encuestas, efectuadas a partir de una muestra razonada, revelan la diversidad de los sistemas de producción. Gracias a estos primeros resultados, a los elementos proporcionados por la historia agraria y con la ayuda de agricultores se establece una pre-tipología. Se seleccionan entonces campesinos en cada «pre-tipo». Las encuestas semi-abiertas reúnen informaciones sobre el medio ambiente y sus limitaciones (heladas, inundaciones, sequías, etc.), la composición familiar, el funcionamiento y la economía de la explotación, las diferentes parcelas, las técnicas y los medios de producción, etc. La comparación de las diferentes encuestas permite verificar los datos obtenidos.

Encuestas sistematizadas

A partir de toda la información recolectada y de la pre-tipología se efectúan las encuestas agroeconómicas detalladas. El número de encuestados es función de la importancia de cada grupo predefinido anteriormente, lo que se determina en parte con base en listas de los ejidatarios y en censos.

Caracterización de los diferentes sistemas de producción de la tipología

Esta última etapa consiste en analizar los sistemas de producción en su lógica y su funcionamiento. El conocimiento de las lógicas, técnicas y socioeconómicas permite plantear la problemática de uso de los tepetates y evaluar las condiciones y los límites de rehabilitación de estos horizontes endurecidos y estériles.

Cálculos económicos

Para cada entrevista, se trata de evaluar una serie de indicadores económicos, en particular el ingreso neto de cada explotación durante un año «normal». En este caso, los cálculos fueron realizados a partir de los resultados promedio de las explotaciones. Aquí se presentan los resultados expresados en pesos del año correspondiente.

Cada estudio se realizó en 4 a 5 meses de trabajo de campo. Durante ese período, los estudiantes vivieron en la comunidad, ya sea en una casa propia o con una familia. Cada dos a tres semanas, los asesores efectuaron una evaluación de los avances.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Medio ambiente

Las comunidades estudiadas se encuentran a lo largo del eje neovolcánico central, lo que corresponde al altiplano central mexicano (figura 1). Las altitudes varían entre 1.700 y 2.800 m.s.n.m. en lo que se refiere a la zona de cultivo, y entre 2.800 a 4.000 m.s.n.m. cuando se trata de bosques y praderas. Las tierras de las comunidades se extienden desde los piedemontes con relieve de lomas hacia las cúspides de la Sierra, en pendientes muy fuertes. No existen planicies.

La temporada de lluvia dura 6 meses (mayo a octubre), con precipitaciones que varían de 600 a 1.200 mm anuales. Hay un pequeño período con poca lluvia desde fines de julio hasta inicios de agosto. Las lluvias son irregulares tanto de un año al otro, como a lo largo de la estación lluviosa. Además, siempre existen posibilidades de heladas tardías (abril-mayo) o tempranas (septiembre-octubre) que pueden afectar a los cultivos e incidir en los rendimientos. Estos dos factores (lluvias irregulares y riesgos de heladas) hacen del cultivo de temporal (pluvial) un cultivo con altos riesgos.

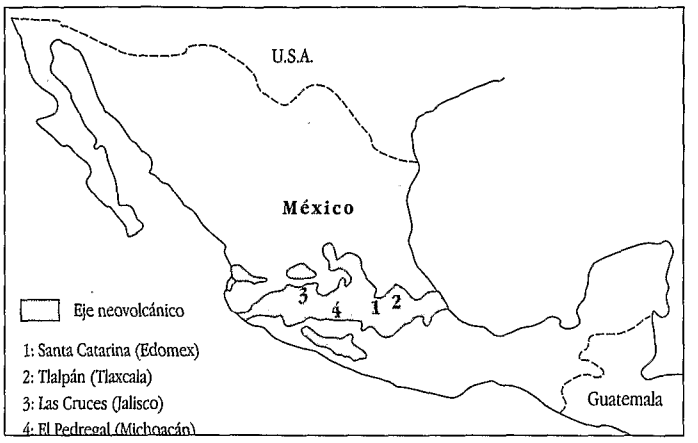


Figura 1
Localización de las comunidades estudiadas

Los suelos tienen un origen volcánico reciente (algunos miles de años). En las partes altas, con un clima templado y húmedo, se localizan los suelos ándicos. Los suelos con características vérticas están ubicados en las depresiones y a veces en las lomas, donde se encuentran por lo general los *fæozems*, los suelos fersialíticos y los brunisoles. Los tepetates, denominación vernácula de tobas volcánicas endurecidas y estériles, se encuentran en esos suelos a unos 50 cm de profundidad, a menos que afloren a causa de procesos erosivos, generalmente antrópicos. Su espesor varía de 0,2 a más de 2 m. Los suelos erosionados están presentes en todas las comunidades, y siempre a nivel de la ruptura de pendiente, es decir del piedemonte. Se trata de una erosión regresiva en cárcavas que pueden tener varias decenas de metros de profundidad.

Historia

Aparte del caso de Los Altos de Jalisco donde los pueblos indígenas (Chichimecas) eran cazadores-recolectores, los demás pueblos vivieron, a lo largo del último milenio antes de la conquista, en una sociedad agrícola muy avanzada. En el valle de México y de Tlaxcala por ejemplo, ya se utilizaba el riego y el terraceo. La llegada de los españoles, además de traer la muerte (una décima parte de la población sobrevivió) y la destrucción de los antiguos imperios, condujo a un cambio drástico de la sociedad. La nueva era española no conllevó solamente la introducción de nuevos cultivos, de animales, del arado, etc., sino también un nuevo sistema de uso y tenencia de la tierra así como de explotación de los hombres, a través de las encomiendas y haciendas.

Hay que esperar los inicios de este siglo, la revolución y el reparto agrario, principalmente durante los años 1930 a 1950, para que se generen las bases del campo mexicano que conocemos hoy en día. La reforma del artículo 27 de la Constitución (posibilidad de vender las tierras de un ejido*) en 1993 no ha cambiado drásticamente, hasta ahora, la distribución entre tierras privadas, ejidales y comunitarias (cuadro 1).

Sin embargo, a lo largo de 3 ó 4 generaciones de campesinos, la sucesión generacional en los ejidos ha significado una división cada vez mayor de la tierra y consecuentemente un tamaño cada vez menor de la superficie disponible. Las comunidades tratan de resolver tal falta de tierras de manera bastante similar, como se verá más adelante.

Comunidad	Ejido	Bienes comunales	Pequeña propiedad	Superficie promedio/activo*	Superficie con riego	Población
Sta. Catarina (Edomex)	700 ha (30 %) 250 c / 450 b	1.736 ha (70 %) 900 c / 836 b	0	0,5 ha	200 ha (15 %)	3.400
Tlalpán (Tlaxcala)	737 ha (100 %) 737 c / 0 b	0	0	5 ha	0	800
Las Cruces (Jalisco)	2.112 ha (71 %) 1.300 c / 542 a / 270 b	0	855 ha (29 %)	3 ha	0	1.000
El Pedregal (Michoacán)	1.200 ha (70 %) 690 c / 40 a / 470 b	0	400 ha (30 %)	2 ha	0**	1.000

* En promedio, hay 3 activos por explotación.

** Hace 20 años, se abandonaron 60 ha de riego a causa del crecimiento poblacional que obligó a usar el agua para el consumo.

Cuadro 1 - Tenencia de la tierra en superficie (ha) y porcentaje (%) así como su repartición en hectáreas de cultivos (c), bosques (b), agostaderos (a), de las cuatro comunidades estudiadas

Ciertas familias pudieron beneficiarse de dotaciones sucesivas del ejido, mientras otras fueron excluidas. Unas lograron cierto nivel de capitalización no solamente por tener más y/o mejores tierras, sino también gracias al dinero obtenido fuera de la explotación, ya sea en el país o en el extranjero. También hay casos de campesinos que emprendieron nuevos tipos de actividad (flores, frutas, artesanía, música, comercio, etc). que les permitieron a veces salir adelante.

Tenencia de la tierra

En todas las comunidades se encuentra una mayoría de campesinos que poseen sus tierras bajo tenencia ejidal. Santa Catarina (Edomex) es la única comunidad que dispone de bienes comunales. Estas tierras se encuentran en las partes altas de a comunidad, es decir en la sierra boscosa, por encima de los 2.800 m.s.n.m. En cuanto a la pequeña propiedad, formalmente solo existe en Las Cruces (Jalisco) donde representa casi la mitad de la superficie, lo que se debe principalmente a la forma peculiar de entrega de las tierras de Los Altos de Jalisco después de la Conquista.

Es importante recalcar que las superficies cultivadas en las 4 comunidades estudiadas son bastante pequeñas, siendo una minoría de campesinos la que dispone de más de 8 ha (cuadros 2 a 5). De allí la importancia del área del ejido que tiene un uso comanditario (bosques, agostaderos). Se aprovecha tanto la madera (principalmente para la leña) como las demás plantas para el pastoreo del ganado. Tlalpan no dispone de tal área pues en 1992 se roturaron las últimas 200 ha de agostaderos para darles un nuevo uso agrícola y poder entregar una dotación de tierras a los jóvenes ejidatarios.

El hecho de tener superficies tan reducidas implica dificultades para alcanzar la autosuficiencia alimenticia y económica. Es por lo tanto indispensable encontrar otros ingresos. A lo largo de los años, muchas veces tal fuente exterior se convirtió en el origen principal de ingresos mientras que los generados por el campo pasaron a un segundo plano.

Obviamente, se entregaron las mejores tierras al momento de la primera dotación y a medida que pasa el tiempo, la calidad de las tierras atribuidas va empeorando. Actualmente, los agostaderos corresponden a zonas con fuertes pendientes y/o piedras y/o

tepetates aflorantes y/o con una erosión hídrica regresiva de gran intensidad. Son por supuesto estas tierras las que se reparten al último.

