

Aptitud Productiva en Suelos Volcánicos Endurecidos (tepetates)

## **EROSION DE UNA TOBA VOLCANICA ENDURECIDA EN PROCESO DE REHABILITACION**

**Christian Prat, Aurelio Baéz, Eduardo Ascencio y Alfonso Marquez**

Hermilto Navarro, Henri Poupon y Ma. Antonia Pérez

## EROSION DE UNA TOBA VOLCANICA ENDURECIDA EN PROCESO DE REHABILITACIÓN

Christian Prat, Aurelio Báez, Eduardo Ascencio y Alfonso Márquez

### Introducción

En el altiplano mexicano el clima es relativamente agresivo y muy fluctuante, las pendientes fuertes y los suelos frágiles. Las sociedades locales como el medio natural son factores que al conjugarse favorecen la erosión de los suelos.

Una vez que los horizontes superficiales son erosionados quedan expuestas sobre la superficie las capas de tobas volcánicas endurecidas y estériles. Estas son horizontes con dimensiones que varían desde decímetros hasta varios metros de espesor.

De acuerdo a Zebrowski (1992), los tepetates podrían cubrir enormes superficies en el eje neovolcánico. Los trabajos recientes de (Servenay, 1997) estiman que una cuarta parte de las laderas de las sierras del altiplano mexicano presentan afloramiento de estos materiales endurecidos, compactos y estériles. Estos no pueden ser cultivados sin un tratamiento previo.

Todos estos factores muestran claramente que los tepetates expuestos en extensas superficies en México, incluso en Mesoamérica, gran región en donde constituyen un problema de mayor importancia, tanto para la agricultura como para los recursos naturales de los cuales dependen sus sociedades.

Los trabajos de recuperación manual de los tepetates existen desde la época prehispánica, sin embargo la mecanizada se inició hace poco más de 30 años, en particular en los estados de México y de Tlaxcala. Desgraciadamente, por falta de conocimientos científicos de soporte a los tecnológicos, sin duda además de los sociales, la mayoría de las obras no fueron muy exitosas.

Los resultados de programas recientes muestran que la roturación de los tepetates es técnica y económicamente factible, y que esta al alcance de los pequeños campesinos (Báez *et al.*, 1997; Márquez *et al.*, 1992; Muñoz y Navarro, 1997; Prat *et al.*, 1997). Sin embargo, estas medidas implican un control de la erosión y una buena gestión de la producción para poder recuperar lo antes posible, la fuerte inversión que representa la roturación y el terraceo de estos materiales (Zebrowski y Sánchez, 1997). En consecuencia, es indispensable caracterizar los procesos erosivos, como condición para poder proponer soluciones

### Metodología

En el protocolo se evaluaron diferentes sistemas de cultivos y de tratamientos del suelo (Cuadro 1) en 8 terrazas (700 hasta 1800 m<sup>2</sup>). Los preparativos se realizaron durante 1992, la evaluación de los parámetros agronómicos y el comportamiento del agua, del suelo y de las plantas fueron estudiados en detalles de 1993 hasta 1996 (Báez *et al.*, 1998).

**Cuadro 1. Características de las terrazas después de la roturación y terraceo del tepetate, S.M. Tlaxipan, edo. de México.**

Tratamiento	Ref.	Área m <sup>2</sup>	Sustrato	Prof.* M	Pendiente %	Cultivos			
						1993	1994	1995	1996
Referencia desnudo y no roturado	Tepetate T0	1 800	Tepetate aflorando	**	2 a 10	-	-	-	-
Efecto roturación	profundidad T2	470	Tepetate roturado	0.60	4.7	C + V	M+F+H	M + H	C + Md
Referencia monocultivo	T3	775	"	0.46	3.2	C	M	M	C
Efecto de la preparación (fina)	estiércol T4	730	"	0.43	3.4	C + V	M+F+H	M + H	C + Md
Efecto de la preparación de la tierra y nivelación (fina)	T5	790	"	0.44	2.5	C + V	M+F+H	M + H	M+ ***
Referencia de 1995)	(hasta inicio T6	1150	"	0.40	4.4	C + V	M+F+H	-	-
A partir del inicio 1995	de T6a	735	"	0.40	4.4	-	-	M + H	M + H
Referencia suelo	T7	715	Faozem vértico	0.53	5.9	C + V	M+F+H	M + H	C + Md

<sup>1</sup> Este programa reagrupaba el ORSTOM (Francia) y el Colegio de Postgraduados en ciencias agrícolas de Montecillo (México) en la parte oriental del Valle de México y la Universidad de Giessen (Alemania) y la Universidad Autónoma de Tlaxcala (México) en el Estado de Tlaxcala.

