

IMPACTO DE LA ROTURACIÓN Y DEL MANEJO AGRONÓMICO DE UN TEPETATE SOBRE SU ESTRUCTURA

Impact of Mechanical Fragmentation and Agronomical Management on the Structure of Tepetate

Ch. Prat¹, V. Ordaz Ch.² y J.A. Rugama U.³

RESUMEN

La presión existente sobre la ampliación de la frontera agrícola y los problemas sociales que se presentan en áreas donde los tepetates afloran a la superficie del suelo, aunado a sus limitaciones físicas para uso agropecuario y forestal, han impuesto la necesidad de rehabilitar los tepetates. El presente estudio consistió en un experimento sobre el mejoramiento de las propiedades de un tepetate recién roturado para uso agrícola, en el marco de un programa conjunto entre ORSTOM (ahora IRD) de Francia y el Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, iniciado en 1992 en la comunidad de San Miguel Tlaixpan, municipio de Texcoco, estado de México. El diseño experimental usado fue completamente al azar con tres repeticiones. Los tratamientos consistieron en: 1) tepetate natural aflorado, 2) tepetate roturado a 60 cm con asociación de cultivos, 3) tepetate roturado a 40 cm con monocultivo, 4) tepetate roturado a 40 cm con asociación de cultivos y 20 t ha⁻¹ año⁻¹ de estiércol, 5) tepetate roturado a 40 cm con asociación de cultivos, 6) tepetate roturado a 40 cm con asociación de cultivos y labranza mínima y 7) un suelo agrícola. Las variables fueron algunas características físicas que permitieron evaluar la evolución de la estructura y otras variables las condiciones biológicas a través de la producción de CO₂. Los resultados mostraron que después de cuatro años de roturado el tepetate, se producen condiciones favorables de estructuración debido a la formación de agregados y fragmentos que aglutinándose aumentan la porosidad. La producción de CO₂ fue mucho mayor en los tepetates trabajados que en los inalterados, esto prueba el desarrollo de las actividades biológicas.

Palabras clave: Evolución estructural, agregados.

SUMMARY

Pressure to open up land to agriculture and the social problems existing in areas where 'tepetates' protrude to the surface of the soil, plus the physical limitations to its use in agriculture and forestry, have made it necessary to rehabilitate these areas. An experiment was conducted to test methods of improving the properties of recently fragmented tepetate for agricultural use. Mechanical fragmentation has been done since 1992 by the French institution ORSTOM (now IRD) and the Colegio de Postgraduados, Montecillo, Mexico, in the community of San Miguel Tlaixpan, municipality of Texcoco, state of Mexico. The experimental design used was completely random with three replications. The treatments were 1) natural, protruded tepetate, 2) tepetate mechanically fragmented at a depth of 60 cm and cultivated with crops in association, 3) tepetate mechanically fragmented at 40 cm cultivated with a single crop, 4) tepetate mechanically fragmented at 40 cm with monoculture in association and fertilized with manure 20 t ha⁻¹ yr⁻¹, 5) tepetate mechanically fragmented at 40 cm cultivated under crops in association, 6) tepetate mechanically fragmented at 40 cm cultivated with crops in association with minimum tillage, and 7) farm land. The variables used were physical characteristics and production of CO₂. The results showed that after four years of mechanical fragmentation, bulk density was reduced by aggregate formation and improved porosity resulting from agglutination of fragments. The production of CO₂ was higher in worked tepetates than in those that were unaltered, thus making biological activity evident.

Index words: Structural evolution, aggregates.

INTRODUCCIÓN

En el centro de México, existen horizontes endurecidos de origen volcánico llamados "tepetates",

¹ IRD (ex-ORSTOM). BP 64501, 34394 Montpellier cedex 5, Francia. (prat@mpl.ird.fr)

² Instituto de Recursos Naturales. Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, México. (ordaz@colpos.colpos.mx)

³ Instituto Nicaraguense de Tecnología Agropecuaria. Estelí-Nicaragua.

de la raíz Náhuatl tepetlatl; tetl: piedra y petatl: petate, connotativo etimológico de cama o petate de piedra (Simeon, 1887). Se encuentran desde la superficie hasta varios metros de profundidad, con un espesor de unos centímetros hasta varios metros. Están presentes en varios países de América Latina, en zonas de laderas de sierras volcánicas, pero se conocen con otros nombres (talpetate en Nicaragua, cangahua en Colombia y Ecuador).