Categorías de campesinos	Actividades agropecuarias principales	Rendimientos (t/ha)	Superficie cultivada (ha)	Trabajo agrícola familiar	Observaciones	Ingreso anual agrícola neto/activo	Proporción entre las categorías
Pequeños campesinos							
• sin animales	cereales, maíz, leguminosas, hortalizas	0,3 a 2,0 M 0,2 a 0,5 C	< 0,5	medianamente importante	alquilan su fuerza de trabajo	0 a 2.000	65 %
• con animales	id. + cerdos, aves de corral	id.	≥ 0,5	poco	id.	0 a 2.500	25 %
Campesinos medianos	maíz haba trigo/cebada	0,3 a 0,6 M 0,3 a 0,7 H 0,8 a 1,3 T	0,5 - 1 + pastos	medianamente importante	aves de corral	3.000 a 5.000	5 %
Horticultores							
• intensivos	cultivo de flores		< 0,5	importante		5.500 a 9.000	5 %
• extensivos	id. + maíz	2 a 3,3 M	≥ 0,5	poco	maíz con riego y pluvial	6.000 a 9.000	

M: maíz; C: cereales (distintos al maíz); H: haba; T: trigo

Cuadro 2 - Tipología de los productores de Santa Catarina del Monte, Edomex, 1993
Sueldo mínimo anual en 1993: 6.000 pesos

Categorías de campesinos	Actividades agropecuarias principales	Rendimientos (t/ha)	Superficie cultivada (ha)	Trabajo agrícola familiar	Observaciones	Ingreso anual agrícola neto/activo	Proporción entre las categorías
Pequeños productores de maíz:							
• sin animales	maíz	0,2 a 1,2	≤ 4	medianamente importante	medios de producción limitados	0 a 200	52 %
• con animales	id.	id.	id.		id. + puercos, 1 a 2 vacas	350 a 1.000	10 %
Productores de maíz + trigo/cebada:							
• sin animales	maíz + trigo/cebada	0,5 a 1,7	≥ 8	poco	posee yunta	200 a 500	11 %
• con animales	id.	0,5 a 2,0	id.	id.	+ lecheras, puercos/corderos	1.200 a 4.000	10 %
Mecanizados	maíz	1,9	≤ 10 ha	poco	tractor en copropiedad alquiler de su tractor	250 a 800	11 %
	trigo/cebada	2 a 3	≥ 10	poco	alquiler de tierra alquiler de su tractor	1.200 a 3.000	6 %

Cuadro 3 - Tipología de los productores de Tlalpan, Tlaxcala, 1994
Sueldo mínimo anual en 1994: 1.000 pesos

Tipología de los sistemas de producción

La superficie de cada rancho así como la calidad de las tierras explican parcialmente las lógicas de funcionamiento de los sistemas de producción. Por ello, la tipología de los sistemas de producción se estableció en parte con estos parámetros (superficie cultivada y suelos) pero sobre todo según el grado de mecanización (cantidad y tipo de maquinaria), de tecnificación (frecuencia de uso y cantidades de fertilizante), el tipo de ganadería y el trabajo familiar.

La mayoría de los sistemas de producción combinan cultivos con ganadería. En términos de superficie cultivada, el monocultivo de maíz va de la mano con la asociación

maíz-frijol, que, en ocasiones, incluye la calabaza. En el caso de explotaciones mecanizadas, se siembra el maíz solo, ya que el uso del tractor y de los herbicidas impide el desarrollo de otros cultivos.

La gran mayoría de campesinos poseen animales: de uno a dos en el caso de los pobres a varias decenas tratándose de los más ricos. Este ganado es para carne, aunque de forma muy ocasional, parte de la leche se usa para autoconsumo. A menos que se utilicen tractores, se emplean los animales para los trabajos de campo (arado y transporte de cargas). Los más pobres, que carecen de medios de producción, rentan una yunta y/o efectúan todos los trabajos manualmente.

Desde hace varios decenios, el número de animales no ha dejado de crecer, determinado un cambio en el uso de los residuos de cosecha y de los suelos. Ya casi no se dejan los residuos en el campo sino que se dan a los animales o se venden. Poco a poco, se generaliza el sistema de pastura seca molida. Por otro lado, a excepción de algunos grandes propietarios, son muy pocos los campesinos que siembran cultivos dedicados exclusivamente a sus animales. Las áreas de uso común de los ejidos o de bienes comunales (agostaderos y bosques) tienen que soportar cada año cantidades mayores de animales, degradándose cada vez más.

Hay campesinos que se dedican a producciones muy específicas: flores en Santa Catarina, pulque en Tlalpan, tomates verdes (*Physalis*) y flores en Las Cruces, frutales (duraznos y aguacates) y recolección de la sabia de los pinos en El Pedregal. El alquiler de maquinaria (tractor, molino de pastoreo, etc.), de yunta y de transporte son elementos igualmente importantes que hay que tomar en cuenta en la tipología. La mayoría de estos productores pudieron efectuar una fuerte inversión en su campo porque lograron conseguir dinero fuera de su comunidad.

Resultados económicos

Los resultados económicos muestran que la mayor parte de los campesinos no logran alcanzar el equivalente del sueldo mínimo que, de por sí cubre solamente la mitad del valor de la canasta básica de una familia mexicana promedio.

Es importante subrayar que no son siempre los que tienen más maquinaria y/o más tierras los que obtienen mayores ganancias. En efecto, los campesinos muy mecanizados soportan una inversión muy fuerte, a veces desproporcionada en relación a la cantidad de trabajo que pueden efectuar. También son ellos los que tienen mayores créditos, lo que explica su delicado equilibrio financiero.

Los campesinos más pobres, que carecen de medios de producción, son agricultores de edad o familias cuyos hombres salen a trabajar fuera de la comunidad o como peones.

Finalmente, los que logran alcanzar cierto equilibrio económico, pero con un bajo nivel de vida son aquellos que poseen algunos animales, unos cuantos equipos (arado, pulverizador, etc.), alrededor de 2 a 5 ha y tienen una producción diversificada. Entre ellos se cuentan también los productores innovadores, que se dedican a la producción de frutas, hortalizas o flores, a la compra/venta de animales, etc. y que generalmente tienen buenos ingresos.

Pese a que por lo general, el valor agregado por animal no es muy elevado en los ranchos estudiados, el crecimiento del número de animales es constante, como ya se lo señaló, pues el ganado siempre es un capital importante y fácilmente convertible en efectivo. Además, las producciones animales son menos aleatorias que los cultivos y garantizan entradas de dinero a todo lo largo del año.

Categorías de campesinos	Actividades agropecuarias principales	Rendimientos (t/ha)	Superficie cultivada (ha)	Trabajo agrícola familiar	Observaciones	Ingreso anual agrícola neto/activo	Proporción entre las categorías
Pequeños campesinos sin o con pocos medios	maíz - frijol calabaza	0,3 a 2,5 M 0,1 a 0,3 F	1 - 2	poco	campesinos viejos sin o con una vaca, tierras prestadas o a medias	300 a 3.000	20 %
Con tierras y que cultivan con yunta	maíz solo + maíz-frijol calabaza + tomate verde	2,5 2,4 a 4,0 M 0,2 a 0,5 F 5 - 20	2 - 7 0,5 - 1 1 - 2	importante	2 - 7 vacas	3.500 a 18.000	35 %
Alquiler tractor • con pocos animales	maíz solo maíz - frijol	2,5 2,7 a 3,5 M 0,1 a 1,0 F	3 - 8 + 1 - 2	poco	2 - 7 vacas	3.000 a 12.000	25 %
• con muchos animales	maíz solo maíz - frijol + tomate verde	2,5 2,8 a 3,0 M 0,0 a 0,2 F 5 - 20	3 - 8 + 1 - 2 2 - 4	poco	15 - 30 vacas 10 - 30 ha de agostaderos	3.000 a 8.000	10 %
Mecanizados • con pocos animales	maíz semilla + tomate verde	3,2 5 - 20	14 - 20 2 - 4	poco	5 vacas 10 - 30 ha de agostaderos	8.000 a 16.000	6 %
• con muchos animales	maíz semilla + maíz forrajero	3,2 15 - 20	35 - 130 2 - 4	poco	10 - 30 vacas 20 - 40 ha de agostaderos	8.000 a 16.000	4 %

Cuadro 4 - Tipología de los productores de Las Cruces, Jalisco, 1995
Sueldo mínimo anual en 1995: 5.000 pesos

Haciendo el balance de los ingresos económicos, es obvio que la gran mayoría de campesinos se puede mantener únicamente gracias a una fuente exterior de ingresos. Esta puede ser el trabajo en los USA, legal o ilegal, de temporada corta (algunos meses) o larga (algunos años), de un miembro de la familia que regresa o que permanece fuera. Puede tratarse también de trabajo dentro o fuera de la comunidad (albañilería, artesanía, etc.). El alquiler de equipos (tractor, yunta, molino, etc.) o la posesión de un vehículo que permita transportar y vender mercancía en zonas alejadas evitando a los intermediarios y consiguiendo así mayores márgenes de ganancia, son también medios importantes de obtener ingresos.

La proximidad de ciudades favorece el trabajo fuera del campo, logrando convertir a veces (en particular en Santa Catarina) el trabajo de campo en actividad de fin de semana, mientras que en zonas aisladas, los pobres no tienen otra opción que marcharse del pueblo para buscar un trabajo fuera. Regresan únicamente para las principales labores que requieren mano de obra (preparación de la tierra, siembra y cosecha), dejando a los que quedan (mujer, niños y ancianos) la tarea del mantenimiento de los cultivos.

Otro efecto de la proximidad de grandes urbes es un cambio en el valor de la tierra: de agrícola se convierte en urbana, multiplicándose su valor monetario. En este caso, también es conveniente tranformar un tepetate aflorante en un suelo fértil ya que las casas requieren de un solar productivo.

CONCLUSIÓN

Las comunidades estudiadas, pequeñas por su superficie y población, son rurales. El medio ambiente es difícil, por la escasez e irregularidad de las lluvias, las heladas, las

Categorías de campesinos	Actividades agropecuarias principales	Rendimientos (t/ha)	Superficie cultivada (ha)	Trabajo agrícola familiar	Observaciones	*Ingreso anual* agrícola neto/activo	Proporción entre las categorías
Peones sin yuntas con pocas o sin tierras	maíz - frijol - *calabaza*	0,2 - 1,2	≤ 0,5	poco	alquilan su fuerza de trabajo cultivos intensos del solar	200 - 1.500	14%
Medieros sin yuntas con algo de tierras	M - Ca - F, haba, avena, trigo + algunos frutales		1,5	importante	trabajo fuera del pueblo, 1 - 2 vacas, 3 - 4 puercos	2.000 - 7.000	35%
Pequeños propietarios							
• con pocos animales	id. + 10 - 50 frutales	M: 1,8 - 2,3 Ca: 0,1 - 0,2 F: 0,3 - 0,4 H: 1 - 1,5	4 - 7 M-F-Ca: 1-5 M-Ca: 1-2 H: 0,5 - 1,5	importante	equipos + camioneta; alquila tractor ocasionalmente; 1 - 4 vacas; engorde de 2 - 15 cerdos	6.000 - 11.000	30%
• con animales de engorde	id. + maíz forrajero + 10 - 80 frutales	M: 2 - 2,5 Ca: 0,2 - 0,3 F: 0,3 - 0,5 H: 1 - 1,5	6 - 12 M-F-Ca: 3 - 7 M-Ca: 1 - 2 H: 0,5 - 1,5	importante	equipos + camioneta; alquila tractor ocasionalmente; 10 - 30 (hasta 100) novillos de engorde	8.000 - 13.000	5%
Campesinos comerciantes (compra-venta) animales	id. + frutales	M: 2 - 2,5 Ca: 0,2 - 0,3 F: 0,3 - 0,5 H: 1 - 1,5	2 - 12 M-F-Ca: 3 - 7 M-Ca: 1 - 2 H: 0,5 - 1,5	poco	equipos + camioneta; alquila tractor ocasionalmente; compra-venta 100 - 500 *terneros (no es engorde)*	7.000 - 15.000	5%
Campesinos con una gran producción de frutas	id. + frutales (duraznos, aguacates)	M: 2 - 2,5 Ca: 0,2 - 0,3 F: 0,3 - 0,5 H: 1 - 1,5	6 - 10 M-F-Ca: 3 - 7 M-Ca: 1 - 2 H: 0,5 - 1,5	importante	*equipos + camioneta; alquila* tractor ocasionalmente; 1 - 4 vacas	8.000 - 14.000	10%

M: Maíz; Ca: Calabaza; F: Frijol; H: Haba

Cuadro 5 - Tipología de los productores de El Pedregal, Michoacán, 1996
Sueldo mínimo anual en 1996: 7.700 pesos

pendientes y la presencia de los tepetates aflorantes o cercanos a la superficie. Hay que anotar también la ausencia casi total de sistemas de riego.

