

Formación de suelos a partir de tepetates: unidades estructurales, carbono orgánico y estabilidad estructural

Soil formation from tepetates: structural unities, organic carbon, and structural stability

Alma S. Velázquez-Rodríguez¹ , Aurelio Báez-Pérez² , Claudia Hidalgo-Moreno³ ,
Mayra Parsa-Retana¹ , Jorge Etchevers-Barra³  y Fernando Paz-Pellat^{4*} 

¹ Facultad de Ciencias, Campus El Cerrillo, Universidad Autónoma del Estado de México. Carretera Toluca - Ixtlahuaca km 15.5, Piedras Blancas. 50200 Toluca de Lerdo, Estado de México, México.

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, CE Bajío. Carretera Celaya San Miguel de Allende km 6.5. 38010 Celaya, Guanajuato, México.

³ Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental, ⁴ GRENASER, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México- Texcoco km 36.5, Montecillo. 56230 Texcoco, Estado de México, México.

* Autor para correspondencia (ferpazpel@gmail.com)

Editor invitado: Dr. Fernando Paz Pellat

RESUMEN

La formación de suelos a partir de capas endurecidas de origen volcánico -tepetates- roturadas, depende del sistema de manejo que se utiliza para su habilitación a un uso agrícola o pecuario, por lo que el desarrollo de modelos que permitan entender la transformación de las unidades estructurales, de fragmentos a agregados, reviste gran importancia. Desde esta perspectiva, en el presente trabajo se propone y justifica el uso de un modelo de cinética de orden n , para modelar la distribución de la masa y carbono orgánico en las unidades estructurales de tepetates bajo cultivo y predecir su evolución hacia la formación de suelo. La validación del modelo y las relaciones propuestas, se realizaron a partir de la comparación de la dinámica de estructuración en tepetate, con diferentes casos de estudio, que incluyen sustratos con características diferentes, como suelos, suelos degradados y marga. Los resultados de la modelación fueron altamente favorables ($R^2 > 0.98$). La evolución temporal del agente cementante en los sustratos -el carbono orgánico- así como la estabilidad estructural, de acuerdo con el modelo propuesto definen patrones que se asocian directamente la evolución de la formación de suelo con el nivel de agregación. En experimentos de corto

plazo (≤ 2 años), los análisis destacan la participación de otros agentes, además del carbono orgánico, que controlan los mecanismos de agregación, por lo que se planteó una extensión del modelo propuesto, para considerar este escenario.

Palabras clave: *agregados y fragmentos, cinética de orden n , experimentos de corto plazo, materiales endurecidos, relación masa y carbono orgánico.*

SUMMARY

The formation of soils from hardened layers of volcanic origin -tepetates- broken, depends on the management system that is used to enable it to be implemented for agricultural or livestock use, so the development of models that allow understanding the transformation of structural units, from fragments to aggregates, is of great importance. From this perspective, the present work proposes and justifies the use of a kinetic model of order n , to model the distribution of mass and organic carbon in the structural units of tepetates under cultivation and predict their evolution towards soil formation. The validation of the model and the proposed relationships were carried out from the comparison of the dynamics of structuring

Cita recomendada:

Velázquez-Rodríguez, A. S., Báez-Pérez, A., Hidalgo-Moreno, C., Parsa-Retana, M., Etchevers-Barra, J. y Paz-Pellat, F. (2022). Formación de suelos a partir de tepetates: unidades estructurales, carbono orgánico y estabilidad estructural. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-19. e1447. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1447>

Recibido: 14 de diciembre de 2021. Aceptado: 30 de marzo de 2022.
Artículo. Volumen 40, abril de 2022.

in tepetate, with different case studies, which include substrates with different characteristics, such as soils, degraded soil and loamy marl. The modeling results were highly favorable ($R^2 > 0.98$). The temporal evolution of the cementing agent in the substrates -organic carbon- as well as structural stability, according to the proposed model define patterns that are directly associated with the evolution of soil formation with the level of aggregation. In short-term experiments (≤ 2 years), the analyses highlight the participation of other agents, in addition to organic carbon, that control the mechanisms of aggregation, so an extension of the proposed model was reviewed, to consider this scenario.

Index words: *aggregates and fragments, n-order kinetics, short-term experiments, endured materials, mass and organic carbon relationship.*

INTRODUCCIÓN

La formación de suelos es un proceso que requiere de la comprensión de los procesos edafogénicos involucrados en la estructuración del sustrato, desde un punto de vista físico (partículas primarias y secundarias) y de la presencia de agentes cementantes, de modo que la dinámica pueda implementarse en procesos de habilitación o rehabilitación con fines agrícolas, pecuarios u otros. La distribución de las unidades estructurales secundarias (agregados) y el contenido de carbono (C), como principal agente cementante, definen la estabilidad de los suelos ante fuerzas de impacto y rompimiento, es decir, la resistencia a la disgregación, resultado de introducir energía al sistema (Blanco-Canqui y Lal, 2004; Bronick y Lal, 2005). Ante cualquier perturbación (niveles de energía aplicados), la estabilidad estructural del suelo se modifica, ya que se trata de una propiedad que depende de la disrupción o conservación de los agregados y de la resistencia de los agentes cementantes asociados.

Los tepetates son capas endurecidas, formadas por procesos geológicos, con influencia posterior de procesos edafogénicos, cuyo depósito original involucra materiales piroclásticos (Zebrowski, 1992). El proceso edafológico que presentan los tepetates, una vez que quedan expuestos a causa de la pérdida de las capas sobreyacentes, está regido por procesos físicos y químicos que tienen lugar a partir de la alteración de feldespatos, vidrio volcánico y otros materiales

amorfos, arcilla y cementantes en solución (Hidalgo, Quantin y Elsass, 1997). El uso de los tepetates para usos agrícolas, pecuarios o forestales, está severamente limitado debido a su dureza y baja fertilidad, resultado de su estructura masiva, alta densidad aparente y escaso o nulo contenido de materia orgánica. Desde el punto de vista físico, la integración del tepetate a la producción requiere necesariamente de su roturación, para obtener fragmentos que permitan la creación de espacios que garanticen un adecuado movimiento del agua, intercambio gaseoso, crecimiento de raíces y establecimiento de biota. Sin embargo, estos fragmentos suelen ser recompactados, cementados o erosionados, a causa de las fuerzas de impacto y rompimiento asociadas a las gotas de lluvia y el laboreo (Quantin, Zebrowski, Delaune y Hidalgo, 1992), de tal manera que, por sí misma, la roturación no asegura la habilitación a un uso agrícola, pecuario o forestal.

Ferrera, Ortiz, Delgadillo y Santamaria (1997), Acevedo-Sandoval, Velázquez y Flores (2001) y Velázquez-Rodríguez, Flores y Acevedo (2001) y Velázquez-Rodríguez, Flores, Etchevers y García (2008), reportan que en el tepetate la estructuración depende, casi en su totalidad, de la presencia de especies vegetales y materia orgánica. Las plantas desempeñan un papel fundamental al actuar como agentes de unión temporales, al empaquetar y mantener unidos grupos de fragmentos mediante las raíces; transitorios, al liberar a la rizosfera (rizodepositación) compuestos orgánicos susceptibles de formar uniones entre partículas primarias y fragmentos de diámetro reducido y, permanentes, cuando son compuestos orgánicos coloidales, como los ácidos húmicos y fúlvicos, los que actúan uniendo a la fracción mineral. Por otra parte, el uso de enmiendas orgánicas favorece la formación de agregados, ya que la materia orgánica actúa como enlace entre la fracción mineral y aporta la estabilidad necesaria a los agregados recién formados, para resistir los cambios originados por la lluvia y la labranza.

No obstante lo anterior, debido a la consolidación natural del tepetate y a su estructura masiva, resultado de su génesis, el análisis de la formación de suelo a partir de estos materiales, requiere del conocimiento de la dinámica de la transformación de fragmentos en agregados estables. Sobre este tema existen algunas experiencias previas, que plantean que gran parte del proceso depende del manejo de las parcelas y del tipo de cultivo que se emplee (Flores-Sánchez, Pérez

y Navarro, 2004; Prat *et al.*, 2015; Báez-Pérez *et al.*, 2021). Por otra parte, algunos autores han analizado, en forma empírica, la distribución del C por tamaño de agregados y sus masas, para definir los patrones y asociar el concepto de estabilidad estructural al contenido de C en los agregados (Paz, Hidalgo, Etchevers y Fuentes, 2012; Fuentes, Hidalgo, Paz y Etchevers, 2012; Báez-Pérez, Paz, Etchevers y Hidalgo, 2012; Velázquez-Rodríguez, Paz, Hidalgo y Etchevers, 2012b).

Los tepetates constituyen un sustrato que permite analizar diversos procesos edáficos a través de experimentos sencillos en condiciones controladas, en los que se aplica materia orgánica al material roturado, con la finalidad de habilitarlos a un uso agrícola, pecuario o forestal (Velázquez-Rodríguez, Flores, Etchevers y Paz, 2012a y Velázquez-Rodríguez *et al.*, 2012b). Al mismo tiempo, es factible analizar la formación de suelo y su relación con los compuestos que actúan como agentes cementantes entre las partículas primarias (Velázquez-Rodríguez *et al.*, 2012a), debido a que las unidades resultado de la roturación del tepetate son una mezcla de fragmentos y agregados (Báez-Pérez *et al.*, 2012), con un dominio casi total de los primeros, por lo que representan un estadio inicial en la formación suelo, cuya evolución dará como resultado un sustrato constituido sólo de agregados. Sin embargo, los estudios de esta naturaleza son escasos.

Es indispensable destacar que, en el caso de los tepetates, el término *unidades estructurales*, incluye tanto agregados, como fragmentos. Experimentalmente, la separación de unidades estructurales se realiza a través de técnicas de fraccionamiento en seco y en húmedo, mediante el uso de tamices con diferentes aberturas de malla (Kemper y Rosenau, 1986). El tamizado en seco se relaciona con la resistencia (estabilidad) de los agregados a la desintegración mecánica y, en húmedo, se consideran efectos bioquímicos adicionales, como los propiciados por la lluvia y el riego. Las fuerzas ejercidas en el proceso de tamizado en húmedo son menos abrasivas que en el proceso en seco. Emerson y Greenland (1990) indican que, en suelo, durante el tamizado se presentan fuerzas de disgregación (rompimiento de grandes agregados en más pequeños) y dispersión (liberación de partículas primarias).

Desde el punto de vista agrícola, las prácticas de manejo perturban la matriz del suelo, lo que provoca

cambios en su estructura (Fuentes *et al.*, 2009). La labranza rompe los agregados y reduce el contenido de materia orgánica, al facilitar su mineralización. De acuerdo con Fuentes *et al.* (2011), los suelos bajo labranza cero, generalmente presentan mayor proporción de macroagregados ($>250 \mu\text{m}$), con un contenido superior de carbono en éstos, que de microagregados ($<250 \mu\text{m}$). El retorno de residuos al suelo mejora su estructura (Martens, 2000). La rotación de cultivos y el uso de cultivos de cobertera, muestra cambios en la estructura del suelo y distribución del carbono (Blanco-Canqui y Lal, 2004; Bronick y Lal, 2005), que dependen del cultivo que se establezca.

Diversos autores han conceptualizado la formación y distribución de agregados en los suelos (Tisdall y Oades, 1982; Oades, 1984; Gale, Cambardella y Bailey, 2000; Six, Conant, Paul y Paustian, 2002; entre otros) y plasmado sus resultados en diferentes revisiones (Blanco-Canqui y Lal, 2004; Kumar, Rawat, Singh, Singh y Rai, 2013; Totsche *et al.*, 2018), incluyendo el análisis de los factores y mecanismos de estabilización/desestabilización (Lynch y Bragg, 1985; Sollins, Homman y Caldwell, 1996; Amézketa, 1999; Six, Bossuyt, Degryze y Denef, 2004; Kumar *et al.*, 2013). También se han presentado aportes importantes al conocimiento cuantitativo de los factores o agentes particulares que inciden en la formación de agregados y su estabilidad (Skidmore y Layton, 1992; Schulten, Leinweber y Reuter, 1992; Martens, 2000; Abiven, Menasseri, Angers y Leterme, 2007; Abiven, Menasseri y Chenu, 2009), información que ha servido como base para modelar la dinámica de los agregados y su estabilidad estructural (De Gryze, Six, Brits y Merckx, 2005; De Gryze, Six y Merckx, 2006; Plante, Feng y McGill, 2002; Abiven, Menasseri, Angers y Leterme, 2008; Segoli *et al.*, 2013) en sustratos constituidos solo, o mayormente, por agregados.

