

GLOMALINA Y SECUESTRO DE CARBONO EN TEPETATES CULTIVADOS

GLOMALIN AND CARBON SEQUESTRATION IN CULTIVATED TEPETATES

Aurelio Bález-Pérez^{1,3}, M. C. Ángeles González-Chávez¹, Jorge D. Etchevers-Barra^{1*}, Christian Prat², Claudia Hidalgo-Moreno¹

¹Edafología. Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados. 56230, Montecillo. Estado de México. (etchev@colpos.mx). ²IRD IRD-LTHE, BP 53,38 041 Grenoble, Cedex 9. Francia.

³Dirección actual: INIFAP, Campo Experimental Bajío. Carretera Celaya-San Miguel Allende km 7.5. C.P. 381100, Celaya, Guanajuato.

RESUMEN

Los tepetates son tobas volcánicas endurecidas que afloran en la superficie debido a procesos erosivos; algunos de éstos pueden habilitarse para la agricultura y con ello tienen potencial para secuestrar carbono (C). Este elemento se acumula en los frágiles agregados que se forman en su estructura física después de cultivarse, pero se desconoce el mecanismo por el cual es secuestrado en la fracción mineral en estos sustratos volcánicos. Se presume que la actividad biológica contribuye a la estabilización del C orgánico (COS), específicamente la de los hongos micorrízico arbusculares (HMA). Se ha postulado que la glomalina (una glicoproteína producida por los HMA) influye en ambos procesos. Para contribuir a la comprensión de este fenómeno, se realizó el presente estudio con los siguientes objetivos: 1) evaluar la acumulación del COS, la glomalina y el carbono de la glomalina (CG) en tepetates cultivados; 2) medir el aporte de C que hace la glomalina al COS; 3) evaluar la tendencia de acumulación del CG con los años de cultivo. Con base en entrevistas a productores de la cuenca del río Texcoco, se seleccionaron 83 parcelas con 10 a 20 años de cultivo, y se definieron 10 clases de manejo agronómico (I al X). Como referencia se usaron cuatro suelos Faeozem de la región agrupados en dos clases de manejo. Otras 21 parcelas de tepetate tenían de 4 a más de 100 años de cultivo. Se recolectaron muestras de tepetate (0-20 cm) y se determinó el COS, la glomalina y el CG. La relación entre el COS y las últimas variables fue estrecha ($R > 0.91$). El manejo agronómico influyó significativamente ($p \leq 0.05$) en la acumulación del COS, la glomalina y el CG. En función de la máxima concentración de COS observada, se calculó que los tepetates habilitados para la producción agrícola después de dos décadas de cultivo, y un manejo agronómico con constante incorporación de residuos orgánicos, tienen capacidad para almacenar

ABSTRACT

The tepetates are hardened volcanic tuffs that outcrop on the surface due to erosive processes; some of them can be ameliorated for agriculture and thus sequester carbon (C). This element accumulates in fragile aggregates that are formed as part of their developing physical structure after being cultivated, but the mechanism by which it is sequestered in the mineral fraction in these volcanic substrates is unknown. It is assumed that the biological activity contributes to the stabilization of the organic C (COS), specifically that of the arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). It has been postulated that glomalina (a glycoprotein produced by the AMF) influences both processes. To contribute to the comprehension of this phenomenon, the present study was made with the following objectives: 1) to evaluate the accumulation of COS, glomalina and glomalina carbon (GC) in cultivated tepetates; 2) to measure the contribution of C made by the glomalina to the COS; and 3) to evaluate the tendency of accumulation of GC with years of cultivation. Based on interviews with producers of the Texcoco River basin, 83 plots were selected with 10 to 20 years of cultivation, and 10 classes of agronomic management were defined (I to X). As reference four Phaeozem soils of the region were used, grouped in two classes of management. Another 21 plots of tepetate had from 4 to over 100 years of cultivation. Tepetate samples were collected (0-20 cm) and COS, glomalina and GC were determined. The relationship between COS and the latter variables was close ($R > 0.91$). The agronomic management had significant influence ($p \leq 0.05$) on the accumulation of COS, glomalina and GC. As function of the maximum concentration of COS observed, it was calculated that the tepetates ameliorated for agricultural production after two decades of cultivation, with an agronomic management with constant incorporation of organic residues, have capacity for storing approximately 90 t ha^{-1} of C in the first 20 cm of depth, with a contribution of 15 % of stabilized C from glomalina ($p \leq 0.05$). The accumulation of GC as a function of time followed a logarithmic tendency.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Octubre, 2009. Aprobado: Junio, 2010.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 44: 517-529. 2010.

aproximadamente 90 t ha⁻¹ de C en los primeros 20 cm de profundidad, con una aportación de 15 % de C estabilizado, proveniente de la glomalina ($p \leq 0.05$). La acumulación del CG en función del tiempo siguió una tendencia logarítmica.

Palabras clave: captura de carbono, hongos micorrízicos arbusculares, manejo agronómico, tobas volcánicas.