Las tierras son en su gran mayoría ejidales. Su división ha hecho que, hoy en día, las superficies por familia sean pequeñas. En cuanto a las tierras disponibles para nuevas distribuciones y/o ventas son también escasas, y sobre todo de mala calidad. En efecto, siempre están erosionadas, tienen pendientes muy fuertes y/o presentan tepetates aflorantes.

Además de la escasez de tierras, es importante señalar que aquellas disponibles tienen generalmente un uso pecuario. Desde hace aproximadamente 20 años, el número de animales está creciendo, y por lo tanto, la presión sobre los agostaderos y el bosque también. A causa de la sobrecarga de ganado en relación a las limitadas capacidades del medio, se genera y aumenta la erosión de los suelos, favoreciendo así la aparición y extensión de los tepetates. De hecho, estos se encuentran casi siempre en las zonas de uso común, principalmente en los agostaderos.

Sin embargo, convertir las tierras erosionadas (por lo general con tepetates aflorantes) en tierras aptas para los cultivos genera una triple problemática:

- supresión de los agostaderos que son también zonas de producción de leña para toda la comunidad;
- supresión de los agostaderos cuando, frente a la crisis, el ganado es cada vez más importante para los campesinos en términos de capital;
- necesidad de producir alimentos para los animales cuando ya no hay muchas tierras disponibles, ni medios para hacerlo.

Justamente, las perspectivas parecen orientarse hacia el crecimiento de la actividad ganadera. Eso no significa el fin del cultivo de maíz, sino más bien una mayor integración cultivo-ganadería, lo que implicaría la siembra del maíz como cultivo forrajero. Asimismo, otros cultivos forrajeros como el sorgo, el trébol, la alfalfa y gramíneas permiten un claro mejoramiento de la calidad de los agostaderos. En ciertas regiones, estos cultivos están sembrados entre los pies de las plantas de maíz.

La mayoría de los campesinos no tienen muchos recursos y tampoco logran sacar mucho de sus tierras. Al parecer, siembran y guardan sus tierras más como una seguridad que en una perspectiva de desarrollo agrícola, ya que la gran mayoría obtiene mayores ingresos fuera de la comunidad. Por ello, no hay inversiones ni voluntad o capacidad de invertir. Para la mayor parte, los costos de rehabilitación son demasiado elevados (alrededor de 1.000 US$/ha con el apoyo estatal en Tlaxcala y el triple en privado), aunque el valor de la tierra aumenta considerablemente y se puede amortizar la inversión en 5 a 8 años en los sistemas de producción que usan yuntas y/o tractores. Esta inversión, importante, implica necesariamente al inicio, una colaboración financiera exterior (Estado, ONG, etc.). Actualmente, en el estado de Tlaxcala por ejemplo, el gobierno local ofrece la maquinaria y la comunidad debe cubrir los gastos de operación.

Roturar los tepetates de los agostaderos de los ejidos para convertirlos en tierras fértiles implica terminar con la última frontera agrícola interna a cada comunidad. Por ello, no se se trata solo de distribuir tierras: hay que pensar en cada comunidad y analizarla en toda su complejidad, ya que la supresión de los agostaderos afecta a la comunidad entera.

* Ejido: Forma institucionalizada de posesión de tierra que consiste en una concesión de un terreno, hecha por el gobierno a un grupo de personas para que la trabajen y obtengan los beneficios de su explotación. Según señala la Ley, hasta la reforma mencionada, tales tierras no podían ser vendidas, rentadas ni hipotecadas. Sin embargo, existían arreglos monetarios entre los ejidatarios.

Referencias bibliográficas

ALEXANDRE, J-L., 1996: *Étude d'une communauté paysanne de l'État du Michoacán (Mexique)*, Rapport d'ESAT 1, CNEARC, Montpellier, France, 70 p.

FAUGÈRE, G., 1995: *Étude d'une communauté paysanne de l'état de Jalisco (Mexique)*, Rapport d'ESAT 1, CNEARC, Montpellier, France, 70 p.

LEPIGEON, I., 1994: *Structures agraires de l'*ejido *Tlalpan, État de Tlaxcala, Mexique*, Rapport d'ESAT 1, CNEARC, Montpellier, France, 70 p.

LY, B;-T., 1993: *Évolution d'un système agraire péri-urbain et études des systèmes de production de la commune de Santa Catarina del Monte*, Rapport d'ESAT 1, CNEARC, Montpellier, France, 70 p.

NAVARRO, H.; PRAT, C., 1996: Habilitación agrícola de los tepetates de los valles de México y de Tlaxcala., en *El campo mexicano: una modernización a marchas forzadas*, P. Bovin (editor), CEMCA-ORSTOM, México, p. 253-291.

QUANTIN, P.; ARIAS H.M.; ETCHEVERS, J. D.; FERRERA-CERRATO, R.; OLESCHKO, K.; NAVARRO, H.; WERNER, G.; ZEBROWSKI, C., 1993: *Terra,* Vol. 11 (número especial: Tepetates de México, caracterización y habilitación para la agricultura), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, 72 p.

ZEBROWSKI, C.; PRAT, C.; ETCHEVERS, J.; ARIAS, H.; MIRANDA, M.E., 1992: *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, 572 p.

Uso de recursos, rentabilidad y sustentabilidad en los Sistemas Económicos Familiares (SEF)

Salvador Muñoz A., Hermilio Navarro G.

Abstract

A comparison between common agricultural and tepetate *soils of Santiago Tlalpan (Mexico) was made to assess the socio-economic and productivity strategies that the farmers are using with different resources and means of production. A typology of the productivity units has been achieved. Farmers with the largest properties produce more crops for the local market (not only for self subsistence), make the best use of resources and obtain the highest profitability.*

Keywords: *Family Economic System* - Tepetate

INTRODUCCIÓN

Los tepetates o suelos endurecidos ocupan una gran superficie en los países de América Latina. En México, algunos estados, sobre todo los que se sitúan sobre el eje neovolcánico, como Tlaxcala, Puebla, Hidalgo, México, etc., presentan grados de erosión desde incipientes hasta muy severos. Los productores del ejido de Tlalpán (Tlaxcala), zona del estudio, carecen de suficientes tierras aptas para el cultivo, viéndose obligados a cultivar, pese a las restricciones de sus aptitudes productivas, en horizontes erosionados, ya que es la única forma de aumentar la superficie cultivable. En este ejido, los campesinos cultivan productos básicos sobre tepetate, utilizando estrategias en el manejo técnico para hacerlo productivo como el suelo normal. Conocer las estrategias y lógicas productivas que los agricultores practican cuando se tiene suelo normal y tepetate, y cuando los recursos y medios de producción no están disponibles en la misma proporción para todos, son los objetivos del presente trabajo de investigación.

Para alcanzar tales objetivos se evaluaron, al interior de diferentes Sistemas Económicos Familiares (SEF), la complejidad en el manejo de los recursos, sus estrategias productivas y organizativas, el patrón y la rotación de los cultivos, los diferentes manejos técnicos así como los costos de producción, la rentabilidad y la sustentabilidad agropecuarias.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó con 32 ejidatarios (o SEF) que trabajan en suelo normal y tepetate, para hacer una comparación entre tipo de substratos y productores. Este estudio se desarrolló en tres fases.

Fase 1

En un principio, se realizaron revisiones bibliográficas de la región con visitas continuas de reconocimiento y se elaboraron encuestas de acuerdo a los objetivos planteados para la investigación.

Fase 2

En esta etapa, se inició el trabajo de campo que consistió en visitar a los agricultores y registrar todas las actividades realizadas en el proceso de producción agropecuaria, sus fechas y sus costos. Asimismo, se registraron aspectos socioeconómicos relacionados con el sector agrícola y las unidades de producción, y se estimaron rendimientos a través de encuestas.

Los costos que se presentan consideran todas las actividades realizadas por los productores y dentro de cada una de ellas el costo de los insumos, de la tracción (mecánica y/o animal) y de la mano de obra asalariada y/o familiar. En el caso del tractor propio, se multiplicó el costo de la actividad realizada por 0,7 para obtener el costo real —según estudios de Fideicomisos Instituidos en Relación a la Agricultura (FIRA)—. El costo de la materia orgánica no se cuantificó puesto que fue utilizada por muy pocos productores y además generada por las propias unidades de producción pecuaria. No se consideró tampoco el costo por renta de la tierra ni el pago por el trabajo de las parcelas «al tercio». Lo que sí se cuantificó de alguna manera fueron los costos de gestión y supervisión que el agricultor asume a todo lo largo del proceso de producción agrícola.

Fase 3

Proceso de análisis y sistematización de la información. Se partió de lo general para ir a lo particular y finalmente conformar una matriz de 25 variables con características particulares de los SEF y complementarla con un análisis estadístico multivariable a través del método de componentes principales-conglomerados (Cluster). Esto permitió establecer una tipología de productores sustentada en el método de Word's el cual diferencia 3 grupos que se destacan en el dendrograma resultante. Esta tipología es el eje principal de análisis general del trabajo de investigación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización general de los SEF

Las superficies sembradas en total y en las parcelas que integraron la muestra se presentan en los cuadros 1 y 2, donde se observan el patrón de uso del suelo en los substratos y la tendencia de los agricultores a variar su estrategia agrícola de acuerdo a la superficie total disponible, orientada prioritariamente a la producción de maíz y trigo.