La estabilidad de los agregados se ha caracterizado con diferentes índices estructurales, en función de la distribución de las masas de los diferentes tamaños obtenidos del tamizado en seco o en húmedo (Kemper y Rosenau, 1986; Six, Elliot y Paustian, 2000; Niewczas y Witkowska, 2005; Ciric, Manojlovic, Nestic y Belic, 2012; entre otros). Una forma integral de caracterizar la estabilidad de las unidades estructurales es analizando la distribución de probabilidad acumulada de las masas o carbono (Tirgarsoltani, Gorji, Mohammadi y Millan, 2014), a partir de lo cual se pueden generar índices estructurales.

Pese a que los tepetates constituyen un modelo ideal para el estudio de la formación de suelo, ya que su casi total ausencia de agregados representa el estado inicial en la evolución del material parental a suelo —permiten el análisis de la transformación de fragmentos en agregados— la información existente, específicamente bases de datos, alrededor de la estructuración de estos materiales es sumamente limitada. Con base en lo anterior, en el presente trabajo se expone y valida un modelo teórico de la distribución de masa y carbono en unidades estructurales, con la finalidad de caracterizar su estabilidad y la dinámica en la formación de agregados a partir de fragmentos de tepetate, tomando como punto de comparación, la tendencia de agregación y acumulación de C que se presenta en suelo y otros sustratos con características estructurales diferentes, susceptibles de representar estadios intermedios de estructuración.

MATERIALES Y MÉTODOS

Dada la insuficiente cantidad de datos sobre estructuración en tepetates, necesaria para validar el modelo, se utilizaron las bases de datos provenientes de estudios de caso en los que se trabajó con sustratos con características estructurales variables, que pudieran representar condiciones intermedias en la evolución de fragmentos a agregados, es decir, formación del suelo. Para cada caso de estudio, se describen algunas características esenciales en la formación de suelo, como clima, topografía, vegetación, tipo de suelo, uso de suelo y tiempo, para una mayor comprensión de los resultados. Por otra parte, también se describe la base teórica del modelo propuesto.

Casos de Estudio Utilizados para Validar el Modelo

Infestación de muérdago en bosque de pino en el Nevado de Toluca. El estudio, realizado por Parsa-Retana, Velázquez, Endara y Paz (2019), se llevó a cabo en un área de 108 hectáreas, sobre la ladera occidente del volcán del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, en una cota altitudinal de 3500 a 3800 m, caracterizada por bosque de pino-encino sano y con tres diferentes grados de infestación por muérdago (*Arceuthobium vaginatum* y *A. globosum*) y suelos de tipo Andosol. Para la toma de muestras se eligieron cinco parcelas por tipo de muérdago, con nivel alto de infestación y cinco para bosque sano (sin infestación),

en donde se colectaron cinco muestras de suelo por parcela, bajo árboles con cobertura y altura similar. Se colectaron núcleos de suelo hasta una profundidad de 30 cm con ayuda de un barreno de 8.0 cm de diámetro, separando la muestra cada 10 cm (0-10, 10-20 y 20-30). La estabilidad en seco de los agregados se determinó de acuerdo con la metodología de Kemper y Rosenau (1986); la muestra se agitó durante 5 minutos con un tamizador vibratorio, posteriormente se registró el peso retenido en cada tamiz y se calculó el porcentaje de las siguientes fracciones: >6.36, 4.76-2.0, 2.0-1.19, 1.19-0.25 y <0.25 mm. El contenido de C en los agregados se midió con un autoanalizador de C (TOC-5050A, Shimadzu).

Experimento de largo plazo de marga en macetas.

Leinweber y Reuter (1992) presentan los resultados de un experimento a 34 años, con datos de la distribución de masas y carbono por tamaño de partículas (<2 mm) usando técnicas de ultrasonido. El experimento se realizó en Rostock, Alemania, en donde se utilizaron macetas con marga (material endurecido) como sustrato, en las que se sembró pasto *Phleum pratense* L. durante los años 1 a 11 y, *Lolium multiflorum* L., para los años 12 a 35. Los tratamientos que utilizaron fueron: fertilización mineral, paja + fertilización mineral, estiércol de granja y composta. El muestreo de la marga se realizó en los años 2, 7, 13, 19 y 34, para realizar análisis de estructura y contenido de carbono. El contenido inicial de materia orgánica fue de 0.22%.

Experimento en suelos volcánicos degradados.

Báez-Pérez, Hidalgo, Matus, Prat y Etchevers (2011) e Hidalgo *et al.* (2010) establecieron experimentos en suelos volcánicos degradados. El primero, en Tlalpan, Tlaxcala, a una altitud de 2600 m y, el segundo, en la cuenca de Coinzio. Se estudiaron tres suelos de origen volcánico: (a) un tepetate de Tlalpan, Tlaxcala, en una parcela con 15 años de cultivo, textura franca y pH neutro, constituido principalmente por vidrio volcánico y arcillas del tipo de la haloisita, así como abundancia de materiales amorfos con bajo grado de cristalización (Hidalgo *et al.*, 2010); (b) un Acrisol, recolectado en Atécuaro, Michoacán, de textura arcillosa, pH ácido, con arcillas del tipo caolinita y clorita rica en Fe, así como abundante presencia de óxidos de hierro en forma de akaganeita, goethita y hematita y, (c) un Andosol cultivado, también de Atécuaro, con alto grado de perturbación, pH ácido, textura franco limosa, presencia de alófano y características semejantes a las de un Cambisol.

En cada suelo se examinaron dos tipos de manejo agronómico bajo condiciones de temporal: (1) tradicional con monocultivo de maíz (*Zea mays* L.) o trigo (*Triticum aestivum* L.) y bajo aporte de insumos químicos y orgánicos y, (2) con cultivo de leguminosas como frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y haba (*Vicia faba* L), con adición regular de fertilización química y orgánica (compostas). En la cuenca de Coituzio (donde se sitúan los Andosoles y Acrisoles) el manejo se caracterizaba por un sistema de cultivo denominado *año y vez*, que consiste en cultivar la tierra durante un año y dejarla en descanso otro. Los suelos se cultivaron de manera continua durante cuatro años.

Se recolectaron muestras de suelo de 0-20 cm de profundidad, con una barrena de acero inoxidable. Se consideraron dos modalidades de manejo agronómico: labranza tradicional con monocultivos de gramíneas, retirada de rastrojos y una dosis complementaria de fertilizantes químicos nitrogenados y, orgánico, que se realizó en parcelas experimentales en donde durante dos años hubo asociaciones gramínea-leguminosa, con adición anual de 3 Mg ha⁻¹ de composta, con la aplicación de una dosis complementaria de fertilizantes químicos nitrogenados y fosfatados. La estabilidad de agregados en seco se evaluó por el método propuesto por Kemper y Rosenau (1986), con tamices de 0.053, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.75 y 8.0 mm, por duplicado. Cabe destacar que, para la validación del modelo del presente trabajo, cada réplica se consideró como una medición independiente, sin utilizar promedios.

Ferrasoles en microcuencas de Oaxaca. Matus *et al.* (2011) realizaron un estudio en tres microcuencas del estado de Oaxaca: Región Mazateca, Cuicateca y Mixe. Los suelos fueron descritos como Ferrasoles, ubicados en pendientes superiores al 30%, con agricultura de pequeña escala. En cada sitio se muestrearon bosques en regeneración y bosques sujetos a roza-quema, seguido por cultivo de maíz y frijol, con bajo aporte de nutrimentos y labranza tradicional, los cuales típicamente después de nueve años (ocasionalmente 60 años) de cultivo se mueven a nuevas áreas. Como referencia para los sitios cultivados, se incluyeron sitios de bosques de pino, encino y liquidámbar, con 40 años en regeneración. La estabilidad de agregados en seco se evaluó por el método propuesto por Kemper y Rosenau (1986), con el uso de tamices de 0.053, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.75 y 8.0 mm, por duplicado. En los diferentes sitios se realizaron muestreos a la profundidad de 0 a 20 cm y se utilizó un

protocolo de laboratorio similar al caso de los suelos volcánicos degradados de la subsección anterior, con fraccionamiento por sonicación. Cada repetición se consideró como una medición independiente, para los análisis realizados en el presente trabajo.

Cronosecuencias de tepetates del Valle de México. Báez-Pérez *et al.* (2002) y Báez-Pérez, Etchevers, Prat y Hidalgo (2007) realizaron un experimento en la Cuenca de México, en la parte media de la ladera nor-occidental de la Sierra Nevada en el Estado de México, a una altitud variable de 2300 a 2900 m, con una transición progresiva del régimen de humedad de ústico a údico y precipitación de 600 a 900 mm por año. El estudio incluyó 100 parcelas a lo largo de la cronosecuencia, en las cuales se tomaron 22 sub-muestras de suelo por parcela, con una barrena de acero inoxidable, para integrar una muestra compuesta. El muestreo se hizo en forma de zigzag, de 0 a 20 cm de profundidad. Para las mediciones de C por tamaño de partícula, en agregados y fragmentos, se utilizaron 10 casos particulares, más el de un suelo arcilloso de referencia. Los autores destacan que, al roturar los tepetates, se generó una gran cantidad de fragmentos de consistencia friable y de gran diversidad de tamaños, desde polvo hasta bloques de gran diámetro, sin que existieran agregados, por lo que, al emplear los métodos de estabilidad de agregados en estos tepetates, lo que realmente se midió fue la estabilidad de los fragmentos. La estabilidad en seco se evaluó por el método propuesto por Kemper y Rosenau (1986), pero haciendo pasar una muestra de 5 a 6 kg de suelo, a través de una serie de tamices de malla 50.80, 31.70, 22.20, 11.50, 6.35, 4.76, 3.36, 2.00, 1.00, 0.46, 0.25, 0.10 y 0.05 mm y menores de 0.05 mm. La agitación de los tamices se hizo en forma manual, para evitar la desintegración del tepetate.

Las partículas con diámetro >50.3, 50.3-22.2, 22.2-11.3, 11.3-6.30, 6.30-4.25 y 4.25-3.36 mm, que se obtuvieron en la prueba de estabilidad en seco, se separaron en fragmentos y agregados. La separación se hizo de manera visual, con una lupa y un microscopio estereoscópico, así como con una espátula y una aguja de disección, para corroborar la compactación del material. Los criterios utilizados para diferenciar los agregados de los fragmentos fueron consistencia, dureza, color y forma. Sin embargo, de acuerdo con los autores, el mejor indicador para diferenciarlos fue la dureza, misma que se midió con un penetrometro manual, en los casos que fue posible su uso.

En el caso de las unidades de 50.3-22.2, 22.2-11.3 y 11.3-6.30 mm, la separación se hizo en toda la muestra, pero para los de 6.30-4.25 y 4.25-3.36 mm se tomaron cinco sub-muestras de 5-10g, por muestra. Para el diámetro de partículas entre 4.25 y 3.36 mm se utilizó el microscopio estereoscópico. Para complementar el análisis visual se rompieron las unidades estructurales con la aguja de disección, para evaluar, cualitativamente la dureza. No se presentan datos de separación de agregados y fragmentos de 3.36 a 2.00 ni <2.0 mm, debido a su fragilidad. Las unidades obtenidas de cada fracción se pesaron y se calculó el porcentaje relativo para cada una. El C de cada fracción se midió con un autoanalizador (TOC-5050A, Shimadzu). Un problema que destacan los autores es que por debajo de la malla de 2.0 mm, particularmente en la malla de 0.25 mm, se presentaron algunos “taponamientos”, hecho que debe considerarse en cualquier análisis.