Tepetate Profundidad de la roturación, \*\* No roturado \*\*\* Contreo, C: Cebada, V: Veza, M: Maíz, F: Frijol, H: Haba, Md: Medicago polymorfa

### Medición de los escurrimientos y sedimentos arrastrados

Cada terraza tuvo una pendiente general dirigida hacia un vertedor tipo H, el cual desembocaba en una pileta de partición de agua de un volumen de casi un metro cúbico. Esta pileta tenía a su vez una salida hacia una segunda pileta, donde se recolectaba una parte (1/20 o 1/10 según los modelos) del volumen total de agua. Finalmente, esta segunda pileta se vertía a su vez en un tambo de metal, también en una proporción de 1/20 o 1/10 del volumen de agua que excedía su capacidad.

Las piletas fueron de concreto, pintadas en 1994 para evitar la contaminación del agua por el cemento. Al nivel del vertedor, teníamos un limnógrafo tipo Stevens horizontal de registro diario, escala 1/1, con relojería de cuarzo.

Después de cada lluvia se midió la altura de agua en las piletas y se recuperaban todos los sedimentos en bolsas de plásticos. Después dichos sedimentos eran secados en una estufa a 105 °C, por periodos de uno a tres días para tener un peso seco comparable entre las muestras. Los limnógrafos realizados manualmente sobre una mesa de digitalización conectada a una computadora, a través del programa "Hydrom" desarrollado por ORSTOM, con el cual también se procesaron todos los escurrimientos, independientemente de su duración o altura.

Para completar los datos y mejorar su interpretación, se efectuaron una serie de estimaciones y su análisis a lo largo de estos años. Así, se tomaron sistemáticamente muestras de agua que fueron analizadas en el laboratorio de fertilidad de suelos del Colegio de Postgraduados, se evaluaron los parámetros siguientes: pH, conductividad eléctrica, N, P, cationes intercambiables, materia orgánica y la determinación de la cantidad de sedimentos en suspensión.

También, a partir de 1994 se efectuó, el seguimiento de la evolución de la superficie de los suelos y de la cobertura vegetal después de cada aguacero violento, o sea una a dos veces por semana en promedio, durante la época de lluvia (Lauffer et al. 1997).

Los datos fueron complementados con observaciones y muestreos efectuados en una docena de aguaceros a lo largo de los cuatro años de estudio.

En la medida de lo posible, se realizaban levantamientos semi-cuantitativo del estado de los surcos, a lo largo y ancho de cada terraza. Igualmente, se instaló un sistema sencillo para captar el agua y los sedimentos arrastrados del bordo de separación entre las terrazas T2 y T3 para estimar como se comportaba un bordo nuevamente construido. Finalmente, se efectuaron mediciones de humedad de suelo a lo largo y ancho de cada terraza con un aspersor de neutrones en tubos fijos, y se realizaron muestreos para mediciones directas.

### Características de las precipitaciones

Normalmente, 90% de los eventos pluviométricos caen a lo largo de la temporada de lluvia entre mayo-octubre (ver Cuadro 2). Sin embargo, en 1995 y en 1996, la cuarta parte de las precipitaciones anuales ocurrió durante la temporada seca (noviembre-abril). Por eso es importante monitoriar todo el año, con los equipos de registros de lluvias. En nuestra área de estudio el 90% de los aguaceros tiene una intensidad inferior a los 5 mm/h. Su duración es inferior a los 30 minutos para la mitad de ella, y en esta mitad, un 30% no supera los 15 minutos. La intensidad máxima ocurre durante los primeros quince minutos.