Las unidades de producción poseen una superficie en propiedad ejidal promedio de 8,6 ha y una superficie sembrada total promedio de 9,1 ha de las cuales 4,6 son de maíz, 4 de trigo y 0,5 de otro cultivo. Además, poseen en promedio 0,84 ha de tepetate cultivado.

La superficie varía considerablemente de un productor a otro, existiendo algunos que poseen más de 25 ha frente a otros que únicamente cuentan con 2 ha cultivadas. La superficie total de los 32 productores representa el 41 % de la superficie agrícola total del ejido. El tepetate ha jugado un papel muy importante porque ha permitido la extensión de la frontera agrícola.

Cuadro 1
Superficie sembrada en suelo agrícola, en tepetate y total (en ha)

Cultivos	en suelo agrícola	en tepetate	superficie total
maíz	125,2	23	148,2
trigo	122,3	4	126,3
cebada	12	0	12
otros	5	0	5
Total	264,5	27	291,5

Los medios de producción disponibles en los SEF están directamente relacionados con la superficie sembrada total por unidad de producción. En efecto, existen agricultores que disponen de una superficie reducida y que realizan sus procesos de producción en forma tradicional o combinada. Se caracterizan por la utilización de tracción animal para llevar a cabo todas o parte de las labores. Así, el 68,8 % de los productores dispone de una yunta, el 34,4 % de un tractor agrícola, el 28,1 % de una yunta y un tractor y el 56,3 % de un camión y/o camioneta que utiliza para transportar insumos y todo lo necesario para el proceso de producción.

La actividad pecuaria en el ejido es una actividad complementaria a la agrícola. La mayoría de los agricultores (84 %) la lleva a cabo y posee en promedio 1,93 bovino, 4,8 borregos, 8,8 aves y 0,7 equino, lo que finalmente corresponde a un valor monetario pecuario disponible de 5.146 pesos por SEF, que, en algún momento, puede resolver un problema económico. Además, las unidades de producción se benefician con los productos y subproductos correspondientes. Los SEF que no poseen ganado se ven obligados a vender su fuerza de trabajo para poder comprar los productos provenientes del ganado.

El manejo del ganado es rústico y de traspatio (solar). Se aprovecha parte de los esquilmos de la cosecha, de los granos producidos y del forraje generado en las parcelas durante el ciclo agrícola. Para el pastoreo, se utiliza el pasto que crece en las orillas de las parcelas y en los caminos del ejido.

El destino de la producción agrícola es muy variable en el caso de los cultivos más importantes. Tratándose del maíz, el 74 % de los productores lo deja totalmente para autoconsumo y los demás venden una pequeña parte. El 95 % de la producción de trigo se orienta hacia el mercado y el 5 % restante se destina para semilla o alimento para el ganado. Cabe anotar que el trigo es el punto de enlace entre el productor y el mercado local y regional.

Los diferentes grupos de SEF

Para entender mejor el comportamiento y las estrategias de los SEF, se realizó el análisis multivariable y el dendrograma resultante arrojó 3 grupos de productores bien diferenciados (cuadro 2): grupo I, «productores pequeños»; grupo II, «productores medianos»; grupo III, «grandes productores».

Cuadro 2
Grupos de productoires y superficie sembrada promedio en suelo normal y en tepetate (en ha)

Grupo	N° productores	Superficie propia ejidal	Superficie sembrada en suelo agícola en 1995			Superficie sembrada en tepetate
			M	T	otro	maíz/trigo
I	11	6	3,3	0,2	0	0,96
II	17	8,52	4	4	0,8	0,78
III	4	16	11	14	1	0,81
promedio general	32	8,6	4,6	4	0,5	0,84

El 97 % de los agricultores, independientemente del grupo al que pertenezcan, cultiva maíz. La superficie promedio por productor que cultiva este grano es de 4,6 ha. Los agricultores que poseen una superficie mayor sembraron cultivos comerciales, prioritariamente trigo porque no tiene problemas de enfermedades como es el caso de la cebada.

La superficie disponible en cada uno de los grupos presenta un comportamiento ascendente del I al III, siendo este último el que dispone de mayor superficie cultivada en el ciclo agrícola estudiado. Los agricultores de los grupos II y III son los que más superficie destinan a la producción de cultivos comerciales como el trigo. Cabe mencionar también que todos los agricultores poseen una superficie agrícola con tepetate de aproximadamente 0,84 ha en promedio. Asimismo, se observa que los productores del grupo III disponen de una superficie sembrada 3 a 4 veces superior a la de los demás, destinando mayor superficie al cultivo de trigo comercial. Los del grupo II poseen una superficie sembrada equilibrada entre maíz y trigo, mientras los del grupo I cultivan la mayor parte de la superficie disponible con maíz para autoconsumo. En general, se puede afirmar que los agricultores de los grupos I y II destinan la mayor superficie a productos básicos de autoconsumo, contrariamente a los del grupo III que destinan la mayor parte a cultivos comerciales.

La distribución de los medios de producción disponibles en los SEF es similar a la de la superficie sembrada (cuadro 3).

Grupo	Yunta (%)	Tractor (%)	Yunta/ tractor (%)	Camión/ camioneta (%)
I	36,4	0	0	18,2
II	94,1	41,2	41,2	70,6
III	50	100	50	100
promedio general	68,8	34,4	28,1	56,6

Cuadro 3
Medios de producción disponibles según los grupos

Del cuadro 3 se desprende que el grupo III se encuentra totalmente capitalizado o dispone de la mayor parte de los medios de producción y de transporte necesarios para llevar a cabo de manera eficiente los procesos de producción. El grupo II presenta ligeras tendencias de diferenciarse del grupo I acercándose al III.

En los grupos de productores es necesario señalar que en el ejido el crédito es otorgado por 3 instituciones de desarrollo del gobierno federal y del Estado: FIRA, Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) y Fideicomisos de Inversión para el Desarrollo Rural (FIDER). Cabe resaltar que SEDESOL otorga el «crédito a la palabra» y que sustituyó de manera parcial a otras instituciones financieras del agro privadas o gubernamentales (FIRA y BANRURAL). El objetivo principal es sanear de alguna manera la inmensa cartera vencida de los productores en la banca privada. Este sistema permitió financiar (máximo 3 ha por productor), sin aplicar ningún interés, a los agricultores sin deuda o que renegociaron la suya. Es interesante resaltar que los productores que poseen mayor superficie sembrada son los que se han favorecido con el financiamiento y los que mayor deuda tienen (cuadro 4).

Finalmente, se debe mencionar que solo un productor del grupo II pagó asistencia técnica privada y también aseguró su producción de trigo contra siniestros. Estableció además un contrato de compra-venta de todo el trigo con un molino privado de Puebla.

Grupo/Estrato	Poseen crédito 1994 (%)	Poseen crédito 1995 (%)	Poseen cartera vencida (%)	FIRA (%)	FIDER (%)	SEDESOL (%)
I	9	9	9	0	0	9
II	41,2	17,6	58,8	35	12	12
III	50	0	50	50	50	0
promedio general	31,3	12,5	40,6	25	6,3	9,4

Cuadro 4 - Crédito agrícola, cartera vencida y apoyo institucional en los diferentes grupos

Rendimientos de los cultivos

Según los productores, los rendimientos son comparables en suelo normal y en tepetate, aunque algunas veces los trabajos técnicos realizados (como fertilización y control fitosanitario) pueden ser diferentes. Cabe señalar que para el ciclo primavera-verano de 1995 se presentaron problemas agroclimáticos como lluvias tardías y heladas tempranas, que redujeron los rendimientos normales de los cultivos hasta un 50 % (cuadro 5).

Cuadro 5 - Rendimientos obtenidos en maíz y trigo (t/ha)

Grupo	maíz	trigo
I	0,54	0,95
II	0,72	1,09
III	1,30	1,35

El rendimiento es una variable muy importante para los productores dado que de él depende la reproducción del sistema de economía familiar de la unidad de producción. De manera específica, se observa un incremento del rendimiento del grupo I al III. Este último es el que posee los mayores valores debido al cuidado y al buen manejo técnico durante el ciclo productivo.

Costos de producción en los SEF

El costo total promedio de producción del maíz es de 1.507 pesos por ha y el del trigo de 1.167,8, ambos en suelo normal. En tepetate, el maíz tiene un costo de 1.425 pesos/ha y el trigo de 1.248. Para ambos cultivos, la diferencia en costos de producción entre suelo agrícola y tepetate es reducida, pues los agricultores no realizan un trabajo técnico específico en parcelas de tepetate. Incluso, algunas veces, simplifican el trabajo técnico sin realizar labor de preparación del suelo ni aplicar fertilizante o reduciendo las cantidades aplicadas.

Para el resto de los cultivos, no se presentan los costos por existir poca información.

Cabe destacar que los menores costos de producción corresponden al trigo, tanto en suelo normal como en tepetate, siendo el menor en el primer caso. El mayor costo de producción por hectárea corresponde al maíz cultivado en suelo normal.

En la estructura de costos totales de producción para el maíz y el trigo, se observan diferencias muy ligeras entre los grupos. Sin embargo, en el caso del grupo III, la producción

se realiza en mejores condiciones considerando que los agricultores se dedican exclusivamente a esta actividad todo el año.

Grupo	Costos de producción en suelo agrícola		Costos de producción en tepetate	
	maíz	trigo	maíz	trigo
I	1.505,1	1.357,4	1.473,8	-
II	1.489,1	1.153,3	1.463,6	1.278
III	1.573,5	1.123,7	1.338,6	1.218,1
Promedio general	1.507,1	1.167,8	1.425,3	1.248,1

Cuadro 6
Costos de producción de los cultivos en los grupos (pesos/ha)

En el cuadro 6 se observa que los costos de producción del maíz no varían significativamente. En suelo normal, el grupo II es el que presenta los menores costos y el grupo III los mayores. Sucede lo contrario en substrato de tepetate. Tratándose del trigo, es en el grupo III donde los costos son menores y ello en ambos tipos de suelo. El grupo I en cambio presenta los mayores costos en suelo normal.

La productividad de los suelos puede ser similar en tepetate y suelo normal, bajo condiciones técnicas muy específicas que implican altas dosis de fertilización y un buen régimen de lluvias para lograr un significativo rendimiento en grano y recuperar mínimamente la inversión realizada.

Análisis de ganancia y rentabilidad en los grupos de productores

Los costos permiten determinar el nivel de ganancia que se obtiene en cada grupo para el presente ciclo agrícola.