Experimentos de corto plazo en macetas con tepetates. Velázquez-Rodríguez *et al.* (2008) presentan los detalles de un experimento a corto plazo, realizado con tepetate en macetas y bajo condiciones controladas. El experimento se realizó con tepetate del municipio de Tetela del Volcán, estado de Morelos, México a una altitud de 2127 m. Las especies utilizadas fueron higuera, *Ficus carica* L. y pasto Rhodes, *Chloris gayana* Kunt. Como enmienda orgánica se usó estiércol de bovino y, como enmienda inorgánica, se utilizaron sulfato de amonio, superfosfato de calcio simple y cloruro de potasio. Las características físicas del tepetate en estado inicial fueron: color pardo amarillento en seco (10YR6/4) y pardo amarillento oscuro en húmedo (10YR4/4), densidad real de 2.3 Mg m⁻³, densidad aparente de 1.7 Mg m⁻³, dureza de 24 kg cm⁻² y textura franca (50, 27 y 23% de arena, limo y arcilla, respectivamente).

Para la evaluación de la formación de agregados estables, el tepetate se rompió con martillo y se seleccionaron los fragmentos menores de 20 mm de diámetro, mismos que se colocaron en macetas, sin perforaciones, en cantidades de 5 kg por maceta. El estiércol se aplicó en una dosis única de 72 Mg ha⁻¹. La fertilización inorgánica fue anual; en los tratamientos sin planta y con higuera se aplicó la fórmula 80-80-20 y, en el pasto, 250-200-00. La agregación en seco se evaluó por la técnica de Yoder (Kemper y Rosenau, 1986) y la estabilidad en húmedo por la técnica de Klute (Kemper y Rosenau, 1986). El análisis de las variables de respuesta se realizó a partir del total

del sustrato de cada maceta. El período de observación fue de dos años, dividido en etapas de 12 meses y una etapa inicial. Se realizaron cuatro réplicas de cada medición. Los datos que se discuten en el presente trabajo consideran solo el promedio de la distribución de masas de las unidades estructurales del tepetate.

Modelo de la Distribución de la Masa y Carbono en Unidades Estructurales

Se han propuesto modelos potenciales para describir la distribución de la masa (M) y el carbono (C) en agregados, tanto para suelo (Paz *et al.*, 2012; Fuentes *et al.*, 2012), como para tepetate (Báez-Pérez *et al.*, 2012; Velázquez-Rodríguez *et al.*, 2012b). Estos modelos se proponen en un formato de acumulados, que asemeja una distribución de probabilidad acumulada, después de normalizarse (0-1) y pueden definirse como:

$$M_f = A_m \left(\frac{1}{T_f} \right)^{-B_m} \quad (1)$$

$$C_f = A_c \left(\frac{1}{T_f} \right)^{-B_c} \quad (2)$$

donde: A_m , B_m , A_c y B_c son constantes del ajuste estadístico, M_f (%) y C_f (g C/kg suelo) es la masa y carbono, respectivamente, en la fracción f de los agregados de tamaño T_f . Para el caso de la masa de los agregados, Baldock y Kay (1987) plantearon una relación potencial similar a la ecuación (1), pero en función de T_f .

Los modelos empíricos de las ecuaciones (1) y (2) pueden replantearse como la solución a una cinética de orden n :

$$\frac{dT}{dC} = -k_n T^n \quad (3)$$

que establece que la formación de los tamaños de los agregados es función del agente cementante carbono (C). Algo similar puede establecerse para la masa M. La solución general ($n \neq 1$) de la relación (3), caso de C, está dada por:

$$\frac{1}{T^{n-1}} = \frac{1}{T_0^{n-1}} - k_n(n-1)C \quad (4)$$

donde: T_0 es el tamaño de partícula asociada al carbono inicial (C_0).

Para analizar patrones en el formato de la relación (1), la relación (4) puede ponerse como:

$$c = \left[\frac{1}{k_n(n-1)} \right] \left(\frac{1}{T_0} \right)^{n-1} - \left[\frac{1}{k_n(n-1)} \right] \left(\frac{1}{T} \right)^{n-1} \quad (5)$$

Para visualizar los patrones asociados a la cinética de orden n de la relación (3) se pueden analizar algunos casos particulares:

Caso $n = 0$, $dT/dC = -k_0$:

$$c = \left(\frac{1}{k_0} \right) \left(\frac{1}{T_0} \right)^{-1} - \left(\frac{1}{k_0} \right) \left(\frac{1}{T} \right)^{-1} \quad (6)$$

Caso $n = 1$, $dT/dC = -k_1 T$:

$$c = \left(\frac{1}{k_1} \right) \ln \left(\frac{1}{T_0} \right) - \left(\frac{1}{k_1} \right) \ln \left(\frac{1}{T} \right) \quad (7)$$

Caso $n = 2$, $dT/dC = -k_2 T^2$:

$$c = \left(\frac{1}{k_2} \right) \left(\frac{1}{T_0} \right) - \left(\frac{1}{k_2} \right) \left(\frac{1}{T} \right) \quad (8)$$

Paz *et al.* (2012), Fuentes *et al.* (2012), Báez-Pérez *et al.* (2012) y Velázquez-Rodríguez *et al.* (2012b) plantearon la relación:

$$C_f = a_0 + b_0 M_f \quad (9)$$

donde: a_0 y b_0 son constantes del ajuste estadístico y C_f está en g C/kg suelo y M_f en porcentaje. De la Ecuación (9), el C total se relaciona con b_0 como:

$$b_0 = c + d C_t \quad (10)$$

donde: c y d son constantes del ajuste estadístico.

Si se normaliza el valor de C_f ($100 \times C_f / C_p$, en %) para que tenga el mismo patrón de distribución con relación a $(1/T)$, pero ahora con un valor máximo del 100%, la relación (9) puede ponerse como:

$$C_f = a + b M_f \quad (11)$$

donde: C_f y M_f están en porcentaje. Esta formulación permite que la distribución del C_f en todos los suelos analizados tenga un origen común (100%, 100%) de acuerdo con el concepto de equivalencia ambiental

(Paz *et al.*, 2012), por lo que las constantes están relacionadas como:

$$b = 1.0 - \left(\frac{1}{100} \right) a \quad (12)$$

producto de usar el C_f y M_f en porcentaje.

A partir de los desarrollos previos y de la hipótesis de que la distribución de masa y C de los agregados es igual, es posible desprestigiar las constantes de las ecuaciones (9) y (10) para obtener:

$$\frac{C_f}{C_t} = \frac{M_f}{100} \quad (13)$$

con C_f en g C / kg suelo y M_f en %.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para los resultados que se presentan en lo siguiente, en los ajustes de la relación (5) y demás, se consideró el inicio (masa y carbono inicial del tamaño mínimo de las unidades estructurales) como cero, de tal manera que, tanto a la masa como al carbono máximo, se les restó el valor inicial original del tamaño mínimo. Este procedimiento se realizó considerando que la masa y el carbono de la clase mínima de las unidades estructurales no se mide y sólo se estima del valor total, descontando los valores de las clases superiores. Así mismo, el caso del valor superior al T mayor (sin definición del tamaño siguiente) se desprestigió y, el valor total de la masa (100%) y del carbono total (C_t), se recalculó de los valores de las clases de unidades estructurales restantes. Este proceso introduce sesgos en los ajustes de los modelos, sin alterar sus patrones, pero es congruente con la decisión de usar sólo datos medidos y no estimados por diferencias y uso de recuperaciones del 100% de la masa y carbono en todas las clases de tamaños.

Análisis de las Bases de Datos de Suelos

Caso de andosoles en bosque infestado por muérdago. Para los andosoles de un bosque infestado por muérdago, tres profundidades, la Figura 1 muestra los resultados del ajuste del modelo de la relación (5) para las masas y carbono de los agregados para diferentes tamaños T. Los resultados del ajuste estadístico por regresión no lineal son adecuados ($R^2 > 0.99$).

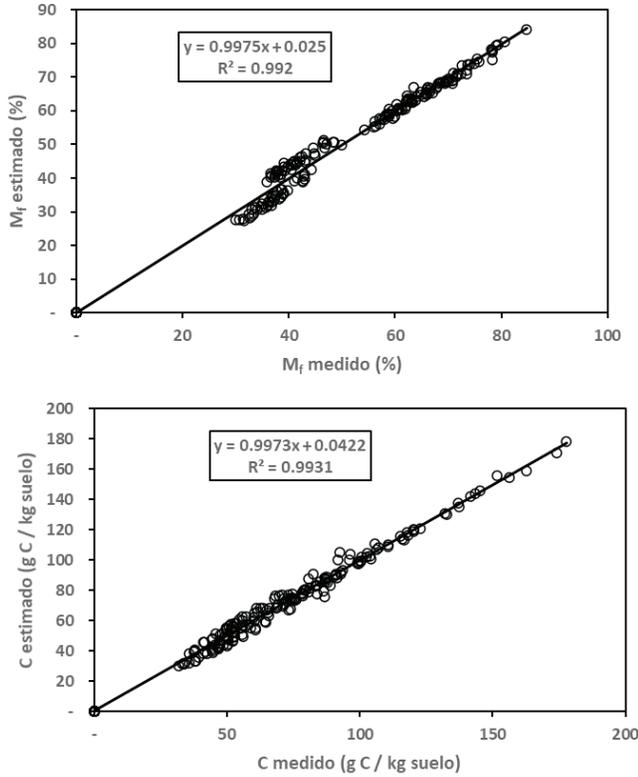


Figura 1. Ajuste del modelo de la relación (5), para la masa y carbono en las fracciones de los agregados de los andosoles de bosque de pino con infestación por muérdago.
Figure 1. Adjustment of the model of the relationship (5), for the mass and carbon in the fractions of the aggregates of the pine forest andosols with mistletoe infestation.

La relación entre el exponente n , relación (5) y el diámetro medio ponderado (DMP), es de tipo no lineal, tal como se muestra en la Figura 2. Los exponentes n del modelo de cinética de orden n para la masa y el carbono de los tamaños de los agregados, se muestra en la Figura 3, en la que se observa una relación lineal que implica que la distribución de la masa y el carbono están relacionados linealmente entre sí.

La Figura 4 muestra los resultados del ajuste de las relaciones (9) y (10) para los andosoles analizados, en donde se obtiene un buen ajuste ($R^2 > 0.989$), por lo que las relaciones definidas pueden usarse en forma confiable.

Para el caso de las relaciones (11) y (12) para C en porcentaje, la Figura 5 muestra los resultados de los ajustes, los cuales son buenos ($R^2 > 0.99$).

Finalmente, el ajuste de la relación (13) a la distribución de agregados de los andosoles, se muestra en la Figura 6, con buenos ajustes ($R^2 > 0.99$).

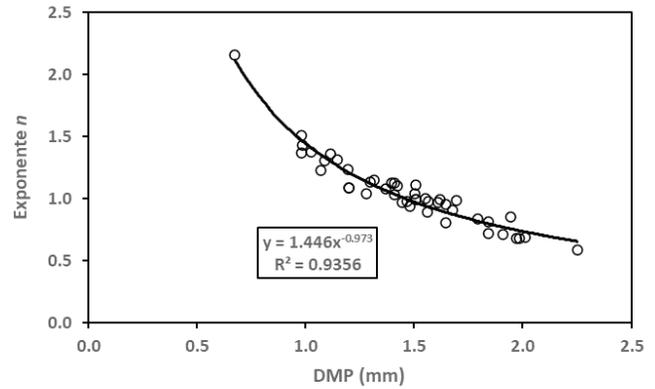


Figura 2. Relación entre el DMP y el exponente n (masa) para la distribución de los agregados de los andosoles de bosque de pino con infestación por muérdago.
Figure 2. Relationship between the DMP and the exponent n (mass) for the distribution of the aggregates of the pine forest andosols with mistletoe infestation.