INTRODUCCIÓN

Los tepetates son capas de materiales de origen volcánico (tobas) endurecidas por procesos geológicos y pedológicos, muchas veces cubiertas por un suelo superficial (Etchevers *et al.*, 2006). En el Eje Neovolcánico Transmexicano cubren poco más de 37 000 km² de superficie (Zebrowski, 1992). Procesos erosivos naturales e inducidos por el hombre han provocado el afloramiento de las capas subyacentes de tepetates en extensas áreas de esa región. Se reconocen dos tipos de tepetate de acuerdo con su grado de dureza: fragipán y duripán (Hidalgo *et al.*, 1997). El primero es duro cuando seco pero se reblandece cuando húmedo, y el segundo es duro en estado seco y húmedo. El tepetate tipo fragipán se puede habilitar para la producción agrícola o forestal mediante prácticas de roturación mecánica y un manejo agronómico adecuado, que incluye elevar su contenido de materia orgánica, lo cual favorece su agregación y fertilidad (Báez *et al.*, 2007a; Navarro *et al.*, 2003). La materia orgánica además induce la actividad biológica en el sustrato roturado, y mejora sus propiedades físicas como su capacidad de infiltración y de retención de agua (Oades, 1988).

De especial interés para la agregación son los hongos micorrízico arbusculares (HMA) que contribuyen a la formación y estabilidad de agregados del suelo. El micelio de dichos organismos y las sustancias que secretan aglutinan las partículas elementales del suelo (González-Chávez *et al.*, 2004; Wright y Upadhyaya, 1996). Asociada con la actividad de las hifas de los HMA se ha identificado una glicoproteína llamada glomalina, un compuesto orgánico específico de estos hongos (Wright y Upadhyaya, 1998). La glomalina almacena C en subunidades de proteína y carbohidratos, que contiene 30 a 40 % de C orgánico, y funciona como cementante, aglutinando fuertemente las partículas de la fracción mineral del suelo y proporcionando estabilidad a

Key words: carbon sequestration, arbuscular mycorrhizic fungi, agronomic management, volcanic tuffs.

INTRODUCTION

The tepetates are layers of materials of volcanic origin (tuffs) hardened by geological and pedological processes, often covered by a superficial soil (Etchevers *et al.*, 2006). In the Trans-Mexican Volcanic Axis they cover slightly over 37 000 km² of surface (Zebrowski, 1992). Natural erosive processes and those induced by man have provoked the outcropping of the underlying layers of tepetates in extensive areas of the region. Two types of tepetate are recognized according to their degree of hardness: fragipan and duripan (Hidalgo *et al.*, 1997). The former is hard when dry but softens when it is wet, and the latter is hard when dry or wet. The fragipan type tepetate can be ameliorated for agricultural or forest production by means of mechanical tilling practices and an adequate agronomic management, which includes raising its content of organic matter, which favors its aggregation and fertility (Báez *et al.*, 2007a; Navarro *et al.*, 2003). Furthermore, the organic matter induces biological activity in the tilled substrate, and improves its physical properties such as its capacity of infiltration and water retention (Oades, 1988).

Of special interest for aggregation are the arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) which contribute to the formation and stability of soil aggregates. The mycelia of these organisms and the substances that they secrete agglutinate the elemental soil particles (González-Chávez *et al.*, 2004; Wright and Upadhyaya, 1996). Associated with the activity of the hyphae of the AMF, a glycoprotein called glomalina has been identified, a specific organic compound of these fungi (Wright and Upadhyaya, 1998). Glomalina stores C in subunits of protein and carbohydrates, which contains 30 to 40 % of organic C, and functions as a binder, strongly agglutinating the particles of the mineral fraction of the soil and providing stability to the aggregates (Franzluebbers *et al.*, 2000; Weller, 2002). Glomalina is apparently recalcitrant, being able to last in soils from 7 to 42 years, according to the environmental conditions, the ecosystem and the agricultural management of the soils (Wright and Upadhyaya, 1998; Rillig *et al.*, 2001; Weller, 2002), it is insoluble in water and in

los agregados (Franzuebbers *et al.*, 2000; Weller, 2002). La glomalina es aparentemente recalcitrante pudiendo durar en los suelos de 7 a 42 años según las condiciones ambientales, el ecosistema y el manejo agrícola de los suelos (Wright y Upadhyaya, 1998; Rillig *et al.* 2001; Weller, 2002), es insoluble en agua y en soluciones salinas comúnmente usadas en extracciones de compuestos del suelo (Wright y Jawson, 2001). Según Rillig *et al.* (2003) la glomalina puede usarse como un indicador de los efectos del cambio de uso de suelo. Sin embargo, la proliferación de HMA, y por tanto la producción de glomalina, es limitada en suelos con alta disponibilidad de P y por algunas prácticas comunes en la agricultura como: fumigación, fertilización y uso de plaguicidas. Estos factores afectan negativamente el establecimiento y funcionalidad de los hongos micorrízicos arbusculares (Ryan y Graham, 2002). Lo anterior presupone que la producción de glomalina sería limitada en esas condiciones.

Debido a que los tepetates prácticamente no contienen C orgánico (COS), N y P en su estado natural, cuando se acondicionan para producción agrícola o forestal, es posible estudiar la dinámica de acumulación de estos elementos. El COS fue evaluado por Báez *et al.* (2002), quienes concluyen que su tasa de acumulación depende del manejo agronómico y del tiempo de cultivo; sin embargo, su acumulación no es lineal, sino que sigue una tendencia logarítmica. Es decir, la tasa de acumulación del COS decrece después de una rápida acumulación de este elemento durante los primeros años de cultivo, alcanzando un equilibrio entre la acumulación y las pérdidas. Estas últimas son ocasionadas principalmente por efecto de la erosión hídrica y emisiones de CO₂, resultado de la mineralización de la materia orgánica por la oxidación química y la actividad biológica (Báez *et al.*, 2009). En los tepetates el COS no se ha relacionado con la actividad microbiana, en especial con la de los HMA, y se desconoce cuál es la proporción de C recalcitrante que aporta la glomalina a éstos, cuando son habilitados para la agricultura. Los objetivos del presente estudio fueron: 1) evaluar la acumulación de glomalina y del C contenido en ella, y analizar la relación que guarda con el COS en tepetates cultivados con diferente manejo agronómico; 2) medir el aporte de C de la glomalina al COS en estos materiales volcánicos; y 3) evaluar la tendencia de acumulación del CG con los años de cultivo.