La rentabilidad se evaluó a partir del índice (ganancia/costos de producción) y de la ganancia (valor de la producción – costos de producción). Los dos índices económicos permiten afirmar algo que ya se sabe del maíz, que es un cultivo no rentable, pero de gran importancia social.

En el presente ciclo agrícola (1995), los precios rurales promedio de venta por tonelada de ese producto han sido de 1.000 pesos para el grupo I, 1.050 para el II y 1.227,5 para el III. En el caso del trigo, el grupo I comercializó a 1.100 pesos/tonelada, el II a 1.103,8 y el III a 1.175. En el grupo de los grandes productores, se comercializa la producción a un mejor precio pues se venden en grandes cantidades y a veces directamente para evitar los intermediarios.

En el cuadro 7 se observan claramente las ventajas y desventajas ligadas al subsidio federal PROCAMPO que representó 440 pesos/ha para el ciclo primavera-verano de 1995.

El cuadro refleja fielmente la situación agroeconómica de los productores de Tlalpán y, analizando la rentabilidad del maíz y del trigo con o sin PROCAMPO, se ve que este juega un papel muy importante en la rentabilidad de los cultivos en la comunidad de estudio.

Finalmente, se concluye que el punto de equilibrio (precio de venta por tonelada/costos de producción por hectárea) es de 1 tonelada por hectárea para el trigo y de algo más en el caso del maíz, considerando que el subsidio PROCAMPO eleva un tanto la rentabilidad favoreciendo al grupo III en ambos cultivos y a los grupos I y II únicamente en el cultivo de trigo, aunque de manera insignificante.

Grupo	sin considerar PROCAMPO				con PROCAMPO			
	maíz		trigo		maíz		trigo	
	ganancia	renta-bilidad	ganancia	renta-bilidad	ganancia	renta-bilidad	ganancia	renta-bilidad
I	- 965,1	- 0,64	- 312,4	- 0,23	- 525,1	- 0,35	127,6	0,09
II	- 733,1	- 0,49	49,8	0,04	- 293,1	- 0,19	489,8	0,42
III	22,25	0,01	426,6	0,41	244,8	0,30	902,6	0,80

Cuadro 7 - Ganancia (en pesos) **y rentabilidad agrícola por hectárea sin y con PROCAMPO**

Es importante señalar que la rentabilidad neta de ambos cultivos, sin considerar el subsidio PROCAMPO, es negativa para los pequeños productores. El grupo III logra obtener una rentabilidad positiva en ambos cultivos e incluso aumentarla con el apoyo de PROCAMPO.

Actividades pecuarias en los SEF

La gran mayoría de los SEF poseen algún tipo de ganado. Pese a tratarse de una actividad complementaria a la actividad agrícola, no deja de ser importante, ya que las unidades de producción aprovechan durante todo el año los productos y subproductos obtenidos (leche, huevos, carne, lana, queso, carga-tracción, etc.). El cuadro 8 presenta la cantidad promedio de ganado que poseen los diferentes grupos y el valor monetario aproximado total de acuerdo a la cantidad de cada una de las especies.

Grupo	bovinos (nº)	borregos (nº)	aves (nº)	equinos (nº)	caprinos (nº)	Total ganado	Valor total (pesos)
I	0	0,5	5,6	0,5	0,2	6,7	840
II	2,9	2,9	10,7	0,9	0	17,4	6.714
III	3,3	25,3	9	0,3	0	37,8	11.905
promedio general	1,93	4,8	8,8	0,7	0,06	16,3	5.146

Cuadro 8 - Valor y estructura ganadera disponible en los diferentes grupos

La ganadería juega un doble papel en la unidad de producción. Proporciona buena parte de los alimentos a los miembros de la familia y representa una caja de ahorro monetario del que se puede disponer libremente en caso de necesidad.

Actividades productivas no agrícolas, renta, venta y aparcería en los SEF

En los grupos I y II, es notoria la dificultad en garantizar la reproducción económica con las solas actividades agrícolas. La estrategia de los SEF hace que estos tengan que recurrir a otro tipo de actividades no agrícolas, ya sea al interior de la unidad familiar, en actividades como comercio, costura, carpintería y otras, o al exterior de ella. Así el 82 % de los productores del grupo I y el 65 % del grupo II realizan actividades no agropecuarias. Sucede lo contrario en el grupo III, donde, con excepción de un SEF, el 100 % se dedica a la actividad agropecuaria.

En el cuadro 9 se presentan estas actividades productivas: migración (interior y exterior), actividades no agropecuarias, dinámica de renta de la tierra y aparcería rural, dinámica de compra y venta de tierra ejidal entre productores de la región. Todas estas actividades tienen como objetivo complementar los ingresos y satisfacer las necesidades más apremiantes de reproducción en la unidad de producción.

Grupo	N° total de UP	migraciones	se dedican a actividad no agropecuaria	renta		aparcería (al tercio)		comercio de tierras	
				dan	reciben	dan	reciben	compra	venta
I	11	1	9 (82 %)	0	0	55 %	0	0	18,2
II	17	6	11 (65 %)	0	6	0	6 %	5,9	23,5
III	4	1	0	0	50	0	75 %	50	0

Cuadro 9 - Análisis de los SEF: migración, actividades no agropecuarias, renta de parcelas ejidales, parcelas al tercio y compra-venta de parcelas en los últimos años

La emigración es otro elemento importante de las estrategias que adopta la economía familiar en Tlalpán. Considerando al jefe de familia o a alguno de sus miembros, representa el 9 % en el grupo I, el 35,3 % en el II y el 25 % en el III. En la localidad, se trata de una emigración temporal o por períodos prolongados que tiene como destino principal los Estados Unidos y, en mucho menor medida, Canadá. Cabe señalar que este fenómeno no es uniforme. Se trata de complejas movilizaciones de productores a largas distancias, traspasando las fronteras políticas y configurando complicados circuitos de trabajo en espacios internos y externos.

CONCLUSIONES

El manejo del tepetate y del suelo normal está determinado por la disponibilidad de recursos en la unidad familiar, por la superficie cultivada y por las necesidades específicas del proceso técnico de producción. El patrón dominante de uso del suelo en ambos substratos es maíz-trigo para los grupos II y III y únicamente maíz para el grupo I.

El maíz juega un papel fundamental en la reproducción de la unidad familiar, ya que actúa al interior de ella como regulador entre el cultivo comercial, el acceso al mercado y la propia reproducción de los tres tipos de unidades de producción por su uso como bien alimentario. En los grupos I y II, la producción es principalmente de autoconsumo. En los grupos II y III, la producción y comercialización del trigo hace posible una capitalización.

El análisis agroeconómico muestra que el maíz es un cultivo no rentable para los grupos I y II. Únicamente en el grupo III se obtiene una ligera rentabilidad (con o sin PROCAMPO). El trigo genera una ligera rentabilidad para los grupos I y II con ese subsidio, siendo aceptable en el caso del grupo III.

El crédito agrícola y la asistencia técnica han sido muy escasos; únicamente pocos productores del grupo I y II recibieron un apoyo muy selectivo de FIRA, FIDER y SEDESOL. Además, el 50 % de los productores de los grupos II y III mantiene cartera vencida en esas instituciones, porcentaje que es solo de 9 en el grupo I.

Los grupos I y II son los más diversificados en cuanto a actividades económicas. Como cultivan maíz únicamente para autoconsumo y obtienen pocos productos pecuarios, se explica la necesidad de vender su fuerza de trabajo dentro y fuera de la comunidad, con el fin de obtener los ingresos requeridos para la reproducción económica familiar. El grupo III en cambio, al poseer los medios de producción necesarios, ha sustentado su desarrollo económico familiar en el sector agropecuario.

Finalmente, hay que señalar que la incorporación del tepetate a la agricultura ha jugado un papel en la ampliación de la frontera agrícola de las unidades de producción, al igual que, en términos similares, la aparcería y la renta de la tierra entre productores.

Experiencia de recuperación de cangahua en la provincia del Carchi (Ecuador)

Jaime CANGÁS, Germán TRUJILLO

Abstract

A cangahua *reclamation program in a 30-hectare farm is described. The farm is located in norhern Ecuador's highlands and the program started in 1983 when 30 out of 42 hectares were of cangahua outcrops. Reclamation of this area has been made through mechanical break-up of the soil using heavy machinery, green and animal manure, as well as earthworm breeding.*

Yields obtained have allowed to maintain a large guinea pig breeding farm and produce several crops, including leguminous plants, ray grass, potatoes, carrots and a small plot with apples.

After 14 years of production, it is considered that a new breaking up of cangahua *(subsoiling) is needed about every five years, to improve the soil physical properties.*

Keywords: *Ecuador* - Cangahua *Reclamation - Productivity.*

INTRODUCCIÓN

La provincia de Carchi se encuentra al Norte de Ecuador, en la frontera con Colombia, tiene una superficie de 4.411 km^2, donde habita y trabaja una población predominantemente mestiza de 150.000 habitantes. Antiguamente, en esta zona se asentaban las tribus indígenas de los Pastos y Tulcanes que fueron sometidas por los españoles a una brutal esclavitud. Los arrancaban de sus tierras altas y frías para llevarlos a trabajar en los climas tibios o calientes de Ibarra y el Chota hacia el Sur, quemando las casas en que habitaban. Esta trágica e implacable persecución determinó el despoblamiento y la dispersión de los grupos indígenas del Carchi, situación que no ocurrió en Imbabura. Obviamente esto provocó el asentamiento de mestizos en la región.

La provincia se caracteriza por permanecer siempre verde, con valles fértiles y páramos exuberantes. Económicamente, su población ha dependido, y lo sigue haciendo, de la agricultura y la ganadería. De allí la importancia de un buen manejo de los suelos y de la rehabilitación de las tierras erosionadas. En efecto, el cantón Bolívar, donde se localiza la propiedad del agricultor coautor de este artículo, sufre un acelerado proceso de erosión que ha dado lugar al afloramiento de extensas áreas de cangahua.

El dueño de la propiedad es oriundo de San Gabriel, ciudad localizada 30 km al Norte del predio Agroindustrias Fátima que pertenece al cantón Bolívar. La propiedad se

ubica en las coordenadas 77° 54' 50" de longitud W y 0° 30' de latitud Norte, a una altura de 2.660 m.s.n.m.. La precipitación media anual es de 800 mm, la humedad relativa es elevada, los suelos se han desarrollado sobre depósitos de cenizas volcánicas que por erosión han permitido el afloramiento de la cangahua donde se desarrolla una escasa vegetación herbácea y semiarbustiva. Los cultivos más comunes en la zona son papa, maíz, cebada, fréjol y arveja, practicándose igualmente la ganadería bovina. Se dispone permanentemente de agua de riego.