Caso de ferrasoles en microcuencas de Oaxaca y suelos volcánicos degradados (tepetates). Para analizar la viabilidad del uso del modelo de cinética de orden n en tepetates cultivados, la Figura 7 muestra los resultados que se obtuvieron para la masa y el carbono de la distribución de agregados para los datos del tepetate de Tlalpan, Zacatecas. Los ajustes son adecuados ($R^2 > 0.99$). Cabe señalar que en el caso de los suelos —resultados no mostrados por cuestiones de espacio— los ajustes también tuvieron una $R^2 > 0.99$.

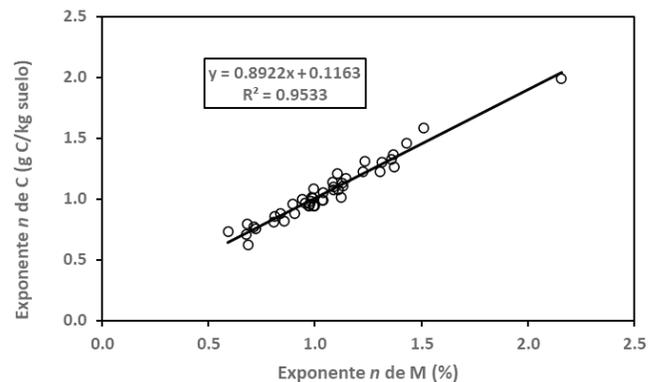


Figura 3. Relación entre el exponente n de la masa (M) y el carbono (C) para la distribución de los agregados de los andosoles de bosque de pino con infestación por muérdago.
Figure 3. Relationship between the exponent n of mass (M) and carbon (C) for the distribution of aggregates of pine forest andosols with mistletoe infestation.

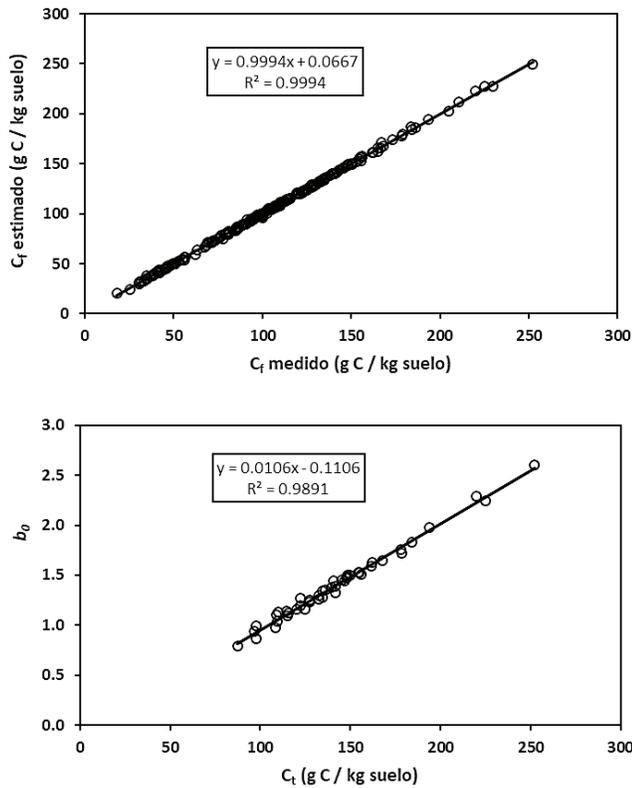


Figura 4. Resultados del ajuste de las relaciones (9) y (10) para la distribución de los agregados de los andosoles de bosque de pino con infestación por muérdago.
 Figure 4. Results of the adjustment of the relationships (9) and (10) for the distribution of the aggregates of the pine forest andosols with mistletoe infestation.

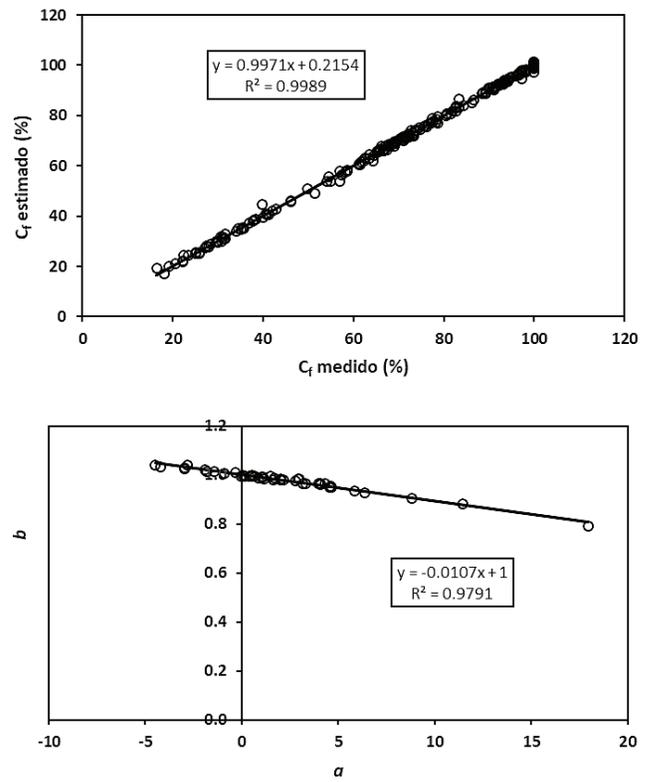


Figura 5. Resultados del ajuste de las relaciones (11) y (12) para la distribución de los agregados de los andosoles de bosque de pino con infestación por muérdago.
 Figure 5. Results of the adjustment of the relationships (11) and (12) for the distribution of the aggregates of the pine forest andosols with mistletoe infestation.

Para el caso de los tepetates de Tlalpan, la Figura 8 muestra el efecto del manejo agrícola (labranza tradicional contra orgánica), en donde se observa que, al mejorar los ingresos de materia orgánica al sistema agrícola, el exponente del modelo de cinética de orden n disminuye. El patrón de la distribución de las masas de las unidades estructurales de los tepetates es de tipo lineal ($n = 2$), aunque por efecto del ajuste por regresión del modelo se obtengan valores de $n > 2$ (Figura 8).

El efecto del aporte de materia orgánica a los ferrasoles de las regiones de Oaxaca se muestra en la Figura 9, para el caso de la masa. La reducción de la pendiente del modelo de cinética lineal (hacerse más negativa para el uso de un modelo potencial) implica mejores condiciones de estabilidad estructural de los suelos.

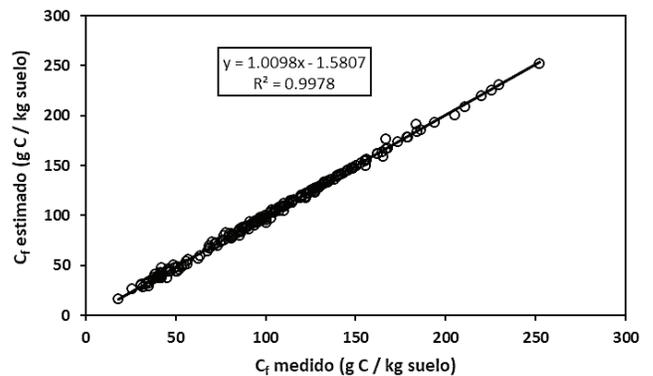


Figura 6. Resultados del ajuste de la relación (13) para la distribución de los agregados de los andosoles de bosque de pino con infestación por muérdago.
 Figure 6. Results of the adjustment of the relationship (13) for the distribution of the aggregates of the pine forest andosols with mistletoe infestation.

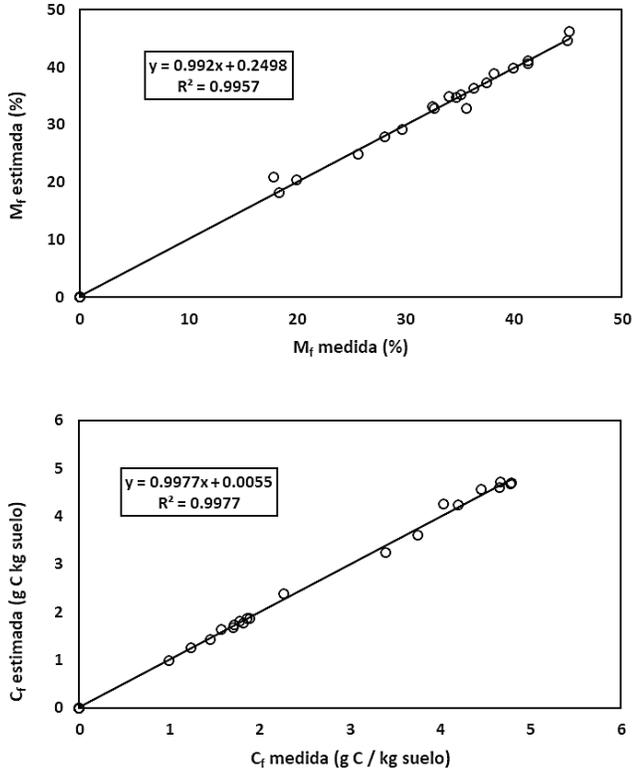


Figura 7. Resultados del ajuste de la relación (5) para la distribución de las unidades estructurales de los tepetates de Tlalpan.

Figure 7. Results of the adjustment of the relationship (5) for the distribution of the structural units of the tepetates of Tlalpan.

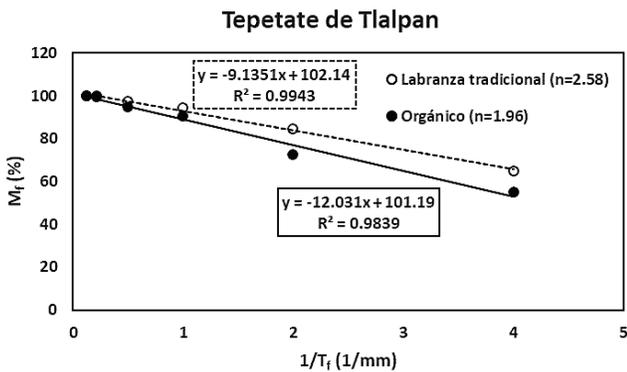


Figura 8. Efecto del ingreso de materia orgánica en los exponentes del modelo de cinética de orden n en los tepetates de Tlalpan.

Figure 8. Effect of the input of organic matter in the exponents of the model of kinetics of order n in the tepetates of Tlalpan.

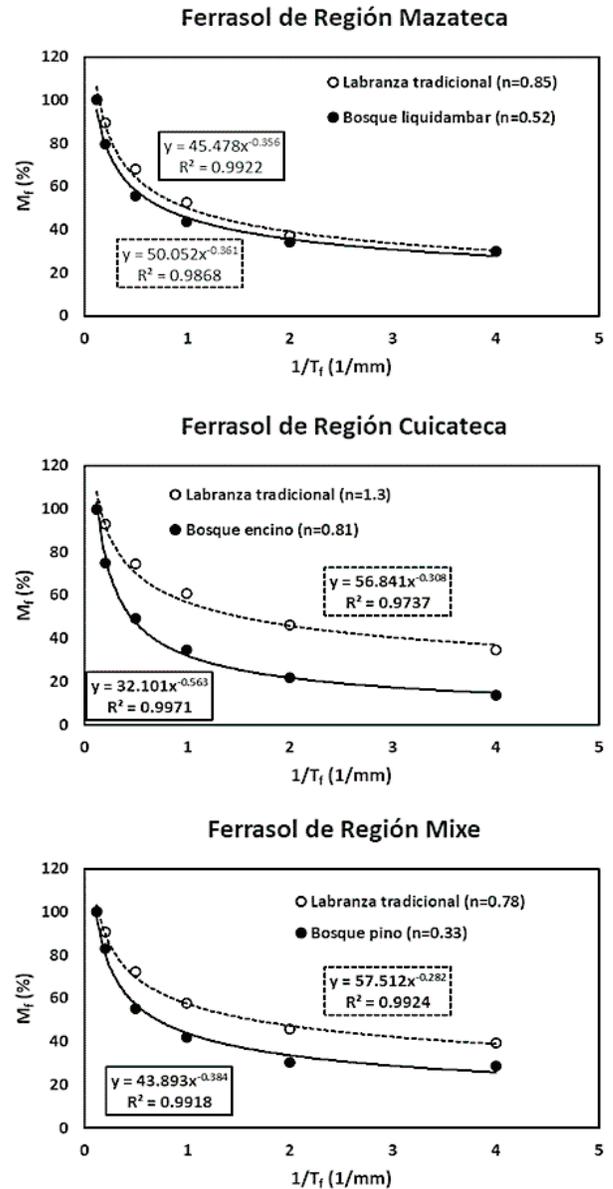


Figura 9. Efecto del ingreso de materia orgánica en los tepetates cultivados en Tlalpan y ferrasoles en la región Cuicateca.