saline solutions commonly used in extractions of soil compounds (Wright and Jawson, 2001). According to Rillig *et al.* (2003), glomalin can be used as an indicator of the effects of the change of soil use. However, the proliferation of AMF, and therefore the production of glomalin, is limited in soils with high availability of P and from some common practices in agriculture, such as: fumigation, fertilization and use of pesticides. These factors negatively affect the establishment and functionality of the arbuscular mycorrhizal fungi (Ryan and Graham, 2002). The previous factors presuppose that the production of glomalin will be limited under these conditions.

Because the tepetates contain practically no organic C (COS), N and P in their natural state, when they are conditioned for agricultural or forest production, it is possible to study the dynamic of accumulation of these elements. The COS was evaluated by Báez *et al.* (2002), who concluded that its accumulation rate depended on the agronomic management and on the time of cultivation; however, its accumulation is not linear, but rather follows a logarithmic tendency. That is, the accumulation rate of the COS decreases after a rapid accumulation of this element during the first years of cultivation, reaching an equilibrium between accumulation and losses. The losses are mainly caused by the effect of water erosion and emissions of CO₂, result of the mineralization of the organic matter by chemical oxidation and biological activity (Báez *et al.*, 2009). In tepetates the COS has not been related to microbial activity, especially with that of the AMF, and the proportion of recalcitrant C that supplies the glomalina to the tepetates when they are ameliorated for agriculture is not known. The objectives of the present study were as follows: 1) to evaluate the accumulation of glomalin and of the C content in it, and to analyze the relationship which it has with the COS in tepetates cultivated with different agronomic management; 2) to measure the contribution of C of the glomalina to the COS in these volcanic materials; 3) to evaluate the tendency of accumulation of GC with years of cultivation.

MATERIALS AND METHODS

The study was made with tepetates collected from the Texcoco River basin (Figure 1), State of Mexico (98° 45' and 98° 27' and 19° 32' N), between 2300 and 2900 m altitude, a ustic to udic moisture regime, with rainfall of 600 to 900 mm year⁻¹. These

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó con tepetates recolectados de la cuenca del río Texcoco (Figura 1), Estado de México (98° 45' y 98° 50' O y 19° 27' y 19° 32' N), entre 2300 y 2900 m de altitud, un régimen de humedad ústico a údico, con precipitación de 600 a 900 mm año⁻¹. Estos materiales volcánicos se ubican en el piedemonte de la Sierra Nevada entre 2400 y 2800 m de altitud, en clima templado subhúmedo. Los tepetates se caracterizan por presentar una matriz mineral masiva, poco fragmentada y con abundante presencia de vidrio volcánico y materiales amorfos (Quantin *et al.*, 1993).

Las muestras de material usadas para este experimento fueron las mismas recolectadas para un estudio preliminar sobre cambios en los aspectos físicos de los tepetates, provocados por el tiempo transcurrido desde su habilitación para la agricultura (Báez *et al.*, 2002, 2007b). Entre ellas se encuentran también muestras recolectadas en camas de invernadero construidas con tepetate. De esos estudios proviene una base de datos que contiene la siguiente información acerca de los tepetates habilitados para la agricultura: año en que se roturaron las parcelas, especies cultivadas, manejo de residuos de cosecha, adición de fertilizantes químicos y orgánicos y uso de agua de riego. Las parcelas muestran una amplia variación en cuanto al tiempo transcurrido desde su habilitación y al manejo agronómico; con base en este

volcanic materials are located on the piedmont of the Sierra Nevada between 2400 and 2800 m altitude, in sub-humid temperate climate. The tepetates are characterized by presenting a massive mineral matrix, slightly fragmented and with an abundant presence of volcanic glass and amorphous materials (Quantin *et al.*, 1993).

The samples of material used for this experiment were the same ones collected for a previous study on the changes in the physical aspects of the tepetates, caused by the time passed from its amelioration for agriculture (Báez *et al.*, 2002, 2007b). Included among these are also samples collected in greenhouse beds built with tepetate. These studies yielded a data base containing the following information of the tepetates ameliorated for agriculture: year in which the plots were tilled, species cultivated, management of harvest residues, chemical and organic fertilizers applied and use of irrigation water. The plots show a wide variation with respect to the time from their amelioration to their agronomic management; based on the latter they were grouped in 10 classes (Table 1) corresponding to the cultivated tepetates (83 plots). As references with what occurs with a true soil, four soils of the same region (Phaeozem) were included, which due to their different intensity of agronomic management were grouped into two classes: SFI and SFII (Table 1). These soils are found in the vicinity of the sampled plots of tepetate and served as contrast with the ameliorated tepetates.

