

# 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 m<sup>2</sup> with a precision of 10 cm<sup>2</sup> 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 (phaeozem).*

*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-údic (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<sup>2</sup> delimitadas por un rugosímetro o punto cuadrado, que utiliza el sistema de mallas y clavos (Jerome, 1991) que se desplazan

Tratamiento	Ref.	Área (m <sup>2</sup> )	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<sup>2</sup>.

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 húmeda. 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-desección.

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 —.

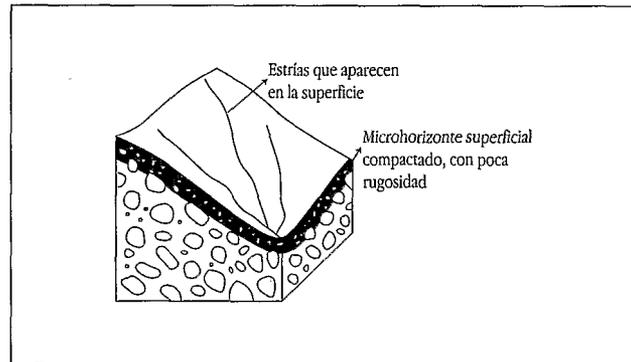
**Figura 1**  
**Costra estructural con predominio de plasma**



### *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)*

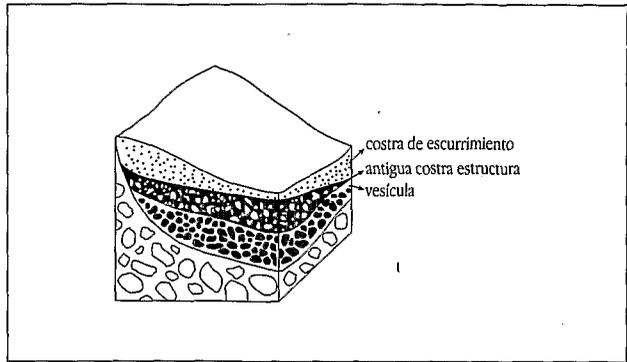
Se forma en las depresiones donde el escurrimiento superficial depende del micro-relieve (Casenave y Valentin, 1989). Bajo estas condiciones, las partículas en suspensión se depositan en función de su tamaño y de la velocidad del escurrimiento. Por ello, hay una alternación de material fino y grueso. 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)*

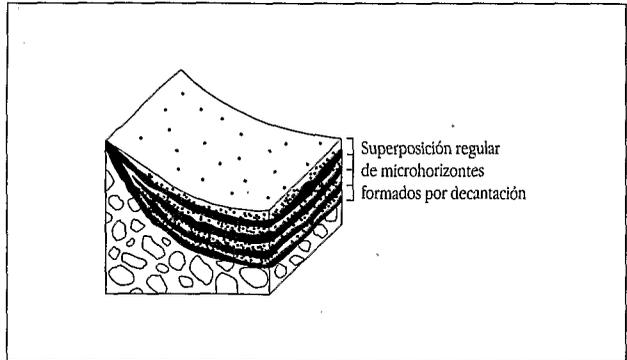
Se debe a la sedimentación de las partículas en suspensión en los charcos formados en las depresiones del micro-relieve: la clasificación granulométrica, muy marcada,