Figure 9. Effect of the input of organic matter in the tepetates cultivated in Tlalpan and ferrasols in the Cuicateca region.

Desde esta perspectiva, para la masa, el proceso de mejorar la condición del sustrato, en relación a la estabilidad estructural de los suelos y tepetates, implica un decremento en el exponente n , de acuerdo con la evidencia discutida.

Los diferentes patrones que se observan (exponentes n), se presentan en la Figura 10 y van de potenciales ($n < 1$) a logarítmicos ($n \approx 1$) y lineales ($n \rightarrow 2$). En el caso

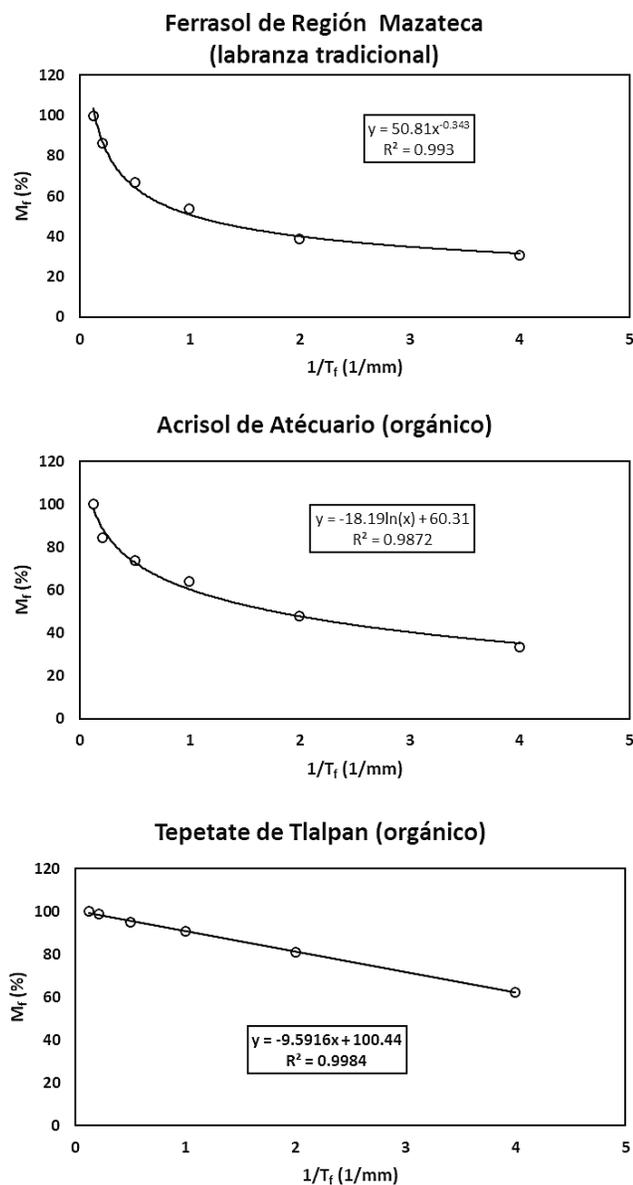


Figura 10. Diferentes patrones asociados a los tepetates y suelo analizados.

Figure 10. Different patterns associated with the tepetates and soil analyzed.

de la aplicación de energía al sistema suelo o tepetate, $0 < n \leq 2$, el valor del exponente n se incrementa hasta un máximo de $n = 2$ (patrón lineal) asociado al fraccionamiento de partículas elementales (Paz, Covalada y Etchevers, 2014; Paz, Covalada, Hidalgo, Etchevers y Matus, 2016). En el caso de un proceso de agregación, el patrón es inverso, va desde $n = 2$ a valores cercanos a cero. El tepetate de la Figura 10 presenta un patrón cercano al lineal, lo cual representa

un estado inicial de formación de agregados del suelo.

Caso de macetas con margas. Los datos de este caso estudio corresponden, en realidad, a la distribución de partículas primarias; sin embargo, la evolución temporal del contenido de materia orgánica (carbono orgánico) en función de la facilidad de ingreso y asimilación por el sistema margas-pastos, permite entender los patrones. En la Figura 11 se observa que entre más procesada está la enmienda que se aporta al sistema, mayor es el contenido de C. En todos los casos de las enmiendas analizadas, la cantidad de C tiende a estabilizarse o decaer ligeramente con el tiempo, tal como se muestra en la Figura 11. Cabe señalar que en la gráfica se observa una disminución de C en los periodos más largos, debido al uso de polinomios para explicar las tendencias; sin embargo, en lo general, los patrones experimentales muestran que el C se mantiene constante con respecto al tiempo.

Caso de cronosecuencias de tepetates del Valle de México. Báez-Pérez *et al.* (2002) analizaron las cronosecuencias de tepetates en el Valle de México, de acuerdo con clases de sistemas agrícolas y determinaron sus patrones temporales, tal como se muestra en la Figura 12, la cual presenta patrones generales similares al caso analizado de la Figura 11.

Con el uso de una agrupación más amplia de sistema agrícola (monocultivo de gramíneas y rotación de gramíneas y leguminosas/leguminosas con poco estiércol), la Figura 13 muestra los patrones temporales del C orgánico y el exponente n para la masa, el cual tienen un patrón decreciente, acorde con lo esperado.

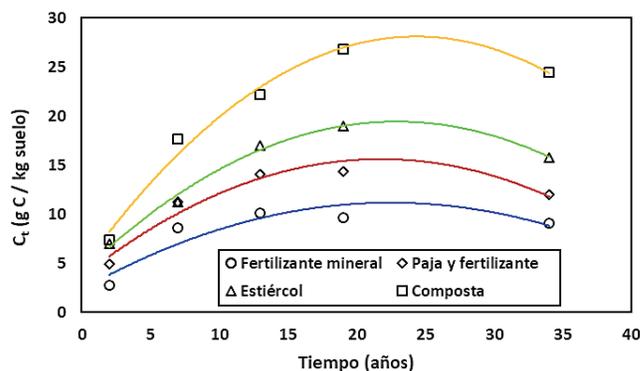


Figura 11. Acumulación de carbono orgánico en el tiempo, para un experimento con macetas con margas y pastos, acondicionados con diferentes enmiendas.

Figure 11. Accumulation of organic carbon over time, for an experiment with pots with loamy marl and grasses, conditioned with different amendments.

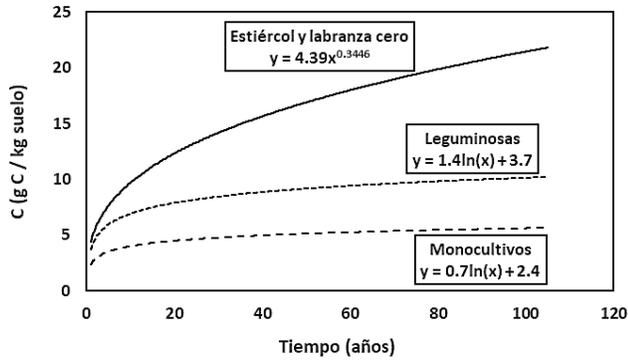


Figura 12. Acumulación temporal de carbono orgánico en cronosecuencias de tepetate del Valle de México para tres diferentes sistemas agrícolas.

Figure 12. Temporary accumulation of organic carbon in chronosequences of tepetate of the Valley of Mexico for three different agricultural systems.

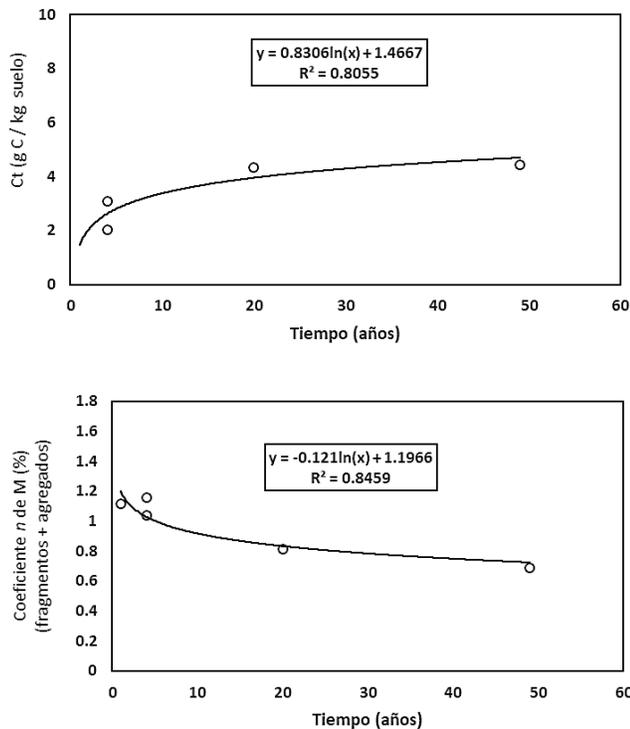


Figura 13. Evolución temporal de carbono orgánico total (C) y el exponente n (masa) para el sistema monocultivos de gramíneas, rotación gramíneas y leguminosas/leguminosas con poco estiércol, de las cronosecuencias de tepetates en el Valle de México.

Figure 13. Temporal evolution of total organic carbon (C_t) and exponent n (mass) for the monoculture system of grasses, rotation of grasses and legumes/legumes with little manure, of the chronosequences of tepetates in the Valley of Mexico.

Con el uso de un tamaño mínimo de las clases de unidades estructurales de 3.36 mm, la Figura 14 muestra el ajuste de la relación (5) para la masa de fragmentos+agregados, agregados y fragmentos, en donde en todos los casos los ajustes tuvieron un $R^2 > 0.98$.

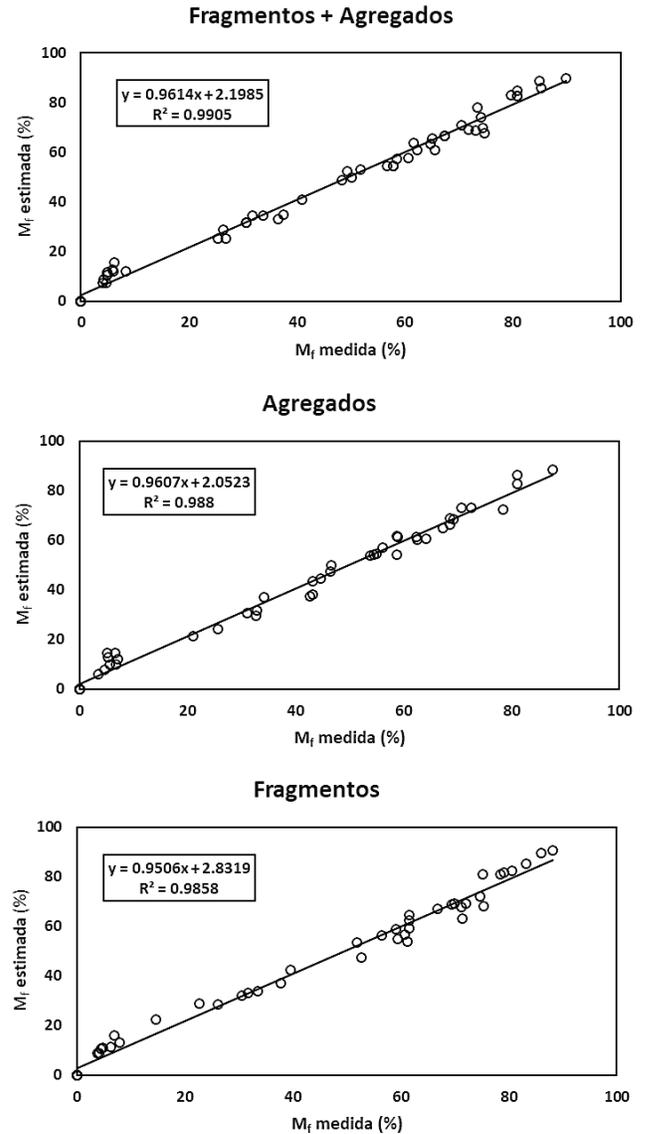


Figura 14. Resultados de los ajustes de la relación (5), masa, para el caso de unidades estructurales (fragmentos+agregados), sólo fragmentos y, sólo agregados, para las cronosecuencias de tepetates en el Valle de México.