**Cuadro 2. Características principales de las lluvias en San Miguel Tlaixpan, 1992-1996.**

	1992	1993	1994	1995	1996	92-96
Número de días de lluvia	126	81	105	120	90	105
Altura total (mm)	654	411	736	768	583	627
Número de aguaceros registrados con el 193 pluviógrafo y procesados		132	148	154	109	147
Altura de aguaceros registrados con el 654 pluviógrafo y procesados		396	594	529	418	518
% de días de lluvias registradas vs 99 totales		96	81	69	72	83
R métrico	259	96	216	197	204	194
R usa	149	55	124	113	118	112
"Tipo" tentativo de clasificación del año pluviométrico	Normal	Muy erosiva	Normal	Irregular	Seco	e Año promedio

### Aptitud Productiva en Suelos Volcánicos Endurecidos (tepetates)

Solamente 10% de las precipitaciones generan una fuerte erosión. En otros términos: 16 aguaceros de una altura superior a 10 mm, representan 50% del volumen total de las precipitaciones y 80% del factor de erosividad anual de Wischmeier (Rus anual varía de 55 a 150 de acuerdo a los años). En promedio anual, tres aguaceros tienen una energía superior a 500 MJ/ha y una intensidad del orden de 50 a 150 mm/h durante 5 a 10 minutos (Prat, 1997).

El clima limita el desarrollo de los cultivos lo que trae como consecuencia tener una cobertura vegetal reducida en el suelo, que conlleva a aumentar los riesgos para ser mayores de moderadamente erosivos. Sin embargo, como las variaciones interanuales del factor R son muy fuertes (R puede variar del simple al triple), el control de la erosión puede ser a veces difícil. Además, de la irregularidad de los aguaceros.

### Escurrimiento y transporte de materiales sólidos

En el Cuadro 3 muestra una relación entre el coeficiente de escurrimiento ( $K_r$ ) y la cantidad de sedimentos transportados (Erosión). Aunque no haya una correlación estrecha entre estos dos parámetros, ya que la tasa de escurrimiento no expresa la energía cinética global.  $K_r$ , la erosión varía según los tratamientos comprobados y el grado de erosividad de los aguaceros durante cada año.

Aparece así claramente que el tepetate natural no trabajado ( $T_0$ ) presenta los más altos valores de  $K_r$  y erosión, después se clasifican las terrazas  $T_2$  y  $T_3$ , con valores al 50% de los obtenidos para  $T_0$ , y finalmente las terrazas  $T_4$  a  $T_7$  con los valores más bajos para estos coeficientes.

**Cuadro 3. Cantidades de sedimentos transportados (erosión, en t/ha en peso seco) y coeficiente de escurrimiento ( $K_r$  en %) para los aguaceros que escurrieron (1993-1996).**

Año	$T_0$		$T_2$		$T_3$		$T_4$		$T_5$		$T_6$		$T_7$	
	Eros.	$K_r$	Eros.	$K_r$	Eros.	$K_r$	Eros.	$K_r$	Eros.	$K_r$	Eros.	$K_r$	Eros.	$K_r$
1993	8.8	27.2	5.8	13.2	1.0	7.9	1.3	4.7	0.8	3.0	0.6	4.0	0.6	4.9
1994	28.9	50.7	15.5	31.2	12.0	38.6	3.7	17.3	1.4	10.3	1.6	13.3	0.1	0.8
1995	20.5	37.9	7.9	29.4	4.5	29.3	1.5	21.3	1.0	11.2	0.3	5.1	0.0	0.2
1996	18.2	53.3	11.0	49.7	13.7	53.4	1.6	30.3	0.1	4.0	0.8	18.5	5.0	29.8
Promedio	19.1		10.1		7.8		2.0		0.8		0.9		1.4	

### Sedimentos en suspensión

La tasa de sedimentos en suspensión (en porcentaje del peso total de materias sólidas erosionadas) se comportó en correlación con la naturaleza del suelo y el tipo de cultivo (Cuadro 4).

