

# 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<sup>2</sup>; 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 riocacitas. Capas delgadas (de algunos metros a algunos centímetros de espesor) de cenizas volcánicas se depositaron regularmente en la última 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.

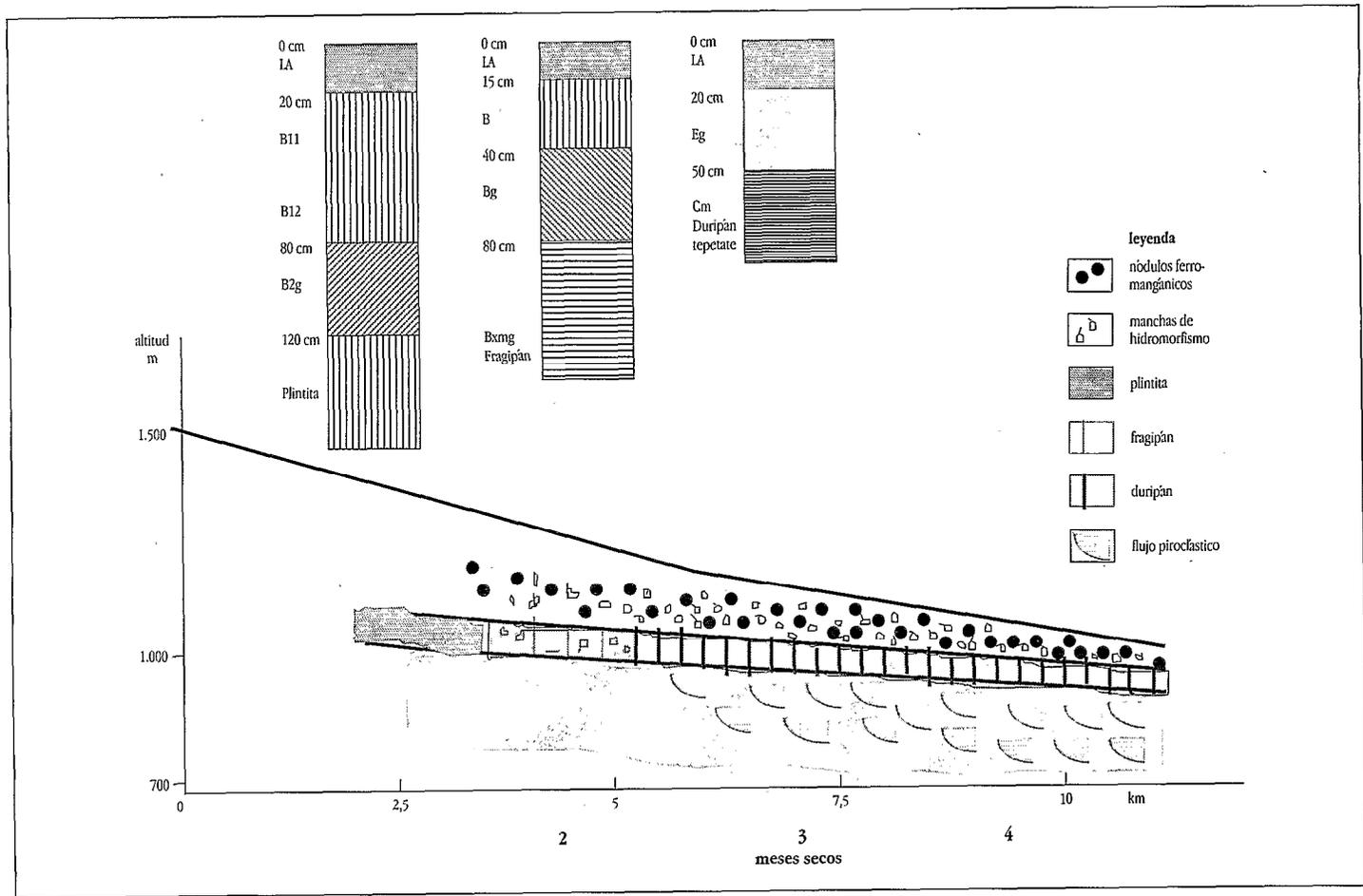


Figura 1 - Secuencia suelos ferralíticos redóxicos - suelos ferralíticos degradados silicificados

### 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-manganesicos 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	Goethita	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 riódacíticas 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<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mol. de 2,1 corresponde a la haloisita.