Figure 14. Results of the adjustments of the relationship (5), mass, for the case of structural units (fragments + agregados), only fragments and, only aggregates, for the chronosequences of tepetates in the Valley of Mexico.

El caso de los ajustes de la relación (5), para carbono de las unidades estructurales (fragmentos+ agregados), sólo agregados y sólo fragmentos, se muestra en la Figura 15, con ajustes de $R^2 > 0.99$.

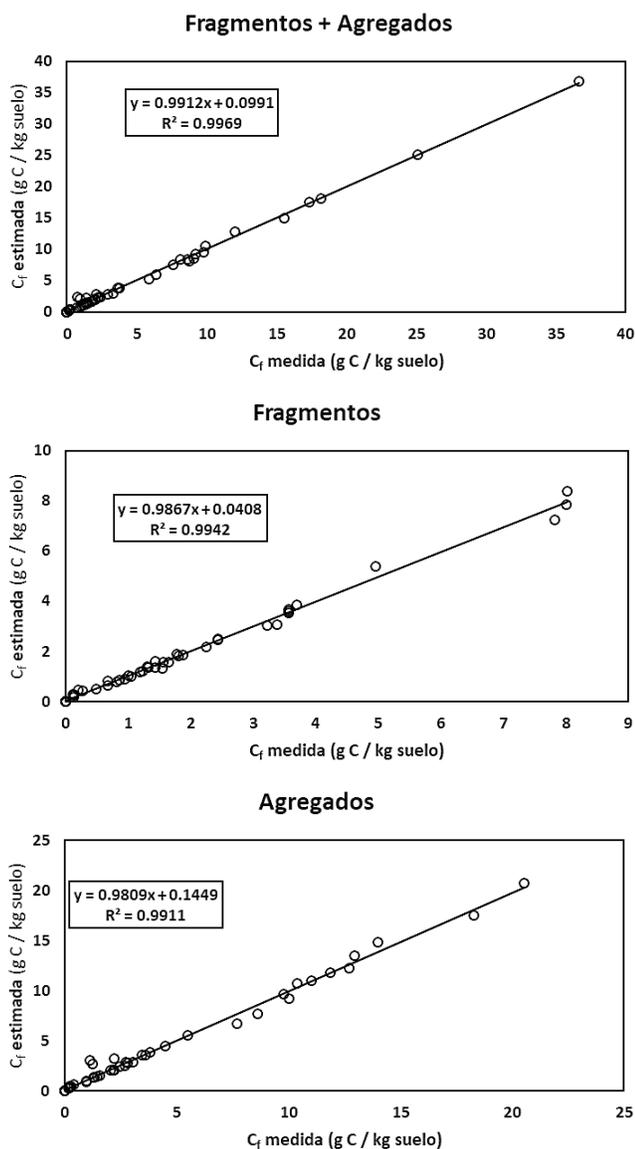


Figura 15. Resultados de los ajustes de la relación (5), carbono, para el caso de unidades estructurales (fragmentos+agregados), sólo fragmentos y, sólo agregados, para las cronosecuencias de tepetates en el Valle de México.

Figure 15. Results of the adjustments of the relationship (5), carbon, for the case of structural units (fragments + aggregates), only fragments and, only aggregates, for the chronosequences of tepetates in the Valley of Mexico.

La Figura 16 muestra los resultados de los ajustes de las relaciones (9) y (10) para los tepetates de las cronosecuencias analizadas, en donde se observa que fueron adecuados ($R^2 > 0.99$).

Finalmente, de las relaciones entre las masas y el carbono de las unidades estructurales, para un sistema agrícola definido (gramíneas y rotación de gramíneas y leguminosas/leguminosas con poco estiércol), se espera que exista una relación entre los exponentes de las unidades estructurales (fragmentos y agregados) y los agregados.

La Figura 17 muestra una relación lineal del sistema gramíneas y rotación de gramíneas y leguminosas/leguminosas con poco estiércol para fragmentos+agregados y sólo fragmentos para el caso de la masa y el carbono orgánico.

El modelo de cinética de orden n de la formación de unidades estructurales requiere del conocimiento de

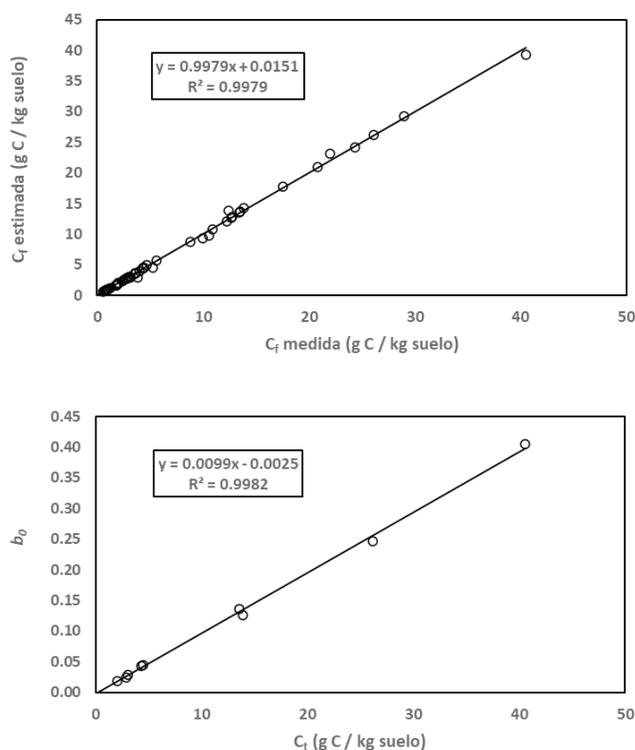


Figura 16. Resultados de los ajustes de las relaciones (9) y (10), para el caso de unidades estructurales para las cronosecuencias de tepetates en el Valle de México.

Figure 16. Results of the adjustments of the relations (9) and (10), for the case of structural units for the chronosequences of tepetates in the Valley of Mexico.

la tasa de reacción k_n y el exponente n , pero dado que ambos parámetros están relacionados entre sí, Figura 18, con el conocimiento de un solo parámetro (un solo dato medido) es posible definir completamente la cinética, simplificando su modelación.

Experimentos en macetas con tepetate. Para el caso de la distribución de las masas de las unidades estructurales de los experimentos de corto plazo (≤ 2 años) en macetas con tepetate, la Figura 19 muestra los resultados de los ajustes experimentales realizados que, como se observa, resultaron adecuados ($R^2 > 0.99$).

La relación entre la tasa de reacción k_n y el exponente n se muestra en la Figura 20, lo que permite definir al modelo de cinética de orden n como de un solo parámetro.

Las Figuras 21 y 22, muestran la evolución temporal del carbono orgánico total y el exponente n para los tiempos 0, 12 y 24 meses. En lo general, se observa

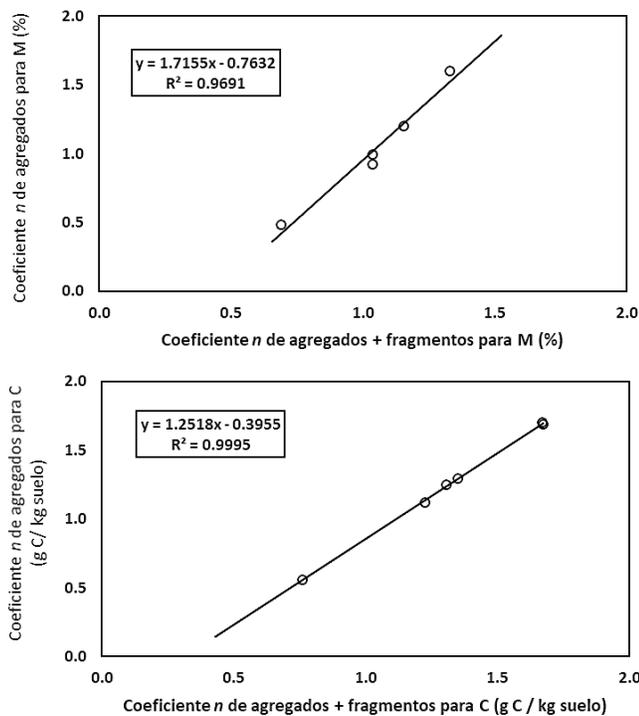


Figura 17. Relación entre los exponentes n , masa y carbono, para el sistema gramíneas, rotación de gramíneas y leguminosas/leguminosas con poco estiércol, para las cronosecuencias de tepetates en el Valle de México para el caso de fragmentos+agregados y sólo agregados.

Figure 17. Relationship between the exponents n , mass and carbon, for the grass system, rotation of grasses and legumes/legumes with little manure, for the chronosequences of tepetates in the Valley of Mexico for the case of fragments + aggregates and only aggregates.

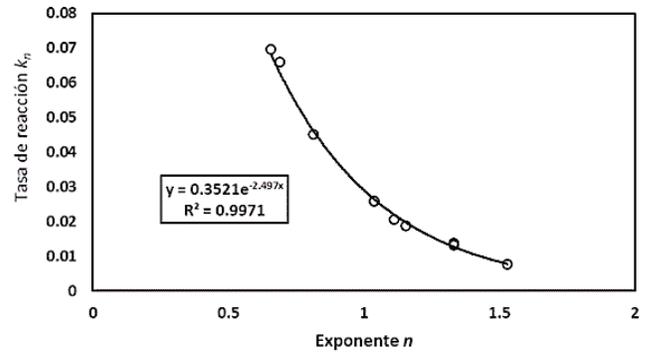


Figura 18. Relación entre la tasa de reacción k_n y el exponente n para las cronosecuencias de tepetates del Valle de México.

Figure 18. Relationship between the reaction rate k_n and the exponent n for the chronosequences of tepetates of the Valley of Mexico.

que no hay una relación definida entre el carbono orgánico total y el exponente n en su evolución temporal; excepto para el caso de la higuera sola, lo que denota la existencia de otros factores de agregación en la escala de tiempo de observación.

Discusión de los Resultados

La formación de suelo a partir de tepetates, después de su roturación y habilitación, plantea la necesidad del desarrollo de un modelo pedogenético o edáfico, asociado al desempeño de los agentes cementantes en el desarrollo de la distribución del tamaño de las unidades estructurales, a través de un modelo de cinética de orden n .

La validación del modelo propuesto de formación de las unidades estructurales de los suelos y tepetates, resultó con ajustes experimentales favorables ($R^2 > 0.98$) para los casos estudio analizados, lo que permite su implementación para definir la estabilidad estructural y conexión con el carbono orgánico total y su distribución en las unidades estructurales. En términos generales, el modelo propuesto plantea una relación lineal entre la distribución de las masas y el carbono orgánico asociado (agente cementante permanente), más allá de modelos conceptuales (Tisdall y Oades, 1982; Oades 1984; Six *et al.*, 2002), que implican procesos iterativos en la dinámica de formación de suelos estables.