Basándose en estos resultados, se puede comparar: el tepetate natural roturado o no, y el suelo. El tepetate natural ( $T_0$ ) presenta un porcentaje bajo de producción de sedimentos en suspensión, en general un poco más de 30%, en promedio año. Lo anterior nos indica la predominancia de una erosión lineal bajo el efecto de un escurrimiento fuerte. A lo largo de estos 4 años, las observaciones muestran claramente, el ahondamiento de los arroyuelos que constituyen la red de escurrimiento de esta micro-cuenca.

**Cuadro 4. Porcentaje de sedimentos en suspensión en relación con el peso total de sedimentos por terrazas (1993-1996).**

Año	Terrazas							Cultivo principal
	T0	T2	T3	T4	T5	T6	T7	
1993	38	52	57	53	44	46	48	Cebada
1994	36	59	66	76	50	77	0	Maíz
1995	12	56	59	66	59	53	0	Maíz
1996	40	67	68	80	81*	80*	67	Cebada / Maíz*
Promedio	34	60	67	68	53	64	28	
Prom. 93+96	39	60	64	67	-	-	57	Cebada
Prom. 94+95	24	58	62	71	55	65	0	Maíz

En las terrazas de tepetate y de suelo cultivados, es al contrario el efecto directo de la energía cinética de los aguaceros que predominan, y que genera la erosión selectiva de las partículas finas.

Durante los años más erosivos (1994 y 1996), la tasa de escurrimiento aumentó, conduciendo a un alto porcentaje de partículas finas (70%), mientras que en 1993, (año poco erosivo) esta tasa se mantuvo a 50% en promedio. Eso demuestra que el escurrimiento depende de la intensidad y de la energía de los aguaceros.

En 1993, 1994 y 1995, no hubo diferencias significativas entre los tratamientos del tepetate trabajado, debido a que el proceso erosivo inicial fue el mismo para todos. Lo único que varió fue el volumen escurrido y transportado, de acuerdo a la capacidad de cada terraza para infiltrar y retener el escurrimiento y los sedimentos.

### El tepetate natural (T0)

El 75% de los aguaceros escurren sobre el tepetate natural (T0) con un  $30 < K_r > 50\%$ . La carga sólida está constituida principalmente por arena y limo. Según los años, los valores varían de 10 a 30 t/ha/año, con un promedio de 20 t/ha/año de sedimentos arrastrados.

Estos valores, aunque sean fuertes no son excepcionales en relación a otras situaciones, tanto en México como en otros países.

El tepetate natural, compactado y poco poroso, limita drásticamente la infiltración del agua, ocasionando que el agua se escurra y se concentre, generando una erosión en ranuras y en arroyuelos en la parte alta de las lomas -zona donde se realizaron las mediciones-.

Su compactación reduce también la destrucción y el arrastre de los materiales. Es notorio corroborar que aguas abajo predomina la erosión regresiva, la cual se estima en varios centenares de toneladas de suelo/ha/año).

Es esta última forma de erosión la que suponemos que explica la formación del paisaje actual de lomas con profundas cárcavas, entre éstas últimas unas con varias decenas de metros de profundidad y de ancho.

### El tepetate cultivado (terrazas T2 a T6)

A pesar de la aparente homogeneidad del sitio de experimentación fue posible observar diferencias estacionales entre T2 y las demás terrazas. Un análisis más fino de los estudios de la permeabilidad, porosidad, densidad, laminas delgadas, etc. Mostraron que el tepetate cultivado en T2 es más denso y compacto, y sobre todo presentó unos agregados mucho más frágiles que en los demás ensayos (Rugama, 1997). Considerando que la densidad de las plantas fue de 20 a 30% inferior a las existentes en las otras terrazas con cultivos asociados y la protección del suelo es menor al inicio del ciclo: en consecuencia son estos factores que explican las tasas tan elevadas de escurrimiento y de sedimentos arrastrados, en la terraza T2.

Los valores fuertes de erosión y de  $K_r$  para T3 son comparables a los de T2, se puede atribuir este comportamiento al monocultivo. Las mediciones y los seguimientos de los estados de superficie muestran claramente que la cobertura vegetal es más reducida en el caso de la T3.

Los agregados al estar menos protegidos se destruyen más rápidamente que en las demás terrazas, es por eso quizá que la erosión es alta.