En México, se estima que existen aproximadamente 4 millones de ha de tepetates (Zebrowski, 1992). Estos afloran principalmente en las faldas de la Sierra Nevada, en los estados de México, Tlaxcala y Puebla, y otra parte en los estados circunvecinos de Hidalgo, Querétaro y Morelos (Servenay y Prat, 2000). En estas áreas también se presenta la mayor densidad poblacional del país y, por consecuencia, ocurren graves conflictos sociales por la escasez de tierras de cultivo. Los usuarios de estos suelos frecuentemente abandonan sus parcelas agrícolas y emigran a las ciudades en busca de otras alternativas de empleo.

Desde el punto de vista agrícola, los tepetates presentan diversas limitantes edafológicas, en las que destacan su dureza, la baja cantidad de poros de tamaño medio y grandes, el bajo contenido de materia orgánica y de N, así como la baja actividad biológica que limitan su capacidad agropecuaria y forestal (Peña y Zebrowski, 1992a). Sin embargo, durante las dos últimas décadas, organismos nacionales e internacionales han implementado diversas prácticas de recuperación de tepetates con el fin de incorporarlos a las actividades productivas.

El presente estudio es parte de un experimento de conservación y mejoramiento de las condiciones agrícolas de un tepetate recién roturado para el control de la erosión con terrazas de “dimensión campesina”. Dicha experimentación se llevó a cabo de 1992 hasta 1996, en el marco del programa “Rehabilitación y conservación de los suelos volcánicos de América Latina (Chile, Ecuador, México)” que fue co-financiado por la Unión Europea. El ORSTOM (ahora, IRD), Francia y el Colegio de Postgraduados, México, fueron las dos principales instituciones involucradas en este programa para el valle oriental de México.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la transformación de algunas propiedades físicas, químicas y biológicas de un tepetate, después de cuatro años de roturación y de diferentes prácticas agrícolas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la parte este de la cuenca del río Coxacoaco, en tierras prestadas por la comunidad de San Miguel Tlaixpan, municipio de Texcoco, estado de México, entre los paralelos 19° 29' 53" N y 98° 47' 55" O, a una altitud de 2555 m. El clima es templado sub-húmedo, con un régimen higr-térmico ustic-isomesic, de tipo C(w1)(w) según la clasificación de Köppen, modificada por García (1981). La temporada de lluvia se extiende de mayo a octubre. La precipitación media anual es de 650 mm, el régimen de lluvias es altamente variable de 400 a 750 mm año⁻¹ (Prat, 1997). La temperatura promedio es de 10 °C.

El sitio experimental es una zona erosionada con afloramientos de varios tipos de tepetates. Las secuencias y perfiles, estudiados por Miehlich (1984) y Peña y Zebrowski (1992b), mostraron que se trata de una sobreposición de depósitos volcánicos de edad y composición diferentes. El horizonte superficial (0 a 30 cm) que constituye el suelo cultivado y de referencia en nuestras experimentaciones (Tratamiento 7) es un depósito eólico-coluvial arenoso-limoso del Holoceno, cubriendo un Paleosuelo vértico (30 a 70 cm) del Holoceno inferior de la serie T2 (30 a 200 cm), el cual cubre, a su vez, las series T3 (200 a 460 cm) y T4 (> 460 cm). El tepetate estudiado aquí es el t3 de la serie T3 y es el que cubre la mayor superficie de la región. Este tepetate corresponde a una toba andesítica que localmente puede presentar depositaciones de carbonatos en las fisuras (Oleschko *et al.*, 1992).