La evolución temporal de la estabilidad de las unidades estructurales y su asociación con el carbono orgánico, presenta patrones congruentes con

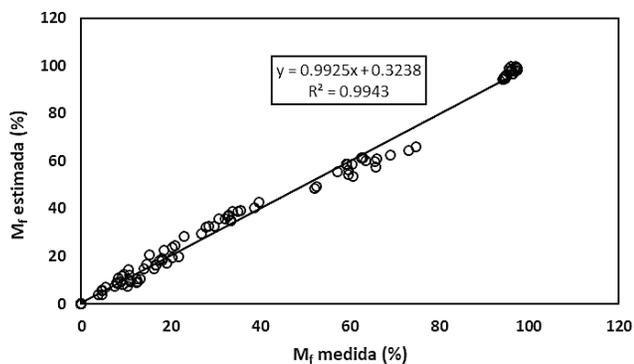


Figura 19. Resultados de los ajustes experimentales del modelo de cinética de orden n para la distribución de la masa de las unidades estructurales del experimento de corto plazo de macetas con tepetate.

Figure 19. Results of the experimental adjustments of the n -order kinetics model for the mass distribution of the structural units of the short-term potting experiment with tepetate.

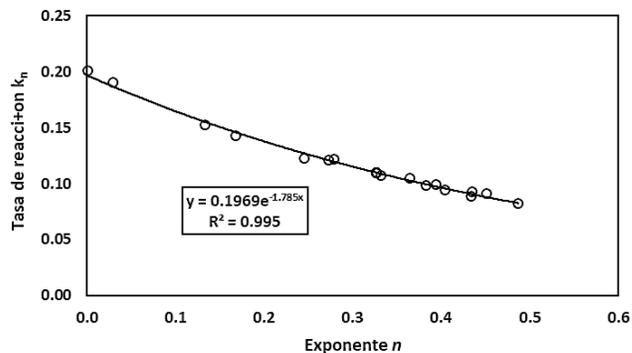


Figura 20. Relación entre la tasa de reacción k_n y el exponente n para los experimentos de corto plazo en macetas con tepetate.

Figure 20. Relationship between the reaction rate k_n and the exponent n for short-term experiments in pots with tepetate.

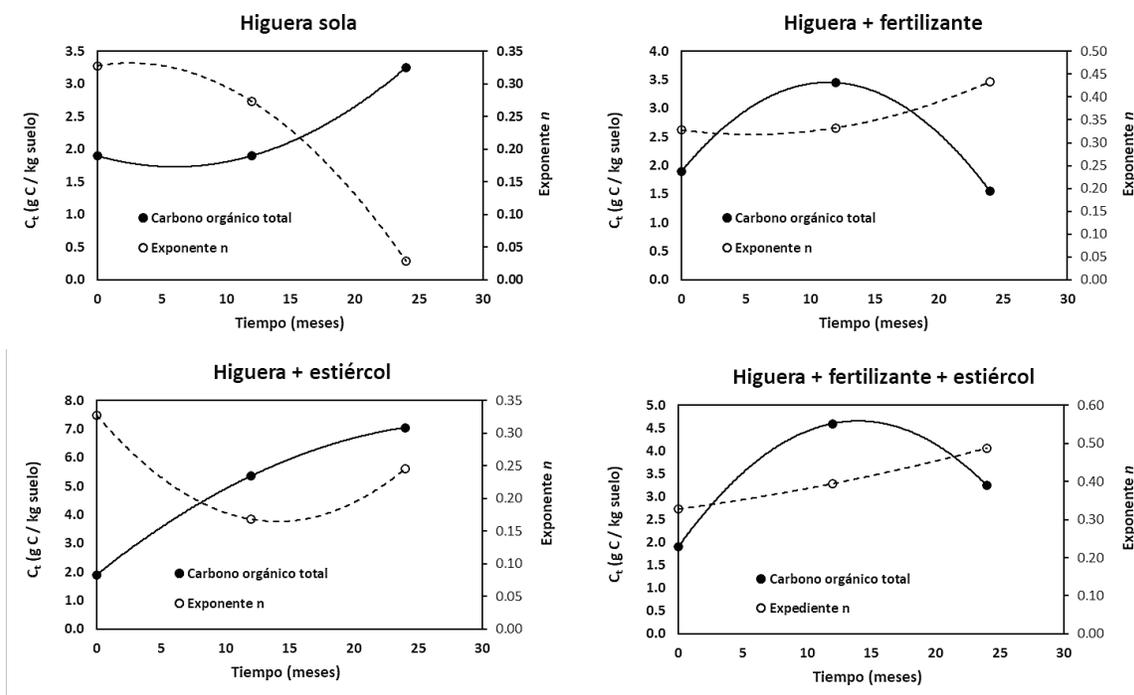


Figura 21. Evolución temporal de C_t y n para los experimentos con higuera en macetas con tepetate.

Figure 21. Time evolution of C_t and n for experiments with fig tree in pots with tepetate.

la evidencia experimental para experimentos a corto plazo (≤ 2 años), aunque en las primeras etapas (≥ 2 años) de la habilitación de tepetates, los patrones de la evolución del carbono orgánico y la estabilidad de las unidades estructurales muestran tendencias

diferentes a lo esperado, lo cual puede atribuirse a la participación de agentes cementantes temporales y transitorios (Velázquez-Rodríguez *et al.*, 2008), de acuerdo con lo planteado por Tisdall y Oades (1982) y Abiven *et al.* (2009).

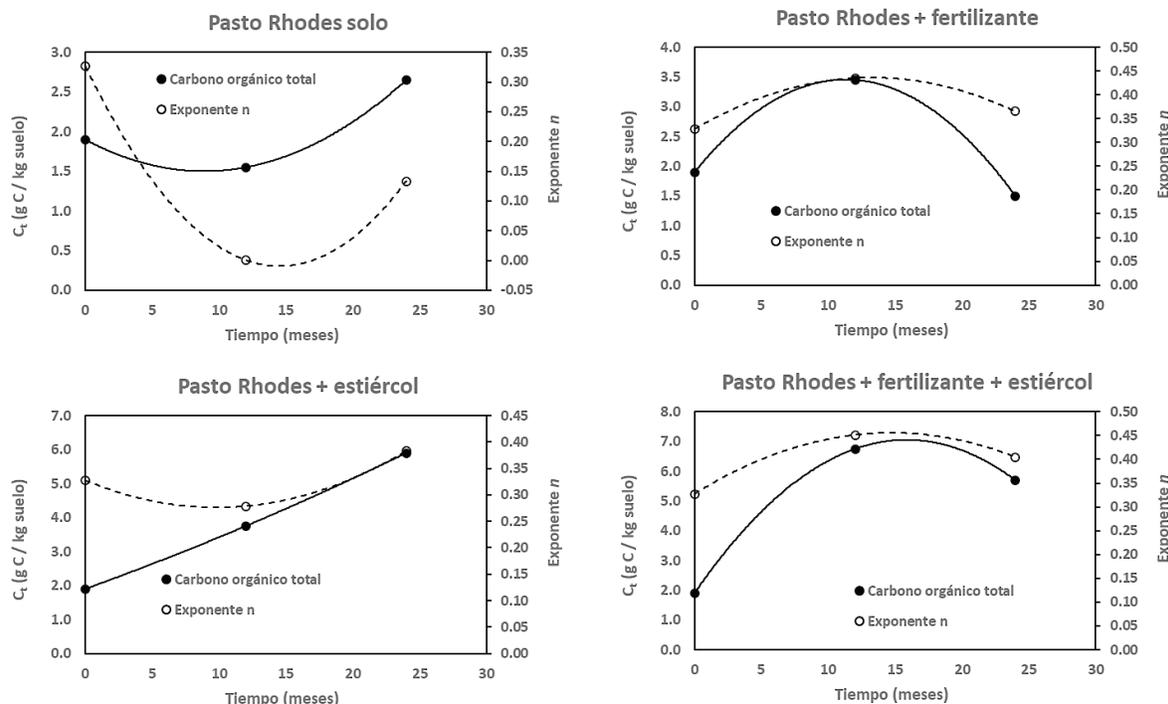


Figura 22. Evolución temporal de C_t y n para los experimentos con pasto Rhodes en macetas con tepetate.
Figure 22. Time evolution of C_t and n for experiments with Rhodes grass in pots with tepetate.

Los patrones observados en la formación de suelo a partir de tepetates, a corto plazo, plantean la necesidad de extender el modelo de cinética propuesto para considerar otros agentes de corto plazo, más allá del carbono orgánico.

En términos de modelos de agregación de suelos (De Gryze *et al.*, 2006; Segoli *et al.*, 2013), el de cinética de orden n es más simple, además de requerir un solo parámetro para definirse, por lo que con un solo dato medido puede estimarse la tasa de reacción k_m y exponente n , lo que facilita su implementación operativa, además de caracterizar la distribución de las masas y carbono orgánico de las unidades estructurales en forma global (distribución de probabilidad acumulada).

CONCLUSIONES

El modelo de cinética de unidades estructurales de suelos y tepetates (materiales endurecidos) propuesto se validó con diferentes bases de datos de casos estudios de suelos, tepetates y marga, mostrando favorables resultados ($R^2 > 0.98$). Además de solo requerir un parámetro para su definición, caracteriza

en forma global las masas y el carbono orgánico de las unidades estructurales, a través de una distribución de probabilidad acumulada.

La estabilidad estructural y el carbono orgánico en experimentos de corto plazo de formación de suelos a partir de tepetates, muestra que existen agentes temporales y transitorios que controlan el proceso, a diferencia del carbono orgánico, como agente permanente, por lo cual es necesario extender el modelo propuesto para que considere esta situación.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos están disponibles de los autores previa solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización y diseño: A.V.R. y F.P.P. Datos de laboratorio: A.B.P., M.P.R., C.H.M., A.V.R. y J.E.B. Revisión resultados: F.P.P. y A.V.R. Escritura: F.P.P. y A.V.R. Revisión manuscrito: J.E.B. y A.V.R.