Se observó que se forman más rápido las “costras”, lo que favorece el escurrimiento ( $K_r$  alto). Además, el maíz al interceptar las gotas de lluvia y al concentrar el agua sobre su caña, provoca la ruptura de los surcos al nivel de la base del cultivo. Este fenómeno, conocido como el “stem flow” (literalmente: flujo sobre la caña) es notablemente reducido en el caso de la asociación maíz/haba ya que el haba intercepta y dispersa las gotas de agua.

El seguimiento del estado de los surcos muestra una clara diferencia entre monocultivo y cultivos asociados. El haba al disminuir el “stem flow” del maíz disminuye las rupturas de los surcos y reduce por lo tanto la erosión (Lauffer *et al.*, 1997).

La terraza de T4 fue diferente a las demás terrazas debido a la aplicación regular de estiércol de bovino, en combinación se aplicaba una reducida cantidad de fertilizantes minerales.

Esta terraza presentó valores de erosión y  $K_r$  comprendidos entre los observados para T2-T3 y las de T5-T6, sin embargo, los seguimientos de los estados de superficie y pruebas de estabilidad estructural muestran que los agregados son más estables y que los macroagregados ( $> 2$  mm) son más numerosos que en los demás ensayos.

Estos datos coinciden con los efectos estructurantes y protectores bien conocidos de la materia orgánica, lo que va en contra de los valores de erosión y  $K_r$  que son más altos que los esperados.

En realidad, se puede explicar esta situación por problemas de manejo y de dosificación de la fertilización en algunas de ellas.

En efecto, debido al atraso en las fechas de aplicación, además porque las dosis de fertilización fueron demasiado bajas en relación con las necesidades de las plantas, en consecuencia los cultivos se desarrollaron de manera irregular: se observaron “manchas” con poca plantas distribuidas a lo largo y ancho de esta terraza. Su efecto fue que provocaron una insuficiente protección del suelo, suponemos que ello explica que el escurrimiento y el transporte de partículas finas fuera superior al estimado en las otras terrazas.

A pesar que en los demás protocolos la cobertura vegetal era más efectiva. T5 y T6 presentan pocas diferencias, mostrando así que la preparación inicial del suelo (fina/gruesa y plana/pendiente débil) tuvo finalmente un impacto débil.

Los valores bajos de erosión y Kr se pueden explicar por la buena protección del suelo gracias a las asociaciones de cultivos que se desarrollaron bastante bien a lo largo de su ciclo de cultivo.

Los rendimientos obtenidos en estas dos terrazas fueron los mejores y los más regulares.

Es importante señalar que durante el último año el ensayo con contreo fue muy efectivo (2 veces menos de erosión) en relación con el surco "normal". Sin embargo, sería recomendable validar este resultado, tratando de tener un año durante el cual los aguaceros sean más agresivos.

### **El suelo de referencia (T7)**

Este tratamiento corresponde al suelo no tepetatoso (Faeozem vértico) que cubre los tepetates. Esta terraza presenta valores bajos y variables de erosión y Kr. Aunque las "costras" se formaban rápidamente, la cohesión de estos suelos limita la degradación y la ruptura de los surcos. El papel protector del cultivo asociado tuvo un papel importante en la reducción de los procesos erosivos.

Sin embargo, observaciones cualitativas de algunas parcelas cercanas muestran que con terrazas largas, aunque sean estrechas, el agua al acumularse y concentrarse logra provocar en las partes bajas de las parcelas la erosión en ranuras, las cuales indudablemente evoluciona muy rápidamente en arroyuelos. Este proceso genera la afloración del tepetate subyacente.

### **Conclusiones**

Las características pluviométricas durante cinco años nos muestran su efecto como moderadamente erosivo. Sin embargo, las variaciones interanuales y anuales (en particular al inicio de la temporada húmeda) pueden ser muy fuertes, lo que dificulta el control de la erosión.

Con aguaceros de unos milímetros de altura o con una intensidad muy débil de unos milímetros por hora, un tepetate desnudo y aflorado genera grandes volúmenes de agua y sedimentos.

En estas condiciones, las superficies erosionadas de tepetates seguirán incrementándose y el medio natural degradándose.