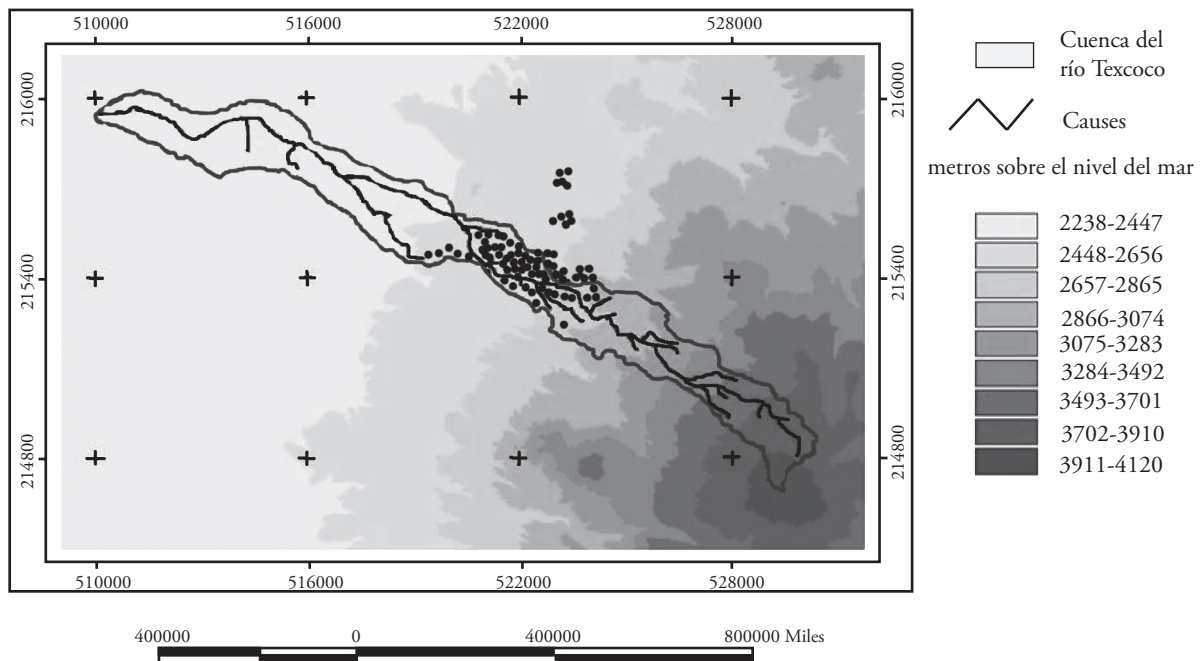


Figura 1. Zona de estudio en la cuenca del río Texcoco, Estado de México.
Figure 1. Zone of study in the Texcoco River basin, State of México.

último se había agrupado en 10 clases (Cuadro 1) correspondientes a los tepetates cultivados (83 parcelas). Como referencias con lo que acontece con un suelo verdadero se incluyeron cuatro suelos (Faeozem) de la misma región, los cuales por su manejo agronómico con diferente intensidad se agruparon en dos clases: SFI y SFII (Cuadro 1). Estos suelos se encuentran en la vecindad de las parcelas de tepetate muestreadas y sirvieron como contraste con los tepetates habilitados. Otras 21 parcelas de tepetate tenían de 4 a más de 100 años de cultivo y se usaron para calcular la tendencia de acumulación del CG en función del tiempo de cultivo.

El pH de los tepetates usados en el presente estudio varió de ligeramente ácido a alcalino (6.8 a 8.1) y la clase textural se ubicó en el intervalo de franca a arcillosa. Esta heterogeneidad es propia de las capas de toba volcánica. La clasificación del tipo de tepetate t3 propuesta por Quantin *et al.* (1993) consideró criterios geológicos, pedológicos, estratigráficos y de mineralogía. Sin embargo, existen otros factores que influyen en la heterogeneidad de estos materiales volcánicos relacionados con la forma de depósito de las cenizas volcánicas y el grado de alteración de los minerales primarios y secundarios.

Se recolectaron muestras compuestas (por 22 submuestras) de tepetate cultivado de 0 a 20 cm de profundidad; fueron secadas al aire a temperatura ambiente, se molieron y tamizaron (2 mm). Para medir el COS y el C inorgánico, las muestras se molieron con un mortero de ágata y se tamizaron por malla 100 (0.14 mm). Para determinar el C se usó un analizador automático de C total (Shimadzu, TOC-5050). Para la extracción de glomalina se usó citrato de sodio 50 mM a pH8 y autoclave por 1 h (1.3 kg cm^{-2}) según los procedimientos de extracción, precipitación y diálisis propuestos por Wright y Jawson (2001). El CG se midió en los extractos dializados de glomalina en el analizador TOC-5050. El diseño experimental fue completamente al azar con un número desigual (3 a 15) de repeticiones por clase de manejo (Cuadro 1). La comparación de medias se efectuó con varianzas ponderadas por tamaño de muestra, procedimiento GLM y opción REGWQ (SAS, 1998). También se calculó el error estándar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

COS y glomalina en tepetates cultivados

La menor cantidad de glomalina y COS se observó en la clase de manejo I; tepetate recién roturado, donde se midieron sólo trazas de ambas sustancias (0.14 mg g^{-1} y 0.11% ; Figura 2). Estos valores se consideraron como el punto de referencia inicial de los tepetates en su condición natural. La concentración de glomalina en esta clase de manejo fue muy

Another 21 plots of tepetate had from 4 to more than 100 years of cultivation and were used to calculate the tendency of GC accumulation as a function of the time of cultivation.

The pH of the tepetates used in the present study varied from slightly acid to alkaline (6.8 to 8.1) and the textural class was located in an interval from loam to clay. This heterogeneity is characteristic of the layers of volcanic tuff. The classification of the type of tepetate t3 proposed by Quantin *et al.* (1993) considered geological, pedological, stratigraphic and mineralogical criteria. However, there are other factors that influence the heterogeneity of these volcanic materials related with the form of the deposit of volcanic ash and the degree of alteration of the primary and secondary minerals.