LITERATURA CITADA

- Abiven, S., Menasseri, S., Angers, D. A., & Leterme, P. (2007). Dynamics of aggregate stability and biological binding agents during decomposition of organic materials. *European Journal of Soil Science*, 58(1), 239-247. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00833.x>
- Abiven, S., Menasseri, S., Angers, D. A., & Leterme, P. (2008). A model to predict soil aggregate stability dynamics following organic residue incorporation under field conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 72(1), 119-125. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0018>
- Abiven, S., Menasseri, S., & Chenu, C. (2009). The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – a literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.09.015>
- Acevedo-Sandoval, O. A., Velázquez-Rodríguez, A., & Flores-Román, D. (2001). Agregación por especies vegetales y abonos orgánicos en tepetates fracturados bajo condiciones de invernadero. *Terra*, 19(4) 363-373.
- Amézketa, E. (1999). Soil aggregate stability: a review. *Journal of Sustainable Agriculture*, 14(2-3), 83-151. https://doi.org/10.1300/J064v14n02_08
- Báez-Pérez, A., Etchevers-Barra, J. D., Hidalgo-Moreno, C., Prat, C., Ordaz-Chaparro, V., & Núñez-Escobar, R. (2002). C Orgánico y P Olsen en tepetates cultivados de México. *Agrociencia*, 36(6), 643-653.
- Báez-Pérez, A., Etchevers-Barra, J. D., Prat, C. y Hidalgo-Moreno, C. (2007). Formation of aggregates and carbon sequestration in ameliorated tepetates in the Río Texcoco basin, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24(3), 487-497.
- Báez-Pérez, A., Hidalgo-Moreno, C. I., Matus-Baeza, F., Prat, C., & Etchevers-Barra, J. D. (2011) Fraccionamiento y acumulación de carbono orgánico en tres suelos volcánicos degradados de México. En J. F. Gallardo-Lancho (Coord.). *Materia orgánica edáfica y captura de carbono en sistemas iberoamericanos* (pp. 61-79). Salamanca, España: Red POCAIBA, SiFyQA.
- Báez-Pérez, A., Paz-Pellat, F., Etchevers-Barra, J. D., & Hidalgo-Moreno, C. (2012). Formación de agregados en cronosecuencias de tepetates. En F. Paz, M. Bazán, & V. Saynes (Eds.). *Dinámica del carbono en el suelo 2012. Serie avances temáticos del ciclo del carbono y sus interacciones* (pp. 157-163). Texcoco, Estado de México, México: Programa Mexicano del Carbono. ISBN 978-607-96490-05
- Báez-Pérez, A., Etchevers-Barra, J. D., Hidalgo-Moreno, C., Prat, C., Bautista-Cruz, A., & Gallardo-Lancho J. F. (2021). 38. Rehabilitation on hardened neo-volcanic soils in Mexico. In FAO and ITPS (Eds.). *Recarbonizing Global Soils – A technical manual of recommended sustainable soil management. Volume 4: Cropland, grassland, integrated systems and farming approaches – Case studies* (429-441). Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb6598en>
- Baldock, J. A., & Kay, B. D. (1987). Influence of cropping history and chemical treatments on the water-stable aggregation of a silt loam soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 67(3), 501-511. <https://doi.org/10.4141/cjss87-047>
- Blanco-Canqui, H., & Lal, R. (2004). Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 23(6), 481-504. <https://doi.org/10.1080/07352680490886842>
- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1-2), 3-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
- Ćirić, V., Manojlović, M., Nesić, L., & Belić, M. (2012). Soil dry aggregate size distribution: effect of soil type and land use. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12(4), 689-703. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162012005000025>
- De Gryze, S., Six, J., Brits, C., & Merckx, R. (2005). A quantification of short-term macroaggregate dynamics: influences of wheat residue input and texture. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(1), 55-66. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.07.024>
- De Gryze, S., Six, J., & Merckx, R. (2006). Quantifying water-stable soil aggregate turnover and its implication for soil organic matter dynamics in a model study. *European Journal of Soil Science*, 57(5), 693-707. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.00760.x>
- Emerson, W. W., & Greenland, D. J. (1990). Soil aggregates – formation and stability. In M. F. De Boodt, M. H. B. Hayes, A. Herbillon, E. B. A. De Strooper, & J. J. Tuck (Eds.). *Soil colloids and their associations in aggregates* (pp. 485-511). Boston, MA, USA: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2611-1_18
- Ferrera, C. R., Ortiz, A., Delgadillo, J., & Santamaría, S. (1997). Uso de la materia orgánica en la recuperación de tepetates y su influencia en los microorganismos. En C. Zebrowski, P. Quantin, & G. Trujillo (Eds.). *Memorias del III Simposio Internacional sobre Suelos volcánicos endurecidos* (pp. 225-237). Quito, Ecuador: Polar.
- Flores-Sánchez, D., Pérez-Olvera, M. A., & Navarro-Garza, H. (2004). Rehabilitación agroecológica de suelos volcánicos endurecidos, experiencias en el Valle de México. *LEISA Revista de Agroecología*, 19(4), 24-27.
- Fuentes, M., Govaerts, B., De León, F., Hidalgo, C., Dendooven, L., Sayre, K. D., & Etchevers, J. (2009). Fourteen years of applying zero and conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on physical and chemical soil quality. *European Journal of Agronomy*, 30(3), 228-237. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.10.005>
- Fuentes-Ponce, M. H., Hidalgo-Moreno, C., Etchevers-Barra, J. D., De León-González, F., Guerrero, A., Dendooven, L., ... Govaerts, B. (2011). Conservation agriculture, increased organic carbon in the top-soil macro-aggregates and reduced soil CO₂ emissions. *Plant and Soil*, 355, 183-197. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1092-4>

- Fuentes-Ponce, M. H., Hidalgo-Moreno, C., Paz-Pellat, F., & Etchevers, J. (2012). Modelación y síntesis de la dinámica del carbono en agregados asociada a prácticas de conservación en cultivos agrícolas. En F. Paz, M. Bazán y V. Saynes (Eds.). *Dinámica del carbono en el suelo 2012. Serie avances temáticos del ciclo del carbono y sus interacciones* (pp. 51-57). Texcoco, Estado de México, México: Programa Mexicano del Carbono. ISBN 978-607-96490-05.
- Gale, W. J., Cambardella, C. A., & Bailey, T. B. (2000). Root-derived carbon and the formation and stabilization of aggregates. *Soil science society of America Journal*, 64(1), 201-207. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.641201x>
- Hidalgo-Moreno, C., Etchevers-Barra, J. D., Martínez-Richa, A., Yee-Madeira, H., Calderon, H. A., Vera-Graziano, R., & Matus, F. (2010). Mineralogical characterization of the fine fraction (< 2 µm) of degraded volcanic soils and tepetates in Mexico. *Applied Clay Science*, 49(4), 348-358. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.11.007>
- Hidalgo-Moreno, C., Quantin, P., & Elsass, F. (1997). Caracterización mineralógica de los tepetates tipo fragipán del valle de México. En C. Zebrowski, P. Quantin, & G. Trujillo (Eds.). *Memorias del III Simposio Internacional sobre Suelos volcánicos endurecidos* (pp. 65-72). Quito, Ecuador: Polar.
- Kemper, W. D., & Rosenau, R. C. (1986). Aggregate stability and size distribution. In A. Klute (Ed.). *Methods of soil analysis. part 1. Physical and mineralogical methods* (pp. 425-442). Agronomy Monographs 9(1). Madison, WI, USA: ASA-SSSA.
- Kumar, R., Rawat, K. S., Singh, J., Singh, A., & Rai, A. (2013). Soil aggregation dynamics and carbon sequestration. *Journal of Applied and Natural Science*, 5(1), 250-267. <https://doi.org/10.31018/jans.v5i1.314>
- Leinweber, P., & Reuter, G. (1992). The influence of different fertilization practices on concentrations of organic carbon and total nitrogen in particle-size fractions during 34 years of a soil formation experiment in loamy marl. *Biology and Fertility of Soils*, 13(2), 119-124. <https://doi.org/10.1007/BF00337346>
- Lynch, J. M., & Bragg, E. (1985). Microorganisms and soil aggregate stability. In B. A. Stewart (Eds.). *Advances in Soil Science, vol 2* (133-171). New York, NY, USA: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5088-3_3
- Martens, D. A. (2000). Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(3), 361-369. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00162-5](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00162-5)
- Matus, F., Hidalgo, C., Monreal, C., Estrada, I., Fuentes, M., & Etchevers, J. (2011). Land use impacts on physical-based soil organic matter fractions on three hillside ferrasols in Mexico. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 71(2), 283-292.
- Niewczas, J., & Witkowska-Walczak, B. (2005). The soil aggregate stability index (ASI) and its extreme values. *Soil and Tillage Research*, 80(1-2), 69-78. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.02.023>
- Oades, J. M. (1984). Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, 76(1), 319-337. <https://doi.org/10.1007/BF02205590>
- Parsa-Retana, M., Velázquez-Rodríguez, A. S., Endara-Agramont A. R., & Paz-Pellat, F. (2019). Dinámica y modelación del carbono en agregados de suelos asociados a bosques infestados por muérdago enano. En F. Paz, A. S. Velázquez, & M. Rojo (Eds.). *Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2019* (pp. 167-174). Texcoco, Estado de México, México: Programa Mexicano del Carbono.
- Paz, F., Hidalgo, C., Etchevers, J. D., & Fuentes, M. H. (2012). Equivalencia ambiental y modelación de la dinámica del carbono en los agregados de los suelos. En F. Paz, M. Bazán, & V. Saynes (Eds.). *Dinámica del carbono en el suelo 2012. Serie avances temáticos del ciclo del carbono y sus interacciones* (pp. 92-99). Texcoco, Estado de México, México: Programa Mexicano del Carbono. ISBN 978-607-96490-05.
- Paz, F., Covalada, S., & Etchevers, J. (2014). Distribución del carbono orgánico en los diferentes tamaños de partículas del suelo: modelo simple de cinética lineal. *Terra Latinoamericana*, 32(2), 127-142.
- Paz, F., Covalada, S., Hidalgo, C., Etchevers, J., & Matus, F. (2016). Modelación simple y operativa de la distribución del carbono orgánico por fracciones físicas en los suelos. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 321-337.
- Plante, A. F., Feng, Y., & McGill, W. D. (2002). A modeling approach to quantifying soil macroaggregate dynamics. *Canadian Journal of Soil Science*, 82(2), 181-190. <https://doi.org/10.4141/S01-024>
- Prat, C., Moreno, J., Hidrobo, J., Trujillo, G., Ortega, C. A., Etchevers-Barra, J. D., ... Gallardo-Lancho, J. F. (2015). Turning rocks into soils from the Ecuadorian Andes to the Mexican transvolcanic sierra. In R. Romero, A. Vita, S. Manuelli, E. Zanin, M. Freppaz, & S. Stanchi (Eds.). *Understanding mountain soils: A contribution from mountain areas to the International Year of Soils 2015* (pp. 100-103). Rome, Italy: FAO.
- Quantin, P., Zebrowski, C., Delaune, M., & Hidalgo, C. (1992). El material original de los tepetates t2 y t3 de la región de Texcoco (México): ¿loess o cineritas? *Terra*, 10, 178-182.
- Segoli, M., De Gryze, S., Dou, F., Lee, J., Post, W. M., Denef, K., & Six, J. (2013). AggModel: A soil organic matter model with measurable pools for use in incubation studies. *Ecological Modelling*, 263, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.04.010>
- Skidmore, E. L., & Layton, J. B. (1992). Dry-soil stability as influenced by selected soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 56(2), 557-561. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600020034x>
- Schulten, H. R., Leinweber, P., & Reuter, G. (1992). Initial formation of soil organic matter from grass residues in a long-term experiment. *Biology and Fertility of Soils*, 14(4), 237-245. <https://doi.org/10.1007/BF00395458>
- Six, J., Elliot, E. T., & Paustian, K. (2000). Soil structure and soil organic matter: II. Normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3), 1042-1049. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6431042x>
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241(2), 155-176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>

- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., & Deneff, K. (2004). A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79(1), 7-31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>
- Sollins, P., Homman, P., & Caldwell, B. A. (1996). Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. *Geoderma*, 74(1-2), 65-105. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(96\)00036-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(96)00036-5)
- Tirgarsoltani, M. T., Gorji, M., Mohammadi, M. H., & Millan, H. (2014). Evaluation of models for description of wet aggregate size distribution from soils of different land uses. *Soil Science and Plant Nutrition*, 60(2), 123-133. <https://doi.org/10.1080/00380768.2013.878642>
- Tisdall, J. M., & Oades, J. M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33(2), 141-163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>
- Totsche, K. U., Amelung, W., Gerzabek, M. H., Guggenberger, G., Klumpp, E., Knief, C., ... Kögel-Knabner, I. (2018). Microaggregates in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 181(1), 104-136. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600451>
- Velázquez-Rodríguez, A. S., Flores-Román, D., & Acevedo-Sandoval, O. A. (2001). Formación de agregados en tepetate por influencia de especies vegetales. *Agrociencia*, 35(3), 311-320.
- Velázquez-Rodríguez, A. S., Flores-Román, D., Etchevers-Barra, J. D., & García-Calderón, N. E. (2008). Materia orgánica en tepetate bajo cultivo de higuera y pasto, acondicionado con estiércol y fertilizante. *Agrociencia*, 42(1), 11-19.
- Velázquez-Rodríguez, A. S., Flores-Román, D., Etchevers-Barra, J. D., & Paz-Pellat, F. (2012a). Compuestos orgánicos y formación de agregados estables en tepetates. En F. Paz, M. Bazán, & V. Saynes (Eds.). *Dinámica del carbono en el suelo 2012. Serie avances temáticos del ciclo del carbono y sus interacciones* (pp. 131-136). Texcoco, Estado de México, México: Programa Mexicano del Carbono. ISBN: 978-607-96490-05.
- Velázquez-Rodríguez, A. S., Paz-Pellat, F., Hidalgo-Moreno, C., & Etchevers-Barra, J. D. (2012b). Síntesis de los patrones asociados a la formación de agregados de suelos a partir de tepetates. En F. Paz, M. Bazán, & V. Saynes (Eds.). *Dinámica del carbono en el suelo 2012. Serie avances temáticos del ciclo del carbono y sus interacciones* (pp. 137-145). Texcoco, Estado de México, México: Programa Mexicano del Carbono. ISBN: 978-607-96490-05.
- Zebrowski, C. (1992). Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina. *Terra*, 10, 15-23.