Desde un punto de vista edáfico, el suelo es un Phaeozem vertic o haplic, mientras que el tepetate t3 es un fragipan a tendencia calcárica, clasificado como Leptosol lítico, según el sistema propuesto por la FAO-UNESCO (1988), (Peña y Zebrowsky, 1992b). Localmente se conoce como tepetate amarillo, su textura es migajón arenoso, con estructura columnar fuertemente desarrollada que al romperse origina bloques gruesos extremadamente duros (Ortiz y Cuanalo, 1977).

Diseño Experimental y Diseño de Tratamientos

En 1996, cuatro años después del inicio de la habilitación agrícola del tepetate t3, se realizaron las mediciones del impacto de las prácticas de recuperación y del manejo del tepetate en su desarrollo estructural. Se utilizó un diseño

experimental completamente al azar, con tres repeticiones. Las evaluaciones se efectuaron en cada capa de 15 cm de profundidad hasta llegar al tepetate no alterado; los resultados que se presentan aquí corresponden sólo a la capa superficial de 0 a 15 cm. El diseño de tratamientos se describe en el Cuadro 1. En seis de los tratamientos (Tratamientos 2 al 7), los residuos de cosecha se reincorporaron a la parcela.

Variables Analizadas

Variabes químicas. El pH se midió en suspensión de una relación 1:2 suelo-agua.

La materia orgánica se determinó por el método propuesto por Walkley y Black, modificado por Walkley (1947).

La producción de CO₂ se determinó en muestras de cada tratamiento, incubadas durante 36 días a capacidad de campo, según la metodología descrita por Ordaz (1995). Dicha producción es usada como indicador de la actividad microbiana del suelo.

Variabes físicas. Densidad aparente (Da) y real (Dr); el método empleado para medir la Da fue el del cilindro de volumen conocido (Blake y Hartge, 1986). La Dr se determinó por el método del picnómetro (Forsythe, 1975).

Espacio poroso total (Pt). A partir de los datos obtenidos de Da y Dr, se calculó el espacio poroso total (Pt).

Distribución de agregados en seco y en húmedo. La distribución del tamaño de los agregados se evaluó utilizando el método propuesto por Yoder (1936), descrito por Kemper y Rosenau (1986). En seco, se colocó una muestra de 1 kg en una columna de tamices y, utilizando un vibrador mecánico, se cribó hasta obtener la proporción por tamaños en cada

tamiz. Las aperturas de las mallas fueron: 50.8, 31.7, 22.2, 11.5, 6.4, 2.4, 2.0 y < 2.0 mm de diámetro equivalente.

Estabilidad de los agregados. Se determinó por la técnica del cribado en húmedo, con los tamices de la misma dimensión de malla que en la prueba de distribución en seco.

El cálculo de los índices de agregación en seco y en húmedo se hizo a partir del porcentaje de agregados retenidos en cada tamiz. Los índices de agregación corresponden al diámetro medio ponderado (DMP):

$$DMP = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i$$

Donde: DMP = diámetro medio ponderado (mm); w_i = proporción del peso de la muestra retenida en el tamiz correspondiente (%); \bar{x}_i = promedio del diámetro de abertura del tamiz correspondiente a cada fracción (mm).

Constantes de humedad. La capacidad de campo (CC), el punto de marchitez permanente (PMP) y punto de saturación (PS) se realizaron con la olla y membrana de presión, y se utilizaron muestras tamizadas a 2 mm.

La conductividad hidráulica (K) se determinó en el laboratorio, para lo cual se usó el método del permeámetro de carga constante (Loveday, 1974) y se aplicó la ley de Darcy.

La velocidad de infiltración (I) se determinó usando el método del infiltrómetro de doble cilindro. Con la información de infiltración registrada en el campo, se construyó un modelo de acuerdo con la ecuación de Kostiakov (1932):

$$I = Kt^n$$

Cuadro 1. Diseños de tratamientos.

Tratamiento	Área m ²	Descripción de los tratamientos								Labranza mínima	
		Roturado		Profundidad		Asociación de cultivos		Estiércol		si	no
		si	no	40	60	si	no	si	no	si	no
1	1800		X								X
2	400	X			X	C+Md			X		X
3	700	X		X			X		X		X
4	700	X		X		C+Md		X			X
5	700	X		X		M + H			X		X
6	700	X		X		M + H			X	X	
7	700		X			C+Md					

Los Tratamientos 1 a 6 se establecieron en tepetate; el Tratamiento 7 consistió en un suelo agrícola. M = maíz; C = cebada; Md = *Medicago* sp.; H = haba.