Con 42 ha de superficie, la propiedad fue adquirida en 1982. En ese entonces tenía 12 ha de suelos aptos para la agricultura y 30 ha de cangahua. El relieve era irregular, presentaba abundantes yunques (desniveles de 1 a 2,5 m de altura), que correspondían a testigos del antiguo nivel de los suelos que han desaparecido por erosión. Esto dificultaba la labor de preparación de los suelos, lo que encarecía los costos de rehabilitación.

Según reseñas contadas por padres y abuelos, hace 50 años, estas tierras eran productivas y estaban dedicadas principalmente al cultivo del trigo. Poco a poco fueron abandonadas, porque ya no producían.

En 1967, el gobierno, a través del Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidráulicos (INERHI) construyó un canal de riego en el sector, y entre sus obras inició un programa de rehabilitación de 160 hectáreas de cangahuales con maquinaria pesada, bajo la cota del canal. Ello incluyó la roturación y mezcla con tierra negra de páramo, para mejorar la fertilidad. En la actualidad no queda vestigio alguno de aquella rehabilitación, lo que lleva a pensar que los proyectos no deben ser impuestos, sino que deben implicar una toma de conciencia y la participación comunitaria.

Roturación de la cangahua

Como ya se señaló, en 1982 la propiedad disponía de apenas 12 ha de suelo apto para la producción agrícola, superficie con la que era casi imposible subsistir y emprender el proyecto de crianza de cuyes. Por ello, se iniciaron algunas experiencias de roturación de la cangahua con varios tractores de baja potencia, sin obtener resultados satisfactorios, ya que la cangahua era sumamente dura. Posteriormente, se buscaron otras soluciones y es así como se alquiló un tractor Fiat TD 18 (equivalente al Caterpillar D7), provisto de una cuchilla frontal y de un *ripper* de 1 m de largo con 3 uñas. Sin embargo, la presencia de abundantes yunques en el terreno, dificultaba la roturación de la cangahua.

Las labores realizadas fueron:

- nivelación de los yunques con el uso de la cuchilla, lo que permitió esparcir el suelo de calidad sobre toda la superficie;
- roturación de la cangahua mediante pase cruzado del *ripper* en sentido diagonal a la pendiente (en forma de X), obteniéndose una profundidad de roturación promedio de 80 cm. En la superficie quedaron bloques de cangahua de 20 a 40 cm de diámetro, lo que impedía proceder a la siembra;
- fraccionamiento de los bloques grandes de cangahua con pases del tractor TD 18 y luego, mediante 4 pases de rastra de discos con tractor agrícola, hasta lograr una profundidad efectiva o capa arable de 30 cm y un buen desmenuzamiento de los bloques.

El proceso se inició con la rehabilitación de 2 ha de cangahua en 1983 y paulatinamente hasta 1990 se llegó a cubrir las 30 ha restantes. Ante la difícil situación económica inicial y los altos costos del alquiler de maquinaria, el propietario se vio en la necesidad de ganarse la vida promocionando los trabajos de recuperación entre agricultores del lugar a través de días de campo, en los que se demostraban los resultados alcanzados.

Así, pudo obtener algunos contratos de trabajo durante 2 años, lo que le permitió reunir algo de dinero para avanzar con la recuperación.

Tiempo de roturación

Para 1 ha de cangahua con una delgada capa de suelo fértil sin yunques, que no necesitaba nivelación, se emplearon 10 horas en la roturación. En terrenos de cangahua con yunques de suelo fértil que necesitaban nivelación previa, se necesitaron 30 horas por hectárea, pero esto no implica que se hayan construido terrazas.

Maquinaria	año 1983	año 1990	año 1996
Tractor (buldózer)	12 .000 / h	4.000 / h	160.000 / h
Tractor agrícola (rastra)	5.000 / ha (4 pases)	25.000 / ha (4 pases)	120.000 / ha (4 pases)
Arado	5.000 / ha	25.000 / ha	120.000 / ha

ha: hectárea, h: hora

Costos de rehabilitación (en sucres)

Es decir que para rehabilitar 1 hectárea con yunques se requiere:

- 30 horas de buldózer x 160.000 sucres = 4'800.000 (÷ 3.360) = 1.428 US$
- rastra x 120.000 sucres = 120.000 (÷ 3.360) = 36 US$
- arado x 120.000 sucres = 120.000 (÷ 3.360) = 36 US$

5'040.000 sucres 1.500 US$

Siembra

Después de preparado el terreno, se elaboró un programa de cultivos para el primer año:

- siembra de la mezcla vicia-avena o chocho (*Lupinus albus*);
- corte de la vicia-avena antes de la floración;
- incorporación del rebrote del chocho o de la mezcla vicia-avena después de la floración;
- incorporación de materia orgánica (desechos urbanos y residuos de cosecha) a razón de 40 y 60 t/ha para mejorar la fertilidad de la tierra recuperada, y posterior aplicación de estiércol de cuy o conejillo de indias (*Cavia americanus*) a razón de 40 t/ha.

Mantenimiento

A partir del segundo año se emprendió un plan de uso de la cangahua rehabilitada y también del suelo bueno como un solo bloque, con la finalidad básica de proveer alimentación para un criadero de cuyes instalado en la finca.

Posteriormente se han venido incorporando lotes, a medida que estaban preparados y en función de la disponibilidad de recursos. Unas veces se ha sembrado como primer cultivo la mezcla vicia-avena, otras el chocho, que por lo general han sido enterrados como abono verde.

La mezcla avena-vicia se sembró durante varios años seguidos, alternando con papas cada 2 años. A partir del cuarto año se ha sembrado alfalfa, *ray grass*, zanahoria, maíz forrajero y una reducida superficie de manzana con fines de experimentación.

Abono

Primer ciclo: incorporación de 40 a 60 t/ha de materia orgánica fresca
Segundo ciclo: incorporación de 40 t/ha de estiércol
Tercer ciclo: incorporación de 2 t/ha de lombri-humus

Cada dosis corresponde a ciclos diferentes de la rehabilitación. Así al inicio, se incorporaron hasta 60 t/ha de mezclas de desechos, estiércol de bovino y residuos de cosecha. En una segunda instancia y en los lotes que se iban rehabilitando, se incorporaba estiércol fresco de cuy a razón de 40 t/ha. Sin embargo, en este proceso la descomposición de la materia orgánica parece muy lenta. Actualmente como abono de mantenimiento se aplican 2 t/ha/año de lombri-humus a base de estiércol de cuy, con lo cual se han obtenido buenos resultados en la producción de forraje. Cuando se hacen cultivos de escarda como fréjol, zanahoria, maíz o papas, se incorporan 1 ó 2 sacos/ha de 18-46-0 mezclado con el humus.

LO QUE SE TIENE HOY

A los 14 años de haber adquirido la propiedad, en la actualidad se dispone de:

40 hectáreas de terreno con :	mezcla de alfalfa + ray grass	8	ha
	asociación maíz + ray grass	8	ha
	zanahoria	5	ha
	papa	0,5	ha
	manzana	0,5	ha
	ray grass solo	3	ha
	lombricultura	1	ha
	piscinas	2	ha
	construcciones y caminos	2	ha
	en descanso	10	ha

Se cuenta con un reservorio de agua de 9.000 m^3 de capacidad para riego en la finca.

Se producen 15.000 sacos de 50 kilos de humus de lombriz, cuyo precio actual es de 15.000 sucres (4,5 US$) por saco

Actualmente existen 16.000 cuyes entre madres, reproductores y animales listos para el faenamiento, los mismos que se alimentan a base de zanahoria, alfalfa y *ray grass*. El precio de venta es de 23.000 sucres (6,8 US$) por cuy adulto en pie. Este tipo de alimentación hace que los animales tengan poco contenido de grasa, por lo que su demanda es grande, principalmente en el Sur de Colombia, donde se comercializa el 80 % de la producción. El 20 % se destina a consumo interno. Así, se lo puede considerar como el plantel cuyícola comercial más grande del país. Actualmente se venden 250 cuyes/quincena.

Es tiempo de volver a roturar los suelos progresivamente, aunque lo ideal sería hacerlo cada 5 años. Se debería investigar en este sentido. En los meses secos es indispensable regar si se quiere tener producción.

Rendimiento de los cultivos

Chocho: Al inicio, cuando se cosechó en grano, se obtuvo una producción de 70 sacos por 1 de semilla.

Papa: Las primeras siembras del tubérculo dieron una producción de 6 sacos de cosecha por 1 de semilla. Actualmente, se obtienen 11 sacos de cosecha por 1 de semilla, con una dosis de fertilización de 3 x 1, es decir 3 quintales de humus por 1 de semilla más 2 de 18-46-0. Se siembran 20 sacos de semilla por hectárea y se obtiene un rendimiento de 220 quintales/ha.

Alfalfa: 25 - 30 t/ha/corte. Se hacen 7 cortes al año, lo que arroja un total de 175 a 210 t/ha.

Zanahoria: 60 t/ha en 6 meses. La dosis de siembra es de 6 libras/ha. Se ha llegado a obtener hasta 90 t/ha, pero el promedio es de 50 t/ha.

Ray grass: 19 t/ha/corte. Se hacen 7 cortes al año, lo que da un total de 133 TM/ha.

Maíz forrajero: 16 t/ha. El ciclo productivo dura 4 meses.

Chulpi (variedad de maíz): En 1 ha de terreno, con una densidad de siembra de 25 libras de semilla/ha, se cosecharon 30 quintales.

Mezcla Ray grass - *alfafa*: 38 t/ha

CONCLUSIONES

- La cangahua es una tierra dura, difícil de recuperar.
- El costo de rehabilitación es alto debido al alquiler de la maquinaria.
- La producción de forraje a partir del segundo año es una alternativa muy interesante.
- Los rendimientos obtenidos en cultivos de papa o maíz son bajos.
- Sin riego no es posible obtener niveles de producción rentables.

RECOMENDACIONES

- Buscar apoyo estatal en el proceso de roturación de la cangahua para su integración al sistema productivo agropecuario.
- Dar prioridad a la producción de forrajes porque arrojan mejores rendimientos en la fase inicial de la rehabilitación. Esto puede implicar el fomento y desarrollo de la ganadería.
- Emprender acciones de rehabilitación en áreas que dispongan de agua de riego.
- Establecer programas de investigación que permitan determinar las dosis más adecuadas de fertilización orgánica y química para los diferentes cultivos que se desarrollan en cangahua rehabilitada.

La recuperación de suelos cangahuosos en el proyecto Licto

Guillermo TERÁN T.