Por eso, es primordial prever antes de iniciar un cultivo en tepetate roturado, utilizar sistemas para reducir al mínimo la erosión.

Después de una roturación cruzada de 40 cm de profundidad efectiva del tepetate con un bulldozer y un terraceo adecuado, es posible crear nuevos suelos. Pero se debe asegurar una buena fertilización de los cultivos, no solamente para obtener buenos rendimientos, sino también para obtener rápidamente una buena cobertura vegetal que protegerá los agregados frágiles del impacto de las gotas de agua.

Habrá que tomar precauciones con los cultivos sembrados al "voleo", ya que su Kr y las pérdidas de tierra son mayores que en los cultivos con surcos (maíz, haba, etc.).

Por eso, es importante asegurar una buena fertilización y asociar con una leguminosa, tal como la alfalfa local (*Medicago P.*) que es muy bien adaptada a las condiciones de la región. De preferencia deben sembrarse asociaciones frente a los monocultivos.

Recomendamos en especial, la asociación del maíz con el haba cuyo follaje permite balancear los efectos de "stem flow" del maíz que provocan la destrucción de los surcos.

También, se debe de fomentar cuando las parcelas están húmedas y no saturadas, prácticas de cobertura de residuos para conservar una buena agregación del suelo y postergar la formación de las costras en la superficie.



Aunque habra que corroborar con otros ensayos, aparenta que el surcado en contreo reduce de manera importante el escurrimiento y el transporte de materias sólidas.

El papel de la fertilización orgánica y la incorporación de los residuos de cultivo no aparecieron con efecto en el control de la erosión. Aunque los agregados sean más numerosos y más estables que en los demás ensayos, las dosis fueron muy bajas y la aplicación de la fertilización fue tardía, lo cual limito para tener una buena cobertura del suelo. Estas partes de suelo no protegido favorecieron la erosión. Si la recomendación de una fertilización orgánica no es rentable desde el punto de vista económico y tampoco se puede generalizar por no existir las cantidades de estiércol necesarias en el Valle de México, no obstante es la proposición de incorporar los residuos de los cultivos, por lo menos durante los primeros años después de la roturación del tepetate.

Los resultados de 4 años de seguimiento de la erosión en parcelas de campesinos mostraron que el tepetate aflorado y no trabajado genera un escurrimiento y una erosión importante que son necesarios de controlar para evitar una extensión de estos afloramientos. La roturación, la conformación de terrazas y el cultivo de los tepetates permiten llegar a la creación de suelos productivos. Sin embargo, es indispensable seguir una serie de recomendaciones para asegurar una buena producción agrícola y un control eficaz de la erosión de estos suelos. Bajo estas condiciones se podrá garantizar la rentabilidad económica de las inversiones y la sostenibilidad de estos trabajos, manejos de suelos y de cultivos.

### Bibliografía

Báez A., E., Ascencio, C., Prat y A., Márquez A. 1998. Condiciones for agricultural uses of an indurated volcanic tuf (tepetate). *In*: Transacción of the 16<sup>th</sup> World congress of soil science, Montpellier, France.

Báez A., E., Ascencio, C., Prat y A., Márquez A. 1997. Análisis del comportamiento de cultivos en tepetate T3 incorporado a la agricultura de temporal, Texcoco (Mexico). *In*: Zebrowski y al. (Eds), Actas del 3<sup>e</sup> simposio internacional sobre los suelos volcánicos endurecidos. 6-12 dec. 1996. ORSTOM, Quito, Ecuador. p. 296-310.

Lauffer M., Y., Leroux, C., Prat C. y J.L. Janeau . 1997. Organización superficial de los tepetates cultivados, Texcoco (Mexico). *In*: Zebrowski y al. (Eds), Actas del 3<sup>e</sup> simposio internacional sobre los suelos volcánicos endurecidos. 6-12 dec. 1996. ORSTOM, Quito, Ecuador. p. 443-456.

Marquez A., C., Zebrowski. y H., Navarro. 1992. Alternativas agronómicas para la recuperación de tepetates. *Terra*, Vol 10, N° especial. ORSTOM-CP, Mexico. p. 465-473.