Donde: I = velocidad de infiltración (cm h⁻¹); K = parámetro que presenta la cantidad de infiltración durante el intervalo inicial, t = tiempo (h), n indica la forma en que la velocidad de infiltración se reduce con el tiempo.

Evaluación estadística. El análisis efectuado a las variables evaluadas se apoyó con análisis de varianza y prueba de medias de Tukey.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los sitios estudiados tienen un pH neutro a ligeramente alcalino (Cuadro 2). La materia orgánica (MO) está casi ausente en el tepetate natural y es muy baja en los tratamientos de tepetate cultivado, salvo en el tratamiento donde se añadió estiércol (Tratamiento 4). Sin embargo, es preciso notar que en cuatro años de cultivo, sólo con la reincorporación de los residuos de cosecha (rastros), se logró triplicar el contenido de MO en el suelo, llegando casi al mismo valor que en el suelo de referencia (Tratamiento 7).

En la Figura 1, se presentan los resultados de la producción acumulada de CO₂, considerada como indicador de la actividad biológica de los tratamientos evaluados. Los resultados mostraron diferencias importantes entre los tratamientos evaluados. En el tepetate natural (Tratamiento 1), la producción de CO₂ fue menor que en el resto de los tratamientos. En los tratamientos de tepetate cultivado y el suelo natural, la producción de CO₂ fue similar. Esto demuestra el desarrollo extremadamente rápido de la actividad biológica (manifestación de vida) en los tepetates, lo que coincide con los resultados obtenidos por Ferrera (1992) y Ferrera *et al.* (1997). La mayor producción acumulada de CO₂ se presentó en el Tratamiento 4, lo

que indica que después de cuatro años de aplicación de abono, esto indujo un efecto modificador de los patrones de respiración, siendo mayor que en los tratamientos donde no recibieron materia orgánica.

Considerando que la Da es una de las propiedades físicas del suelo, dinámica en el tiempo y de alta variación en el espacio, tanto en el sentido horizontal como vertical, se estima que los resultados obtenidos de esta variable muestran el grado de evolución estructural debido al manejo del tepetate (Cuadro 2). El Tratamiento 1, que consistió en un tepetate inalterado, presentó el valor más alto de Da (1.50 Mg m⁻³), esto coincide con los rangos de Da reportados por Quantin *et al.* (1993). Los valores obtenidos en el resto de los tratamientos, que consistieron en tepetate roturado, presentaron valores que fluctuaron de 1.07 a 1.17 Mg m⁻³, lo que indica una disminución de un tercio de la Da del material original. Esta situación se debe a la roturación del material.

Referente a la Dr, los valores encontrados de 2.47 Mg m⁻³, en promedio, corroboran la naturaleza de un mismo material propio de los tepetates, en contraste con el valor del suelo agrícola (Tratamiento 7) que resultó con una Dr de 2.6 Mg m⁻³.

En relación con la porosidad total (Cuadro 2), los valores más altos se presentaron en los Tratamientos 3, 4 y 6, los cuales superaron 26 %, en promedio, la porosidad total existente en el tepetate no trabajado (Tratamiento 1, Pt = 44 %); este valor coincide con los reportados por Quantin *et al.* (1993), quienes mencionaron valores promedio de porosidad total de 45 % para tepetates no trabajados. Los tratamientos establecidos en tepetates roturados presentaron una porosidad total más alta (1 a 10 %) en relación con la del Tratamiento 7.

Cuadro 2. Resultados del análisis de algunas propiedades químicas y físicas, en el estrato 0 a 15 cm de los tratamientos evaluados.