Horizonte	Pérdida al fuego %	soluble triácido %	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> mol.	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	
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 <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> mol.	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	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

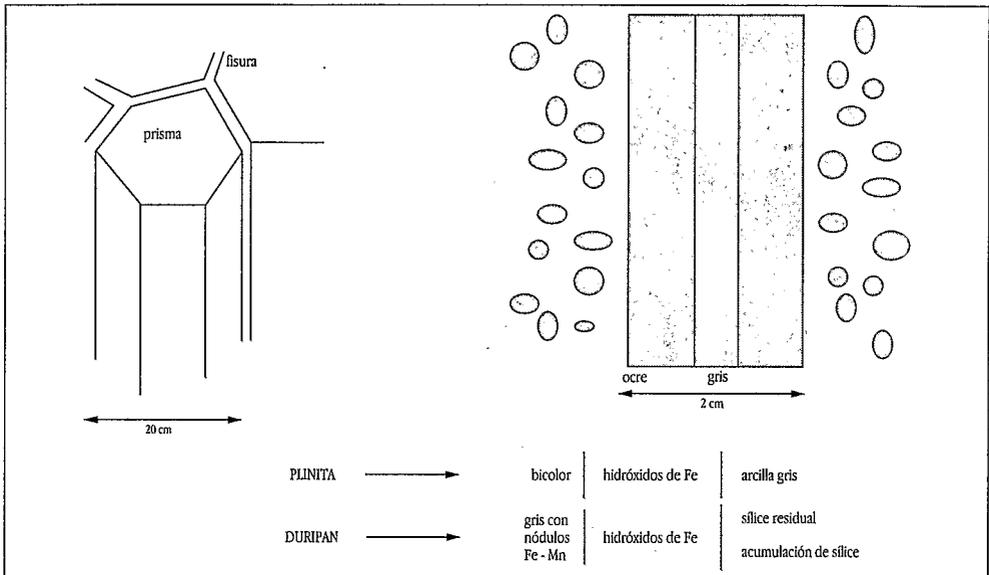


Figura 2 - Evolución de la plintita hacia el duripán

## SEGUNDO ESTADO:

### LOS SUELOS FERRALÍTICOS CON HORIZONTES REDÓXICOS SUPERFICIALES Y CON FRAGIPÁN EN PROFUNDIDAD

Estos suelos ferrálticos, 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 estructura 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 ferromanganesícos 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-manganesícos, 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<sub>2</sub>O) 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	+	++	++

e: 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 SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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).

Horizonte	Pérdida al fuego %	composición del soluble		
		soluble triácido %	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> mol.	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %
A3	8,5	60	1,95	12,1
Bx	8	67,4	2,1	22,2

Horizonte	Residuo %	composición del residuo			
		SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> mol.	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	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 tepetatosá 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 tepetatosá 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 oscuro a pardo oscuro, de textura limosa al tacto, estructura poliédrica poco neta, medianamente poroso; la parte inferior puede contener algunas manchas grises y ocre de óxido-reducción y nódulos ferromangánicos.

El horizonte Eg o Sg, de 20 a 50 cm de espesor, es de textura limo-arcilloso al tacto, de color pardo grisáceo, estructura poliédrica fina, medianamente poroso, con numerosas manchas grises y ocre 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<sub>2</sub>O) 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 riolíticas.

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<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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 <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> mol.	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	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 <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
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 morfoedafológico a escala 1:75.000 del área Xalapa-Coatepec*, INIREB/ORSTOM/CIRAD, Xalapa, Veracruz, México.