Samples composed of cultivated tepetate (22 subsamples) were collected from 0 to 20 cm depth; they were air dried at room temperature, ground and sieved (2mm). To measure the COS and inorganic C, the samples were ground in an agate mortar and passed through a 100 mesh (0.14 mm) sieve. To determine C an automatic analyzer of total C was used (Shimadzu, TOC-5050). For the extraction of glomalina, sodium citrate 50 mM at pH8 was used and autoclave for 1 h (1.3 kg cm^{-2}) according to the procedures of extraction, precipitation and dialysis proposed by Wright and Jawson (2001). The GC was measured in the dialyzed extracts of glomalina in the TOC-5050 analyzer. The experimental design was completely randomized with an unequal number (3 to 15) of replicates per management class (Table 1). The comparison of means was made with variances weighted by size of sample, GLM procedure and option REGWQ (SAS, 1998). Also the standard error was calculated.

RESULTS AND DISCUSSION

COS and glomalina in cultivated tepetates

The lowest amount of glomalina and COS was observed in management class I; recently tilled tepetate, where only traces of both substances were measured (0.14 mg g^{-1} and 0.11% ; Figure 2). These values are considered to be the initial reference point of the tepetates in their natural condition. The concentration of glomalina in this management class was very low compared to the typical concentrations observed in different types of soil ($2\text{-}15 \text{ mg g}^{-1}$), and closer to the interval of values reported ($0.003\text{-}11 \text{ mg g}^{-1}$) for arid soils, which frequently have scant vegetation (Bird *et al.*, 2002; Treseder and Turner, 2007). According to Bird *et al.* (2002) and Rillig *et al.* (2003), the soils covered with tree species or grasses present higher concentration of

Cuadro 1. Descripción de las clases de manejo agronómico en las que se agruparon las parcelas muestreadas en las comunidades de la cuenca del río Texcoco, Estado de México (adaptado de Báez *et al.*, 2002 y 2007b).**Table 1. Description of the classes of agronomic management in which the plots were grouped, sampled in the communities of the Texcoco River basin, State of México (adapted from Báez *et al.*, 2002 and 2007b).**

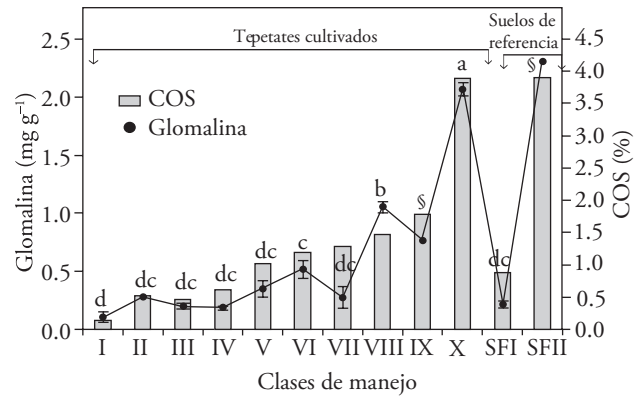
Clases (n) [†]	Sistema de cultivo	Años de cultivo	Descripción
I (4)	Sin cultivar	0	Teperate recientemente roturado sin haber sido cultivado.
II (15)	Cereales sin estiércol	11-18	Monocultivo de maíz (<i>Zea mays</i> L.), trigo (<i>Triticum vulgare</i> L.) o cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.) en temporal. Con LC, RRC y sin incorporación de abonos orgánicos.
III (19)	Cereales y ocasionalmente leguminosas sin estiércol	12-19	Monocultivo de maíz (<i>Zea mays</i> L.), trigo (<i>Triticum vulgare</i> L.) o cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.) con rotación ocasional (una vez cada 2 o 3 años) de leguminosas como frijol (<i>Phaseolus vulgare</i> L.) o haba (<i>Vicia faba</i> L.) en temporal. Con LC, RRC y sin incorporación de abonos orgánicos.
IV (13)	Rotación gramínea-leguminosa con poco estiércol	11-18	Monocultivo de maíz (<i>Zea mays</i> L.), trigo (<i>Triticum vulgare</i> L.) o cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.) en rotación con (<i>Phaseolus vulgare</i> L.) o haba (<i>Vicia faba</i> L.) en temporal. Con LC, RRC y aportes de estiércol bovino (<1 t ha ⁻¹ año ⁻¹).
V (4)	Cereales y ocasionalmente leguminosas con estiércol	12-18	Monocultivo de maíz (<i>Zea mays</i> L.), trigo (<i>Triticum vulgare</i> L.) o cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.) con rotación ocasional (una vez cada 2 o 3 años) de leguminosas como frijol (<i>Phaseolus vulgare</i> L.) o haba (<i>Vicia faba</i> L.) en temporal. Con LC, RRC y aportes de estiércol bovino (>3 t ha ⁻¹ año ⁻¹).
VI (14)	Asociación o rotación gramínea-leguminosa con estiércol	11-20	Cultivo de (<i>Zea mays</i> L.), trigo (<i>Triticum vulgare</i> L.) o cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.) en asociación o rotación con (<i>Phaseolus vulgare</i> L.) o haba (<i>Vicia faba</i> L.) en temporal. Con LC, RRC y aportes de estiércol bovino (>3 t ha ⁻¹ año ⁻¹).
VII (3)	Cultivo perenne, sin labranza y sin riego	11-18	Cultivo perenne de agapando (<i>Agapanthus</i> spp.), nopales (<i>Opuntia</i> spp.) y agave (<i>Agave</i> spp.) sin labranza y sin riego.
VIII (8)	Cama invernadero con estiércol	11-20	Cultivos ornamentales de rosa (<i>Rosa</i> spp.), crisantemo (<i>Chrysanthemum</i> spp.), clavel (<i>Dianthus</i> spp.), etc. Uso de plaguicidas y fertilizantes químicos. Con labranza, riego y aportes de estiércol bovino (>5 t ha ⁻¹ año ⁻¹).
IX (1)	Cultivos perennes sin labranza y con riego	20	Cultivo perenne de agapando (<i>Agapanthus</i> spp.), nopales (<i>Opuntia</i> spp.) y agave (<i>Agave</i> spp.). Sin labranza y riego continuo. Incorporación de los residuos de cosecha.
X (2)	Cama invernadero con composta de madera	12-20	Cultivo de rosa (<i>Rosa</i> spp.), crisantemos (<i>Chrysanthemum</i> spp.), clavel (<i>Dianthus</i> spp.), etc. Utilización de fertilizantes químicos, uso de plaguicidas, empleo de prácticas de labranza y riego. Con aportes de estiércol bovino (>3 t ha ⁻¹ año ⁻¹) y composta de madera (>2 t ha ⁻¹ año ⁻¹).
SFI (3)	Manejo convencional	-	Monocultivo de maíz (<i>Zea mays</i> L.), trigo (<i>Triticum vulgare</i> L.) y cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.) con rotación ocasional (una vez cada 2 o 3 años) de leguminosas como frijol (<i>Phaseolus vulgare</i> L.) o haba (<i>Vicia faba</i> L.) en temporal. Con LC, RRC y sin incorporación de abonos orgánicos.
SFII (1)	Cultivo perenne de frutales con riego	-	Zarzamora (<i>Rubus fruticosus</i> L.), frambuesa (<i>R. idaeus</i> L.), higuera (<i>Picus carica</i> L.), capulín (<i>Prunus serotina</i> Cav.), durazno (<i>P. persica</i> L.), ornamentales y medicinales. Riego continuo. Incorporación de los residuos de cosecha.