Tratamiento	pH 1:2	MO [†] %	Densidad aparente Mg m ⁻³	Densidad real Mg m ⁻³	Porosidad total %	CC	PMP	PS
1	7.6 a	0.32 g	1.50 a	2.47 a	44	32 a	22 a	41 a
2	7.2 ab	1.11 f	1.14 bc	2.48 a	54	30 a	17 a	47 a
3	7.3 ab	1.46 d	1.07 c	2.48 a	57	33 a	19 a	49 a
4	7.2 ab	2.52 a	1.17 bc	2.47 a	55	32 a	19 a	48 a
5	7.3 ab	1.58 c	1.14 bc	2.45 a	52	32 a	21 a	45 a
6	7.2 ab	1.33 e	1.13 bc	2.46 a	55	31 a	17 a	50 a
7	6.6 b	1.75 b	1.25 b	2.60 b	52	20 b	11 b	42 a

* Promedio de tres repeticiones. Letras iguales son estadísticamente iguales (Tukey) con (α = 5 %).

† MO = materia orgánica; CC = capacidad de campo; PMP = punto de marchitez permanente; PS = punto de saturación.

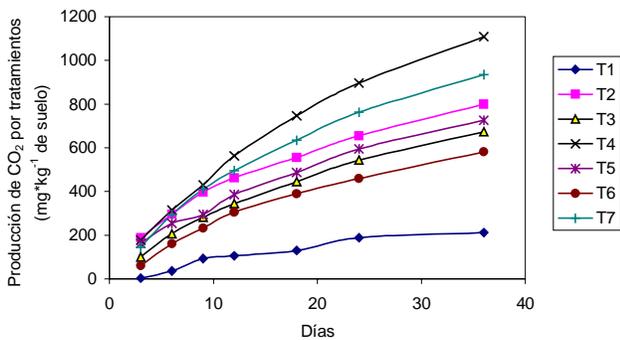


Figura 1. Producción acumulada de CO₂ en función de cada tratamiento.

Con respecto a la distribución del tamaño de fragmentos y agregados en seco, el tepetate no roturado (Tratamiento 1) fue el que presentó las más altas proporciones de los diámetros grandes, en comparación con los demás ensayos. Eso se debe a la compactación del material natural, en contraste con el material del tepetate roturado que inclusive se llegaron a formar agregados. Es interesante notar que los tratamientos de tepetate roturado (Tratamientos 2 a 6) presentaron una distribución de tamaño de agregados bastante similar a la del suelo de referencia (Tratamiento 7), cuando en realidad se trata de un sustrato con características diferentes.

De acuerdo con Lauffer *et al.* (1997), los agregados de 2 a 4.8 mm de diámetro son considerados como los agregados de tepetates más estables y resistentes a la erosión. Justamente, fue en estos rangos y ampliado hasta 11.5 mm, que no se presentaron diferencias entre los tratamientos, lo que corrobora la resistencia a la erosión de estos fragmentos.

El análisis estadístico efectuado con el porcentaje de agregados por diámetro mostró diferencias significativas ($\alpha = 0.05$) entre el tepetate no roturado (Tratamiento 1) y los demás ensayos para los diámetros superiores a 2 mm; el Tratamiento 1 presentó el valor más alto. Al inverso, con los diámetros inferiores a 2.4 mm, el tepetate natural presentó menor proporción de agregados de este tamaño que los demás tratamientos. Entre estos dos extremos, no se notan diferencias estadísticas entre los tratamientos para los diámetros de 2.4 hasta 11.5 mm.

La estabilidad de los agregados en agua del estrato 0 a 15 cm, en todos los casos, la mayor proporción correspondió a los agregados de un diámetro superior o igual a 3.25 mm. El Tratamiento 1 presentó el valor

más alto (78 %) de agregados mayores que 3.25 mm, seguido por el Tratamiento 4 (68 %) donde se añadió estiércol a la parcela; las demás parcelas mostraron proporciones menores que 55 %.

La proporción de agregados pequeños (< 0.15 mm) estables en agua fue menor en los Tratamientos 1 y 4 (4 y 9 %, respectivamente) y relativamente similares (< 15 %) para los demás tratamientos.