Abstract

Prior to the implementation of an irrigation project in Licto (Ecuador), a socio-economic survey conducted by CESA showed that local peasants were reclaiming cangahua *land by hand, in order to increase their area of cultivation. CESA helped local communities to improve the organization of this work with local communities. Starting the first year with hand labor, the community received further assistance to use mechanized methods. So far, 328 out of a total of 530 hectares have been reclaimed.*

Keywords: *Ecuador* - Cangahua *Reclamation*

INTRODUCCIÓN

En 1989, la Central Ecuatoriana de Servicios Agrícolas (CESA), conjuntamente con la organización campesina de segundo grado de Licto (CODOCAL), realizó en la parroquia de Licto (cantón Riobamba, provincia del Chimborazo) un diagnóstico socioeconómico participativo, con la finalidad de ejecutar posteriormente acciones de desarrollo en el sector donde se hicieron labores de rehabilitación de cangahua.

CARACTERÍSTICAS DE LA PARROQUIA DE LICTO

Licto se encuentra ubicada 18 km al Sureste de la ciudad de Riobamba. Está constituida por 2.760 familias, con un total de 13.000 personas que viven en el seno de 26 comunidades todas ellas indígenas. Prevalece el idioma quichua entre la población femenina y el castellano entre los hombres. Licto se caracteriza por fuertes componentes socio-culturales expresados por su población tanto en lo organizativo como en lo productivo.

De acuerdo a la clasificación de zonas de vida de Holdridge, Licto corresponde a las formaciones de estepa espinosa Montano Bajo (se MB) y bosque seco Montano Bajo (bs MB).

La temperatura media anual es de 16 °C y la precipitación media anual de 417 mm.

En el sector predominan los suelos cangahuosos, ústicos. Se trata de *Durustolls* y *Haplustolls*. Las pendientes, entre el 30 y el 50 por ciento, están severamente erosionadas, particularmente en las comunidades ubicadas entre los 2.800 y 3.260 m.s.n.m.

La producción agropecuaria es típicamente de subsistencia en los sectores medio y alto que no disponen de riego. Los principales cultivos de secano son maíz, trigo, cebada,

arveja y avena. La parte baja de Licto cuenta con riego y mejores suelos, lo que ha hecho posible la producción de hortalizas que se comercializan en Riobamba.

La propiedad promedio tiene una superficie de 0,5-1,0 ha por familia, razón por la cual existe en la zona una fuerte migración temporal de la población especialmente masculina hacia la Costa, en busca de un complemento de los ingresos necesarios para su supervivencia. La población migrante está estimada en un 60 % de hombres económicamente activos, los mismos que salen de sus comunidades 2 o más veces por año, por períodos de 2-3 meses cada vez.

EL PROYECTO DE RIEGO Y DESARROLLO

Con el apoyo económico de la Cooperación Técnica del Gobierno Suizo (COTESU) y del Estado ecuatoriano, CESA y CODOCAL han emprendido la ejecución de Proyecto de Riego y Desarrollo Licto a partir de febrero de 1990.

Entre las principales actividades del proyecto en una primera fase (1990-1993) se destacan las siguientes:

- construcción del sistema de riego Guarguallá, para la incorporación al riego de 1.672 ha de los sectores medio y alto de la zona del proyecto;
- conservación de los recursos naturales con acciones específicas de forestación de protección, agroforestería y recuperación del suelo (meta: 50 ha);
- infraestructura comunitaria: mejoramiento de vías, construcción y mejoramiento de abastos de agua;
- agropecuarias: selección y tratamiento de semillas de cereales, investigación de tecnologías locales de producción, adaptación de variedades de avena, adaptación de especies frutícolas caducifolias, sanidad y manejo de bovinos;
- fortalecimiento de la organización comunitaria y de segundo grado del sector.

LAS DINÁMICAS SOCIALES Y PRODUCTIVAS ENCONTRADAS EN EL ÁREA

Mientras se desarrollaban las acciones del proyecto, se pudo constatar la existencia de comportamientos específicos de la población que ameritaban una correcta interpretación para un mejor enfoque del trabajo que se venía realizando:

A nivel de la organización

La organización social predominante es la comuna, con su respectivo cabildo. Existe un muy buen poder de convocatoria de los cabildos respecto a sus bases. El proyecto asumió el desarrollo de todas sus actividades a través de una estrecha coordinación con los cabildos.

Estos trabajos comunitarios se han cumplido mediante la práctica tradicional de las denominadas «mingas», las mismas que se han convertido en una de las formas de participación y contraparte campesina en el proyecto.

Persisten los mecanismos de reciprocidad y complementariedad al interior de la familia nuclear y la familia ampliada.

A nivel de la producción

Prevalecen las prácticas de una tecnología de producción tradicional que incluye la utilización de la yunta para el arado, el azadón para el laboreo del suelo y el empleo del abono orgánico, así como asociaciones y rotaciones de cultivo para mantener la fertilidad del suelo. Licto, al igual que Flores y Punín en Chimborazo, es una zona históricamente

caracterizada por una actitud conservacionista del suelo, que se comprueba por la presencia de terrazas, andenes, pircas, caminos de agua, zanjas de infiltración, en la mayor parte de los suelos dedicados a la producción agropecuaria.

LA RECUPERACIÓN MANUAL DE SUELOS CANGAHUOSOS

Una de las novedades encontradas en el proyecto consiste en que, en forma aislada pero permanente, en algunas comunidades de los sectores medio y alto, el trabajo es realizado por un campesino solo (hombre) o en compañía de otros (su mujer y más miembros de la familia), o por mujeres solas (una o más), en suelos improductivos con cangahua que aflora a la superficie. Se utilizan herramientas como barras, pico y azadón, rompiendo la cangahua en pedazos grandes (20 a 40 cm de longitud y 20 a 30 cm de espesor) en una tarea que, después de mucho esfuerzo, les permite avanzar unos pocos metros cuadrados en cada día de trabajo. Realizan esta actividad durante 1 a 4 días o más, al cabo de lo cual, las pequeñas parcelas llenas de pedazos grandes de cangahua son dejadas en reposo hasta la llegada del período de lluvias. Después de 1 ó 2 meses de absorber la humedad, la cangahua roturada es algo más suave que en su estado original. Se procede entonces a pulverizarla golpeándola con pico y azadón. Así, se obtiene un suelo con agregados gruesos o terrones, al que se aporta la majada de los animales (abono orgánico) disponible en la casa del agricultor. Este suelo es sembrado inmediatamente (primer año) con avena y vicia. Posteriormente, al año siguiente, generalmente luego de la cosecha de los granos (en el 90 % de los casos no se incorpora la materia verde al suelo) se vuelve a incorporar el estiércol disponible en la parcela, repitiéndose una nueva tarea de pulverización del suelo y obteniéndose agregados más finos, para proceder a la siembra de cebada. Normalmente, para ese segundo año, se han utilizado pedazos de cangahua en la realización de taludes o pircas que impiden el arrastre del suelo con la lluvia. Se construyen también zanjas de desviación y de infiltración del agua (actividades que no se realizan en todos los casos). Para el tercer año, se repiten las actividades señaladas en el año anterior y en muchos casos, el cultivo que se establece es el maíz.

Esta práctica de recuperación manual de suelos ha sido observada especialmente en las comunidades de Pompeya, Quincahuán, Sul Sul, Resgualay, Luceroloma, Tzetzeñag, Guaruñag, Gompuene, Galgualán y Cecel.

LA PROPUESTA METODOLÓGICA DEL PROYECTO PARA LA RECUPERACIÓN DE SUELOS CANGAHUOSOS

Habiéndose juzgado, desde todo punto de vista (productivo y cultural), esta actividad tradicional de roturación de la cangahua sumamente importante, el proyecto se planteó como estrategia asociar la recuperación individual (familiar) de la cangahua a las mingas de trabajo que debían realizar las comunidades para la ejecución de las actividades propias del proyecto.

Así, se lograron acuerdos con las comunidades para realizar por lo menos una minga semanal para la recuperación de suelos en favor de cada uno de los comuneros; es decir, habría cada semana 30 a 50 personas rompiendo la cangahua de la persona o familia de turno. Aprovechando la mano de obra disponible y con el apoyo de los técnicos del proyecto, se realizaba también la construcción de pircas y zanjas de desviación e infiltración del agua.

Como esta actividad era de mucho interés para los comuneros, por su propia decisión se cumplían 2 y hasta 3 mingas por semana, lográndose una mayor cobertura de esta actividad en las distintas comunidades.

El apoyo del proyecto consistió generalmente en la entrega de semillas (vicia, arveja, cebada, avena) para los suelos recuperados mediante este procedimiento. Conviene destacar que se lograron cubrir superficies de 2 a 4 ha en comunidades que disponían de terrenos de propiedad colectiva como San Antonio, Santa Ana de Guagñag, Tulabug y Guanlur. En estas parcelas se incorporó además la agroforestería como práctica demostrativa y de capacitación para el resto de comunidades.

Como se puede observar en el anexo 1, en la primera fase del proyecto se cubrió una superficie de aproximadamente 70 ha con este método participativo de recuperación manual de la cangahua.

LA RECUPERACIÓN MECANIZADA DE SUELOS CANGAHUOSOS

A medida que se profundizó en el conocimiento de los recursos naturales del área y ante la proximidad de la dotación de riego para 16 comunidades del proyecto, se constató que una parte considerable de terrenos a ser regados, aproximadamente 530 ha, eran suelos superficiales (10-20 cm) o presentaban afloración de cangahua siendo por lo tanto improductivos. Con este antecedente y tomando en cuenta el esfuerzo comunitario realizado anteriormente en la recuperación manual de suelos, se logró introducir en la segunda fase del proyecto (1994-1997), el apoyo financiero para la recuperación mecanizada de suelos cangahuosos en una extensión de 530 ha, mediante el empleo de tractores de oruga, tipo D7-D8, dotados de *rooter*. El 85 % de este trabajo es financiado por el proyecto (apoyo de la COTESU) y el 15 % restante por el beneficiario.

El proceso de recuperación de suelos cangahuosos es asumido como la secuencia de la recuperación primaria (roturación, pulverización del suelo y obras de protección y conservación) seguida de la recuperación complementaria (progresiva recuperación de la fertilidad mediante incorporación de abonos verdes, abono orgánico y rotación-asociación de cultivos). Por ello, en la segunda fase del proyecto Licto, el apoyo mecanizado a la rehabilitación de suelos implica básicamente la actividad de roturación de la cangahua a través de una labor de ruptura y otra de cruza, ambas en una profundidad de 60 cm, con *rooter* de 3 dientes, quedando el resto de actividades tanto de pulverización y construcción de obras de protección y conservación del suelo, al igual que la recuperación complementaria, a cargo de los propios agricultores organizados, quienes, a través de mingas, van cumpliendo progresivamente este trabajo.