[†]n: repeticiones por sistema (87 muestras analizadas). IRC: incorporación de los residuos de cosecha; LC: labranza convencional (barbecho, rastra y surcado); RRC: retiro de los residuos de cosecha; SF: suelo Faeozem ♦ replicates per system (87 samples analyzed). RC: incorporation of harvest residues; LC: conventional tillage (fallowing, harrowing, and plowing); RRC: removal of harvest residues, SF: Phaeozem soil.

baja comparada con las concentraciones típicas observadas en otros tipos de suelo (2-15 mg g⁻¹), y más cercanos al intervalo de valores reportados (0.003-11 mg g⁻¹) para suelos áridos, que en ocasiones tienen escasa vegetación (Bird *et al.*, 2002; Treseder y Turner, 2007). Según Bird *et al.* (2002) y Rillig *et al.* (2003), los suelos cubiertos con especies arbóreas o pastos presentan mayor concentración de glomalina que los suelos libres de vegetación, lo cual se explica por la presencia permanente de plantas que propician abastecimiento permanente de fotosintatos para alimentar los HMA estrechamente relacionados con producción de glomalina (González-Chávez *et al.*, 2004). Sin embargo, en la presente investigación la presencia de plantas en el tepetate no presentó este mismo efecto. La concentración de COS y glomalina en las parcelas correspondientes a las clases de manejo agronómico II, III y IV, con escaso ingreso anual de residuos orgánicos, fue cuatro veces mayor (0.5 a 0.6 % de COS y 0.3 a 0.4 mg g⁻¹ de glomalina; p>0.05) a lo observado en el tepetate de la clase I (recién roturado y sin cultivar). En estas últimas clases de manejo agronómico, los residuos de cosecha se usan principalmente para alimentar al ganado y la incorporación de abono orgánico al suelo es prácticamente nula. Por tanto, el aumento en el COS, la proliferación de HMA y, en consecuencia, la producción de glomalina es en parte limitada por la ausencia de materia orgánica. Esto se corrobora con los niveles significativamente mayores de COS, pero no de glomalina en la clase V, en la cual se aportan abonos orgánicos en mayor proporción (> 3 t ha⁻¹ año⁻¹) que en las clases anteriores (< 1 t ha⁻¹ año⁻¹).

En la clase de manejo agronómico VI, con leguminosas, la concentración promedio de glomalina fue 0.52 mg g⁻¹, significativamente mayor (p>0.05) a la observada en la clase I. La incorporación de leguminosas, ya sea en rotación o en asociación con cereales, y la adición de estiércol, favorecen el rendimiento de trigo, cebada y maíz (Báez *et al.*, 2007a; Navarro *et al.*, 2003). El cultivo de leguminosas tiene un efecto biológico relevante en el suelo por su capacidad de asociación en doble simbiosis con bacterias fijadoras de N y HMA (Álvarez-Solís *et al.*, 2000). Lo anterior significa una mayor disponibilidad regular de N y P para las plantas. La actividad de los HMA favorece además la producción de glomalina (González-Chávez *et al.*, 2004).

La clase de manejo VII, con cultivos perennes de temporal sin labranza, mostró una concentración



- I: Tepetate sin cultivar (recien roturado)
- II: Cereales sin estiércol
- III: Cereales y ocasionalmente leguminosas sin estiércol
- IV: Rotación gramínea leguminosa con poco estiércol
- V: Cereales y ocasionalmente leguminosas con estiércol
- VI: Asociación o rotación gramínea-leguminosa con estiércol
- VII: Cultivos perennes sin labranza y sin riego
- VIII: Cama invernadero con estiércol
- IX: Cultivos perennes sin labranza y con riego
- X: Cama invernadero con composta de madera
- SFI: Suelo Faeozem con manejo convencional
- SFII: Faeozem con cultivo perenne de frutales con riego.