Estas proporciones se confirman con los datos del diámetro medio ponderado (DMP). Los resultados fueron bastante similares entre tratamientos, aunque el Tratamiento 4 presentó el valor más alto (2.4 mm). De acuerdo con la escala propuesta por Montenegro y Malagón (1990), se consideran como moderadamente estables.

Una observación minuciosa de la distribución de agregados, en seco o en húmedo, mostró que una gran proporción no son agregados sino pequeños fragmentos “masivos” de tepetate y, por lo tanto, bastante estables. Estas observaciones coinciden con las realizadas por Fechter-Escamilla y Flores (1997), Velázquez (1997) y Báez *et al.* (2001).

Estos resultados muestran que, a pesar de los años, la agregación es lenta en condiciones de cultivo sin mayor aporte de MO en el tepetate roturado. En un trabajo sobre los micro-agregados con estos mismos suelos, Barthés *et al.* (2000) llegaron a las mismas conclusiones sobre la función de la MO y la estabilidad de los micro-agregados, generando una relación lineal entre estos parámetros, así como entre micro agregados y tasa de erosión anual.

Los resultados de capacidad de campo (CC) y de punto de marchitez permanente (PMP) mostraron una diferencia de alrededor de 10 % entre los tratamientos del tepetate (T1 a T6) y del suelo (T7). En cuanto a la humedad a saturación (HS), los resultados fueron homogéneos, excepto en los tratamientos del tepetate natural (T1) y del suelo (T7), que mostraron valores inferiores a los demás.

Las curvas de retención de humedad siguieron estas tendencias: curvas similares para los tratamientos con tepetates, mientras que el Tratamiento 7 (suelo) fue muy diferente; éste presentó una humedad aprovechable que correspondió a un tercio de los demás casos.

En el caso de los parámetros hídricos de suelos y tepetates tamizados, lo que realmente se estima son los atributos que constituyen a los elementos texturales, dado que se hace una modificación de la granulometría del espacio poroso natural. Por esta

razón, los tepetates retienen más agua por ser más arcilloso-limosos que el suelo natural (T7), donde predomina mayor cantidad de arena. Estos resultados muestran la poca influencia entre los tepetates que se han cultivado durante cuatro años y el tepetate inalterado, en el cual el efecto de la MO y de otros factores de agregación es casi nulo para estos parámetros.

Los resultados de conductividad hidráulica para los Tratamientos 2 al 6 se mantuvieron en el rango de una conductividad hidráulica moderada. El Tratamiento 7 (suelo agrícola) presentó el valor más alto (6.21 cm h^{-1}) y el valor más bajo se obtuvo para el Tratamiento 1 (0.45 cm h^{-1}). Esta misma tendencia se presentó con la velocidad de infiltración ($T1 = 0.02$ y $T7 = 0.34 \text{ cm h}^{-1}$), los Tratamientos 4, 5 y 6 presentaron valores de infiltración de 0.14, 0.18 y 0.12 cm h^{-1} , respectivamente, y correspondieron a tepetates roturados con asociación de cultivos.

Estos resultados son consistentes con los encontrados por Figueroa y Morales (1992) y Fechter-Escamilla *et al.* (1997), así como con los resultados de sedimentos arrastrados y los escurrimientos medidos por Prat *et al.* (1998). En todos los casos, el Tratamiento 1 correspondió al de menor infiltración y, por consecuencia, mayor escurrimiento y mayor producción de sedimentos ($30 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Los tratamientos con mayor cobertura vegetal (cultivos asociados) presentaron la mayor infiltración, el menor escurrimiento y producción de sedimentos (1 a $4 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Los Tratamientos 2 y 3 están entre estos dos extremos, pero más cercano al tepetate natural no trabajado.

CONCLUSIONES

- Con base en los resultados obtenidos, se confirma que la roturación y el manejo del tepetate conducen a una reducción de la densidad aparente gracias a la fabricación de agregados y fragmentos de tepetates que, aglutinándose, fomentan la porosidad. La producción de CO_2 es mucho mayor en los tepetates roturados que inalterados; esto manifiesta el desarrollo de las actividades biológicas.