Según puede apreciarse en el anexo 2, el avance en la recuperación mecanizada registra 156 ha en el año 1994 y 172 ha en la campaña 1995, quedando una superficie, bajo la cota del canal, de 202 ha hasta concluir la segunda fase.

Anexos

1 - FASE I DEL PROYECTO: SUPERFICIE DE RECUPERACIÓN MANUAL DE SUELOS

Comunidad	Superficie comunal (ha)	Superficie parcela familiar (ha)
Tunshi S. Nicolás	2,17	
Tunshi S. Javier	0,17	
Molobog	0,04	
Tulabug Escalera	2,30	1,0
Chumug S. Francisco	1,30	
Cuelloloma	1,13	1,5
S. Antonio de Guagñag	6,30	
Sta. Ana de Guagñag	3,00	0,50
Sul Sul S. Francisco	0,90	
Guanlur	0,59	5,50
Resgualay		5,55
Quincahuán	1,30	
Laurel Gompuene		10,00
Gompuene Central		4,00
Galgualán	7,50	
Tzaticahuán		6,0
Pungalbug	7,50	
Sta. Rosa de Tzetzeñag		9,00
Cecel S. Antonio	1,07	
Cecel Lincas	0,22	0,05
Cecel Grande	1,56	
Gueseche		2,5
Subtotal	28,55	40,32
TOTAL GENERAL	68,87	

2 - FASE II DEL PROYECTO(1994-1997): RECUPERACIÓN MECANIZADA DE SUELOS

Año 1994	Comunidad	Superficie (ha)
	Molobog	26
	Quincahuán	7
	Cuelloloma	38
	Sul Sul	39
	Guanlur	19
	Resgualay	10
	Chumug	17
Subtotal		**156**
Año 1995	*Comunidad*	*Superficie (ha)*
	Molobog	15
	Quincahuán	29
	Chalán	20
	Resgualay	16
	Tulabug	19
	Licto Pueblo	12
	Cuelloloma	46
	Sul Sul	15
Subtotal		**172**
Total área recuperada a la fecha		**328**

Autores, instituciones y siglas

ACEVEDO S. Otilio
UNAM, Departamento de Edafología, Instituto de Geología

ALCALÁ DE JESÚS María
Colegio de Postgraduados
Área de Física de Suelos, Programa de Edafología

ALEXANDRE Jean-Louis
CNEARC

ÁLVAREZ P. Iván
Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales

ARIAS José
Universidad Central del Ecuador

ASCENCIO Eduardo
ORSTOM México

ARIKAS Kyriakos
Universität Hamburg, Mineralogisch-Petrographisches Institut

BÁEZ Aurelio
ORSTOM México

BAUMANN Jürgen
Justus-Liebig-Universität, Tropical Research Center

BENÍTEZ Dionisio
Colegio de Postgraduados, CEDERU

BRITO V. Hortensia
Colegio de Postgraduados

CANGÁS Jaime
Hostería el Jordán, Ambuquí - Ecuador

CISNEROS S. Gem B.
Universidad Central del Ecuador

CUSTODE Edmundo
MAG

DELGADILLO Julián
Colegio de Postgraduados, Área de Microbiología de Suelos

DE NONI Georges
ORSTOM Montpellier

DUBRŒUCQ Didier
ORSTOM Bondy

ELSASS Françoise
INRA, Unité des Sciences du Sol

ETCHEVERS B. Jorge D.
Colegio de Postgraduados

FAUGÈRE Garance
CNEARC

FECHTER-ESCAMILLA Ulrich
Justus-Liebig-Universität, Tropeninstitut

FERRERA-CERRATO Ronald
Colegio de Postgraduados, Área de Microbiología

FLOR I. Jorge A.
Universidad Central del Ecuador

FLORES Alberto
Colegio de Postgraduados, Área de Microbiología

FLORES G. Gustavo
UAT

FLORES R. David
UNAM, Instituto de Geología, Departamento de Edafología

FLORES S. Diego
Colegio de Postgraduados, CEDERU

GEISSERT Daniel
Instituto de Ecología, Xalapa

GONZÁLEZ Eduardo
UNAM

HALL Minard L.
EPN, Instituto Geofísico

HIDALGO Claudia
Colegio de Postgraduados, IRENAT-PROEDAF

Huber Anton W.
Universidad Austral de Chile, Instituto de Geociencias

JANEAU Jean-Louis
ORSTOM Ecuador

KUBOTERA Hideo
Kyushu National Agricultural Experiment Station

LEPIGEON Isabelle
CNEARC

LEROUX Yann
ORSTOM Ecuador

LORENZONI Paolo
Istituto Sperimentale per lo Studio e la Difesa del Suolo,
Sezione di Conservazione del Suolo

LY Boun-Tieng
CNEARC

MÁRQUEZ Alfonso
Colegio de Postgraduados

MIRANDA María Eugenia
Colegio de Postgraduados, Instituto de Recursos Naturales

MORA P. Lucy N.
UNAM, Instituto de Geología, Departamento de Edafología

MOTHES Patricia A.
EPN, Instituto Geofísico

MUÑOZ A. Salvador
Colegio de Postgraduados, CEDERU

MUÑOZ Primo
UAT

NAVARRO G. Hermilio
Colegio de Postgraduados, CEDERU

OLESCHKO Klaudia
UNAM, Instituto de Geología

ORTIZ Andrés
Colegio de Postgraduados, Área de Microbiología de Suelos

OROPEZA M. José Luis
Colegio de Postgraduados, PROEDAF, Área de Física de Suelos

OYARZÚN Carlos E.
Universidad Austral de Chile, Instituto de Geociencias

PEÑALOZA Rubén
Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales

PÉREZ O. María Antonia
Colegio de Postgraduados

PINHEIRO Jorge
Departamento de Ciências Agrárias, Universidade dos Açores

POETSCH Thomas
Universität Hamburg, Institut für Geographie

PRAT Christian
ORSTOM Montpellier

QUANTIN Paul
ORSTOM Bondy

RÍOS B. José Donaldo
Colegio de Postgraduados, Programa de Edafología

RÍOS V. Rúsvel R.
CARE-MAG

ROGER Pierre
ORSTOM, Université de Provence, Laboratoire de Microbiologie

ROSSIGNOL Jean-Pierre
ENSH-ENITH

SALAZAR L. José
Colegio de Postgraduados, Programa de Edafología

SÁNCHEZ Benjamín
Comisión Nacional del Agua, GRAUAMEX

SANTAMARÍA R. Salustio
Colegio de Postgraduados, Programa de Edafología

SANZANA Renato
Universidad Austral de Chile, Instituto de Geociencias

SERVENAY Alice
ORSTOM México

Sorani Valentino
UNAM, Instituto de Geografía
Spadoni Massimo
Istituto Sperimentale per lo Studio e la Difesa del Suolo, Sezione di Conservazione del Suolo
Suárez Edison
CESA
Tehózol I. Francisco
UAT
Terán F. Guillermo
CESA
Trujillo Germán
MAG
Vera R. Andrea
UAT
Vicuña Azucena
PUCE
Velásquez R. Alma S.
UNAM, Instituto de Geología, Departamento de Edafología
Viennot Marc
ORSTOM Montpellier
Werner Gerd
Justus-Liebig-Universität, Tropical Research Center
Yamada Ichiro
Kyushu National Agricultural Experiment Station
Zebrowski Claude
ORSTOM Ecuador

CARE-MAG
Centro Comercial Ambato - Bloque 2
Apartado 177
AMBATO - Ecuador
CESA (Central de Servicios Agrícolas)
Avenida de Los Shyris s/n
RIOBAMBA - Ecuador
CNEARC
1101, avenue Agropolis
34033 MONTPELLIER - Francia
Colegio de Postgraduados
Km 36,5 carretera México-Texcoco
56230 MONTECILLO - México
Comisión Nacional del Agua, GRAUAMEX
TEXCOCO - México
ENSH-ENITH
2, rue Le Nôtre
49045 ANGERS Cedex 01 - France
EPN (Escuela Politécnica Nacional)
Ladrón de Guevara s/n
QUITO - Ecuador
INRA
Unité des Sciences du Sol
Route de Saint-Cyr
78026 VERSAILLES - France
Instituto de Ecología A.C.
Apartado Postal 63
91000 XALAPA
VERACRUZ - México
Istituto Sperimentale per lo Studio e la Difesa del Suolo
Via Casette 1 - P.O. Box 117
02100 RIETI - Italy
Justus-Liebig-Universität
Schottstrasse 2
35390 GIEßEN - Alemania
Kyushu National Agricultural Experiment Station
Suya 2421, Nishigoshi
KUMAMOTO - Japan
MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería)
Eloy Alfaro y Amazonas s/n
QUITO - Ecuador
ORSTOM
- 32, avenue Henri Varagnat, 93143 BONDY - France
- Apartado 17.11.6596, QUITO - Ecuador
- Apartado 57297, MÉXICO D.F. - México
- 911, avenue Agropolis, 34032 MONTPELLIER - France
- Université de Provence
Avenue de Luminy, 13288 MARSEILLE Cedex 9 - France

PUCE (Pontificia Universidad Católica del Ecuador)
Avenida 12 de Octubre y Patria
QUITO - Ecuador
UCE (Universidad Central del Ecuador)
Avenida América s/n
Ciudadela Universitaria
QUITO - Ecuador
UAT (Universidad Autónoma de Tlaxcala)
90 000 Tlaxcala - México
56230 MONTECILLO - México
UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México)
Ciudad Universitaria
04510 MÉXICO D.F. - México
Universidad Austral de Chile
Casilla 567
VALDIVIA - Chile
Universidade dos Açores
9700 ANGRA DO HEROÍSMO - Portugal
Universität Hamburg
- Institut für Geographie: Bundestraße 55
- Mineralogisch-Petrographisches Institut: Grindelalle 48

D-20146 HAMBURG - Alemania

CIMMYT Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo
CNEARC Centre National d'Études Agronomiques des Régions Chaudes
INEGI Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (México)
INIFAP Instituto Nacional de Investigacines Forestales y Agropecuarias
DNA Dirección Nacional Agrícola (MAG Ecuador)
ORSTOM Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération
UG Universidad de Gießen (Alemania)
UE Unión Europea

Unión Europea

Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

Universidad Central del Ecuador

Los suelos volcánicos endurecidos presentan serios problemas en América Latina

...los que se pueden superar con un manejo adecuado.