Figura 2. Clases de manejo agronómico de los tepetates cultivados y suelos de referencia, y su concentración media de COS (Báez *et al.*, 2002 y 2007b) y glomalina. Valores con letras diferentes en cada línea son estadísticamente diferentes (p≤0.05). (§) n=1, no entra en el análisis estadístico.

Figure 2. Classes of agronomic management of the cultivated tepetates and reference soils, and their mean concentration of COS (Báez *et al.*, 2002 and 2007b) and glomalina. Values with different letters in each line are statistically different (p≤0.05). (§) n=1, does not enter in the statistical analysis.

glomalina que los suelos libres de vegetación, lo cual se explica por la presencia permanente de plantas que proveen un suministro permanente de fotosintatos para alimentar los HMA estrechamente relacionados con la producción de glomalina (González-Chávez *et al.*, 2004). Sin embargo, en la presente investigación la presencia de plantas en el tepetate no presentó este mismo efecto. La concentración de COS y glomalina en las parcelas correspondientes a las clases de manejo agronómico II, III y IV, con escaso ingreso anual de residuos orgánicos, fue cuatro veces mayor (0.5 a 0.6 % de COS y 0.3 a 0.4 mg g⁻¹ de glomalina; p>0.05) a lo observado en el tepetate de la clase I (recién roturado y sin cultivar). En estas últimas clases de manejo agronómico, los residuos de cosecha se usan principalmente para alimentar al ganado y la incorporación de abono orgánico al suelo es prácticamente nula. Por tanto, el aumento en el COS, la proliferación de HMA y, en consecuencia, la producción de glomalina es en parte limitada por la ausencia de materia orgánica. Esto se corrobora con los niveles significativamente mayores de COS, pero no de glomalina en la clase V, en la cual se aportan abonos orgánicos en mayor proporción (> 3 t ha⁻¹ año⁻¹) que en las clases anteriores (< 1 t ha⁻¹ año⁻¹).

promedio de COS y glomalina semejante ($p > 0.05$) a lo reportado en las clases V y VI, donde se adicionaron regularmente abonos orgánicos. Los cultivos establecidos, principalmente el agapando (*Agapanthus africanus* L.), favorecen un aporte regular de residuos de orgánicos al sistema y proporcionan una cobertura vegetal permanente en el suelo. Esto favorece la conservación de la humedad, la actividad biológica y debería incrementar la proliferación de HMA y la producción de glomalina, como lo reportan Borie *et al.* (2006) y West *et al.* (2005). Sin embargo, en el presente trabajo, no fueron significativamente superiores al observado en la clase I.

Las clases de manejo VIII y IX mostraron un aumento de glomalina mayor de 30 % ($p \leq 0.05$) con respecto a la clase VII. Fue notable que los cultivos perennes con labranza cero tuvieron mayor capacidad para acumular COS y producir glomalina, comparado con los sistemas agrícolas con labranza convencional (barbecho, rastreo, surcado y aporque). La labranza convencional permite la oxidación de C y su pérdida como CO_2 . Con labranza cero la materia orgánica que queda en la superficie del suelo reduce la evaporación, la temperatura y el intercambio de gases que intervienen en la oxidación biológica de la misma (Reicosky y Lindstrom, 1993). En estas condiciones los HMA, relacionados con la glomalina, también son más abundantes con labranza cero, porque no hay ruptura de hifas y éstas contribuyen mayormente a la estabilidad de los agregados del suelo (Rillig *et al.*, 2002; Franzluebbers *et al.*, 2000) que participan en la protección física del C lábil del suelo y con efecto en el secuestro de carbono (Six *et al.* 2006).

La concentración de COS y glomalina fue 1.5 % y 1.2 mg g^{-1} en la clase VIII, la cual correspondió a tepetates usados como camas de invernadero. Se observó un aumento en la cantidad de glomalina ($p \leq 0.05$) de más del doble, respecto a los casos anteriores. En la clase X, que también correspondió a camas de invernadero pero con adición de composta de madera, las concentraciones de COS y glomalina fueron más del doble respecto a lo observado en la clase VIII. Lo anterior representó el máximo nivel de COS (3.9 %) y glomalina (2 mg g^{-1}) encontrado en los tepetates cultivados. Al respecto, West *et al.* (2005) mencionan que las enmiendas orgánicas en el suelo mejoran la actividad micelial de los HMA y la producción de glomalina, porque promueven la retención de agua en el suelo.

COS, the proliferation of AMF and consequently, the production of glomalin is partially limited by the absence of organic matter. This is confirmed by the significantly higher levels of COS, but not of glomalin in class V, in which organic fertilizers are supplied in higher proportion ($> 3 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) than in the previous classes ($< 1 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$).

In agronomic management class VI, with legumes, the average concentration of glomalin was 0.52 mg g^{-1} , significantly higher ($p > 0.05$) than that observed in class I. The incorporation of legumes, in tillage or in association with cereals, and the addition of manure, favors the yield of wheat, barley and corn (Báez *et al.*, 2007a; Navarro *et al.*, 2003). The cultivation of legumes has a relevant biological effect on the soil due to its capacity of association in double symbiosis with bacteria that fix N and AMF (Álvarez-Solís *et al.*, 2000). The above means a higher regular availability of N and P for the plants. The activity of the AMFs also favors the production of glomalin (González-Chávez *et al.*, 2004).