Muñoz S.y H., Navarro, 1997. Uso de recursos, rentabilidad y sustentabilidad en los sistemas económicos familiares (SEF). *In*: Zebrowski y al. (Eds), Actas del 3<sup>e</sup> simposio internacional sobre los suelos volcánicos endurecidos. 6-12 dec. 1996. ORSTOM, Quito, Ecuador. p. 492-500.

Navarro H. y C., Prat . 1996. Rehabilitación agrícola de los tepetates de los valles de Mexico y Tlaxcala. *In: P. Bovin (Ed.), El campo mexicano: una modernización a marchas forzadas. CEMCA-ORSTOM. Mexico. p. 253-291.*

Navarro H. y C. Zebrowski 1994. La rehabilitación agricole des sols volcaniques indures y erodes en Equateur y au Mexique. *In: Simposium of the 15<sup>th</sup> World congress of soil science, Acapulco, Mexico. Vol 6a, p. 592-610.*

Prat C. 1997. Análisis de las características de las precipitaciones de 1992 a 1995 en San Miguel Tlaixpan (Texcoco, Mexico). *In: Zebrowski y al. (Eds), Actas del 3<sup>e</sup> simposio internacional sobre los suelos volcánicos endurecidos. 6-12 dec. 1996. ORSTOM, Quito, Ecuador. p. 359-370.*

Prat C., A., Báez . y A., Márquez. 1997. Erosión y escurrimiento en parcelas de tepetate T3 en Texcoco, Mexico. *In: Zebrowski y al. (Eds), Actas del 3<sup>e</sup> simposio internacional sobre los suelos volcánicos endurecidos. 6-12 dec. 1996. ORSTOM, Quito, Ecuador. p. 371-383.*

Prat C., T., Ly B, I., Lepigeon., G.,Faugere y J.L. Alexandre. 1997. Los sistemas agropecuarios de producción en tepetates, en cuatro comunidades del altiplano mexicano. *In: Zebrowski y al. (Eds), Actas del 3<sup>e</sup> simposio internacional sobre los suelos volcánicos endurecidos. 6-12 dec. 1996. ORSTOM, Quito, Ecuador. p. 482-491.*

Quantin P. 1992. Etude des sols volcaniques indures de Mexico y de Tlaxcala en vue de leur rehabilitación agricole. *Raport scientifique final, contrat CEE/ORSTOM: NTS2-A-212-C.*

Quantin P. 1997. Regeneración y conservación des sols volcaniques indures y steriles d' Amerique Latine (Chili, Equateur, Mexique). *Raport scientifique final, contrat UE/ORSTOM-U.J.L. Giessen: ERB TS3\*CT93 0252. 178 p.*

Rugama U., J. A. 1997. Evolución estructural del tepetate T3, producto de la roturación y manejo agricola. Tesis de Maestría, Instituto de Recursos Naturales. Montecillo, Mexico, Colegio de Postgraduados. 105 p.

Servenay A. 1997. Les paysages des tepetates du Mexique central volcanique: identification et caracterisation spatiale par teledetección y SIG: unes zones agricoles a rehabiliter. *Memoire DEA, Univ. Toulouse-el Mirail, ORSTOM, 90 p.*

Zebrowski C. 1992. Los suelos volcanicos endurecidos de America Latina. *Terra, Vol 10, numero especial. ORSTOM-CP, México. p. 15-23.*

Zebrowski C. y B., Sánchez . 1997. Los costos de rehabilitación de los suelos volcánicos endurecidos. *In: Zebrowski y al. (Eds), Actas del 3<sup>e</sup> simposio internacional sobre los suelos volcánicos endurecidos. 6-12 dec. 1996. ORSTOM, Quito, Ecuador. p. 462-471.*

### Aptitud Productiva en Suelos Volcánicos Endurecidos (tepates)

Todos nuestros más sinceros agradecimientos a los responsables y personal de los Laboratorios de Fertilidad, de Física de Suelos y de campo del Colegio de Postgraduados., del CIMMYT y de INIFAP-Chapingo: por su ayuda y consejos, así como al poblado San Miguel Tlaixpan que nos facilitó sus terrenos para nuestros protocolos experimentales