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**

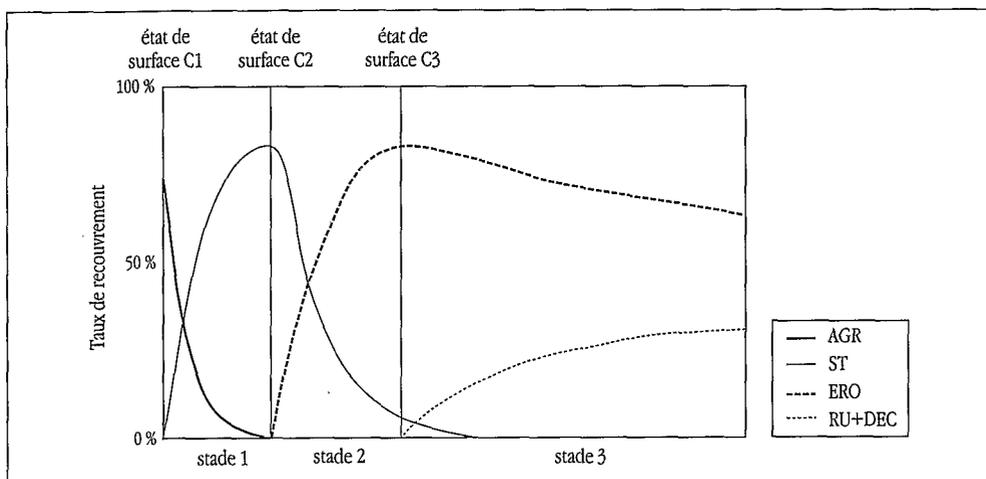
La diferencia de altitud de un mismo punto en fechas de medición distintas determina la evolución del relieve.

### **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 disminución 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:

$$I = \frac{ST + ERO}{AG + ST + ERO} + \frac{ERO}{ST + ERO} + \frac{RUI + DEC}{ST + ERO}$$

índice fase 1                  índice fase 2                  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 ( $\leq 90$  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  $560 \text{ J/m}^2$ . 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 ( $650 \text{ J/m}^2$ ) donde la cobertura vegetal es muy importante, y menor en T4 ( $250 \text{ J/m}^2$ ) 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 (Laufer, 1996)**

Añadiendo el factor cobertura vegetal a la modelización, donde  $K = \text{energía cinética de la lluvia} \cdot (1 - \text{coeficiente de cobertura vegetal})$ , 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<sup>2</sup> en las terrazas con tepetate mientras que en el caso de T7, es de 580 J/m<sup>2</sup>. 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 amplía aún más el ancho de la brecha, y el camellón deja de ser por completo un obstáculo para la circulación del agua (figura 9).

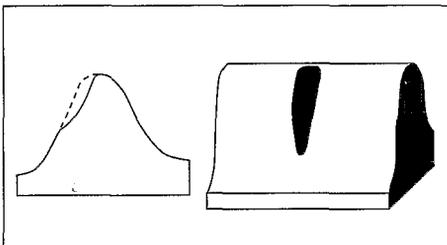


Figura 6 - Primera fase de degradación de un camellón

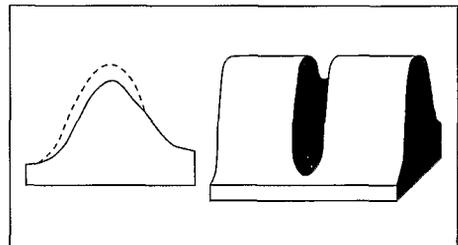
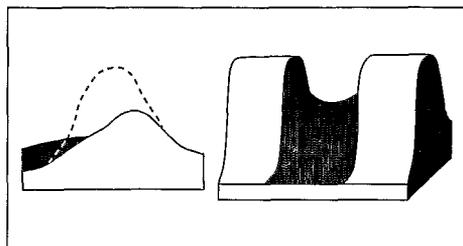
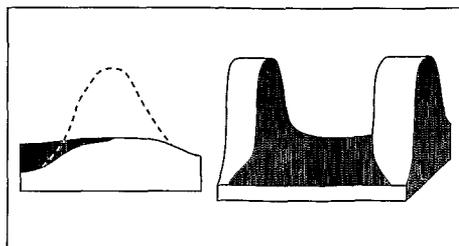


Figura 7 - Segunda fase de degradación de un camellón



**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 responden 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 amplificadas 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 amplía 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<sup>2</sup> 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 13 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, Paris, France, 77 p.
- PENA, D.; ZEBROWSKI, C., 1992: *Estudio de los suelos volcánicos endurecidos (tepetates) de las cuencas de México y Tlaxcala (México). Informe del mapa morfológico 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 ferallitiques 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.