- Las prácticas de roturación y manejo agrícola de un tepetate, después de cuatro años, llegan a crear y mantener un espacio poroso total, igual o superior al existente en un suelo agrícola. Un alto porcentaje de agregados son en realidad fragmentos de tepetate. Más de la mitad de los agregados/fragmentos son menores

que 2 mm de diámetro, lo que favorece los fenómenos de encostramiento superficial.

- Después de cuatro años de cultivo, se nota que los diferentes tratamientos de manejo de un suelo creado a partir de un tepetate roturado, pueden conducir a cambios importantes de su estructura. La aplicación de estiércol a un tepetate roturado incrementa el porcentaje de agregados de la Clase 2 a 11 mm de diámetro y, por consecuencia, su capacidad de retención de agua, su conductividad hidráulica y su infiltración.

LITERATURA CITADA

- Báez P., A., J. Etchevers B., C. Hidalgo M., V.M. Ordaz Ch., Ch. Prat y R. Núñez E. 2001. Dinámica del carbono orgánico en tepetates cultivados. Tesis de Maestría. Instituto de Recursos Naturales. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Barthés B., A. Azontondé, Z. Boli, C. Prat y E. Roose. 2000. Field-scale runoff and erosion in relation to topsoil aggregate stability in three tropical regions (Benin, Cameroon, Mexico). *European J. Soil Sci.* 51-3: 485-495.
- Blake, R.G. y H.K. Hartge. 1986. Bulk density. pp. 363-375. *In: Methods of soil analysis.* Number 9 (Part 1), in the series Agronomy, Chap. 13. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, WI.
- FAO-UNESCO. 1988. Mapa mundial de suelos. Organización de las Naciones Unidas. Roma, Italia.
- Fechter-Escamilla, U. y G. Flores G. 1997. Propiedades físicas de suelos volcánicos endurecidos (tepetate t3) después de su rehabilitación en Tlaxcala (México). pp. 162-169. *In: C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo (eds.). 3er Symposium Internacional Suelos Volcánicos Endurecidos.* ORSTOM-UE-PUCE-UCE. Quito, Ecuador.
- Fechter-Escamilla, U., A. Vera y G. Werner. 1997. Erosión hídrica en un suelo volcánico endurecido (tepetate t3) en el bloque de Tlaxcala (México). pp. 351-358. *In: C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo (eds.). 3er Symposium Internacional Suelos Volcánicos Endurecidos,* ORSTOM-UE-PUCE-UCE. Quito, Ecuador.
- Ferrera-Cerrato, R. 1992. Papel de los microorganismos en la recuperación de suelos marginados. *Terra Número Especial* 10: 408-418.
- Ferrera-Cerrato, R., A. Ortiz Catón, J. Delgadillo Martínez y S. Santamaría Romero. 1997. Uso de la materia orgánica en la recuperación de tepetates y su influencia en los microorganismos. pp. 225-237. *In: C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo (eds.). 3er Symposium Internacional Suelos Volcánicos Endurecidos,* ORSTOM-UE-PUCE-UCE. Quito, Ecuador.
- Figueroa S., B. y F.J. Morales F. 1992. Manual de producción de cultivos con labranza de conservación. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Colegio de Postgraduados-CREZAS. México.
- Forsythe, W. 1975. Física de suelos. Manual de laboratorio. ICA. San José, Costa-Rica.

- García, E. 1981. Modificaciones al sistema climático de Köppen (para aplicarla a las condiciones de la República Mexicana). 3a ed. México, D.F.
- Kemper, D.W. y C.R. Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. pp. 425-460. *Methods of soil analysis*. Number 9. (Part 1) Series Agronomy, Chap. 17. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Kostiakov, A.N. 1932. On the dynamic of the coefficient of water percolation in soils and the necessity for studying it from a dynamic view for purposes of amelioration. pp. 17-21. *In: Trans 6th Com. Int. Soc. Soil Sci., Russian part A*. Russian Soil Science Society. Moscú, Rusia.
- Lauffer, M., Y. Leroux, C. Prat y L.J. Janeau. 1997. Organización superficial de los tepetates cultivados (Texcoco, México). pp. 443-456. *In: C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo (eds.)*. 3er Symposium Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. ORSTOM-UE-PUCE-UCE. Quito, Ecuador.
- Loveday, J. 1974. Methods for analysis of irrigated soil. pp.78-87. *In: Technical Ed. Communication 54 of the CSIRO Division of Soils*. Commonwealth Agricultural Bureaux. Victoria, Australia.
- Mielhich, G. 1984. Chronosequenzen und anthropogene Veränderungen andesitischer Vulkanaschböden in drei Klimastufen eines randtropischen Gebirges (Sierra Nevada de México). Universität Hamburg. Hamburg, Deutschland.
- Montenegro G., H. y D. Malagón C. 1990. Propiedades físicas de los suelos. Ministerio de Hacienda y Crédito Público. Instituto Geográfico "Agustín Codazzi". Bogota, Colombia.
- Oleschko, K., P. Quantin, C. Zebrowski y N. Fedoroff. 1992. Patrones micromorfológicos de organización de arcillas en tepetates (México). *Terra 10 Número Especial*: 183-191.
- Ordaz Ch., V. 1995. Impact de la culture intensive des agrumes sur le fonctionnement des sols dans une zone tropicale du Mexique (Tabasco). Institut National Agronomique Paris-Grignon, France. *Sols 20*: 178.
- Ortiz S., C. y H. Cuanalo C. 1977. Levantamiento fisiográfico del área de influencia de Chapingo. Colegio de Postgraduados-Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, México.
- Peña, D. y C. Zebrowski. 1992a. 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 y anexos: 1. Mapas temáticos; 2. Descripción de perfiles; 3. Resultados de análisis. Commission des Communautés Européennes, contrat CEE/ORSTOM N° TS2-0212/Ed. ORSTOM-Paris, Colegio de Postgraduados, Montecillo, J. Liebig Univ. Giessen, Univ. Aut. de Tlaxcala. 98 p.
- Peña H., D. y C. Zebrowski. 1992b. Los suelos y tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. *Terra 10 Número Especial*: 151-170.
- Peña H., D. y C. Zebrowski. 1992c. Caracterización física y mineralógica de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. *Terra 10 Número Especial*: 156-163.
- Prat, C. 1997. Análisis de las características de las precipitaciones de 1992 a 1995 en el área experimental de San Miguel Tlaxpan (Texcoco, México). pp. 359-370. *In: C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo (eds.)*. 3er Symposium Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. ORSTOM-UE-PUCE-UCE. Quito, Ecuador.
- Prat, C., A. Báez, E. Ascencio y A. Márquez. 1998. Erosión de una toba volcánica endurecida en proceso de rehabilitación. pp. 89-97. *In: H. Navarro Garza, H. Poupon y M. A. Pérez Olivera (eds.)*. Aptitud productiva en suelos volcánicos endurecidos (tepetates). ORSTOM-Colegio de Postgraduados. México.
- Quantin, P., A. Arias, J. Etchevers, R. Ferrera, K. Oleschko, A. Navarro, G. Werner y C. Zebrowski. 1993. Tepetates de México: Caracterización y rehabilitación para la agricultura (Informe científico final del proyecto TS2-A 212 CEE/ORSTOM). *Terra 11. Número Especial*.
- Servenay, A. y C. Prat. 2000. Classification from landsat TM of indurated volcanic materials (tepetates) of the Mexican neovolcanic belt. *Geocarto Intl.* 15: 55-62.
- Simeon, R. 1887. Dictionnaire de la Langue Nahuatl ou Mexicaine. Ed. Siglo XXI. México, D.F.
- Velázquez R., A. 1997. Disgregación, alteración y agregación de dos niveles de trituración de tepetates del estado de Morelos por especies vegetales perennes en condiciones de invernadero. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Walkley, A. 1947. A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils. Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Sci.* 63: 251-263.
- Yoder, R.E. 1936. A direct method of aggregate analysis and study of the physical nature of erosion losses. *J. Am. Soc. Agron.* 28: 337-351.
- Zebrowski, C. 1992. Los suelos endurecidos en América Latina. *Terra 10 Número Especial*: 15-23.