Management with perennial rainfall crops without soil tillage, class VII, showed an average concentration of COS and glomalin similar to ($p > 0.05$) what was reported in classes V and VI, where organic fertilizers were added regularly. The established crops, principally agapanthus (*Agapanthus africanus* L.), favor a regular supply of organic residues to the system and provide a permanent plant cover in the soil. This favors the conservation of moisture, biological activity and should increase the proliferation of AMF and the production of glomalin, as reported by Borie *et al.* (2006) and West *et al.* (2005). However, in the present work, they were not significantly higher than what was observed in class I.

Management classes VIII and IX showed an increase of glomalina higher than 30 % ($p \leq 0.05$) with respect to class VII. It was notable that the perennial crops with no tillage had a higher capacity to accumulate COS and produce glomalina, compared with the agricultural systems with conventional tillage (falling, harrowing, plowing and hilling). Conventional tillage permits the oxidation of C and its loss as CO_2 . With zero tillage the organic matter that remains on the soil surface reduces evaporation, temperature and exchange of gasses that intervene in its biological oxidation (Reicosky and Lindstrom, 1993). Under these conditions, the AMF, related

Al comparar las concentraciones de COS y de glomalina de la clase X con los suelos Faeozem sometidos a un manejo agronómico convencional (SFI) y usados como referencia, ya que los tepetates estrictamente no son suelos, se evidenció que los tepetates tienen potencial para acumular COS. Los resultados observados en este estudio muestran que a diferencia de las prácticas usadas en la agricultura convencional (monocultivos y labranza), las prácticas agronómicas conservacionistas (labranza cero, rotación de cultivos y uso de leguminosas) promueven una mayor producción de glomalina, lo cual coincide con lo reportado por Purin *et al.* (2006), Roldán *et al.* (2006), la cual se derivaría de la actividad fúngica en el suelo (Oehl *et al.* 2003; Kurle y Pflieger, 1994). Como resultado de ello se favorece la acumulación de materia orgánica del suelo (Six *et al.*, 2006).

La concentración de COS y glomalina del suelo de referencia (SFII), con cultivos perennes, sin labranza y con riego, fue semejante a lo observado en la clase X (camas de invernadero). Lo anterior destaca el potencial que tienen los tepetates para la acumulación de COS, que según el caso más alto, fue cerca de 4 % de COS y 2.2 mg g⁻¹ de glomalina. Lo anterior se logró con un manejo tendiente a conservar la materia orgánica (Báez *et al.*, 2002). Resulta relevante mencionar que los diferentes cultivos en el SFII corresponden a especies vegetales micorrízicas, las cuales son hospederas naturales de hongos micorrízico arbusculares, mismos que no fueron medidos en este experimento.

El COS se relacionó estrechamente con la glomalina y con el CG (R=0.91 y R=0.94). Rillig (2004) reporta resultados similares y sugiere la factibilidad de utilizar esta glicoproteína como un indicador del cambio de uso del suelo. West *et al.* (2005) también reportan una alta correlación entre COS y glomalina, y sugieren que el mayor almacén de C puede ser dependiente de los hongos micorrízico arbusculares.

Aporte de C de la glomalina al COS en los tepetates cultivados

En el presente trabajo, el C contenido en la glomalina (CG) representó una fracción mínima del COS (Figura 3), que estuvo en un intervalo de trazas en las clases de manejo I, II, III, IV, V y XI, hasta aproximadamente 15 % del COS en la clase de manejo X. Este porcentaje es similar al suelo de referencia II, donde se

with the glomalina, are also more abundant with zero tillage, because there is no rupturing of hyphae and these contribute mainly to the stability of the soil aggregates (Rillig *et al.*, 2002; Franzluebbers *et al.*, 2000) which participate in the physical protection of the labile C of the soil and with an effect on carbon sequestration (Six *et al.*, 2006).

The concentration of COS and glomalina was 1.5 % and 1.2 mg g⁻¹ in class VIII, which corresponded to tepetates used as greenhouse beds. An increase was observed in the amount of glomalina which was more than doubled, with respect to the previous cases. In class X, which also corresponded to greenhouse beds, but with the addition of wood compost, the concentrations of COS and glomalina were more than double with respect to what was observed in class VIII. The above represented the maximum level of COS (3.9 %) and glomalina (2 mg g⁻¹) found in the cultivated tepetates. To this respect, West *et al.* (2005) mention that the organic amendments in the soil improve the mycelia activity of the AMFs and glomalina production, because they improve water retention in the soil.

When comparing the concentrations of COS and of glomalina of class X with the Phaeozem soils subjected to conventional agronomic management (SFI) and used as reference, it was evidenced that the tepetates show potential for accumulating COS. The results observed in this study show that in contrast to the practices used in conventional agriculture (monoculture and soil tillage), the conservationist agronomic practices (zero tillage, crop rotation and use of legumes) promote a higher production of glomalina, which coincides with what was reported by Purin *et al.* (2006) and Roldán *et al.* (2006), which would derive from the fungicidal activity in the soil (Oehl *et al.*, 2003; Kurle and Pflieger, 1994). As a result, the accumulation of organic matter of the soil is favored (Six *et al.*, 2006).

The concentration of COS and glomalina of the reference soil (SFII), with perennial crops, without tillage and with irrigation, was similar to what was observed in class X (greenhouse beds). The above underlines the potential of the tepetates for the accumulation of COS, which according to the highest case, was close to 4 % of COS and 2.2 mg g⁻¹ of glomalina. The above was achieved with a management tending to conserve the organic matter (Báez *et al.*, 2002). It is relevant to mention that the

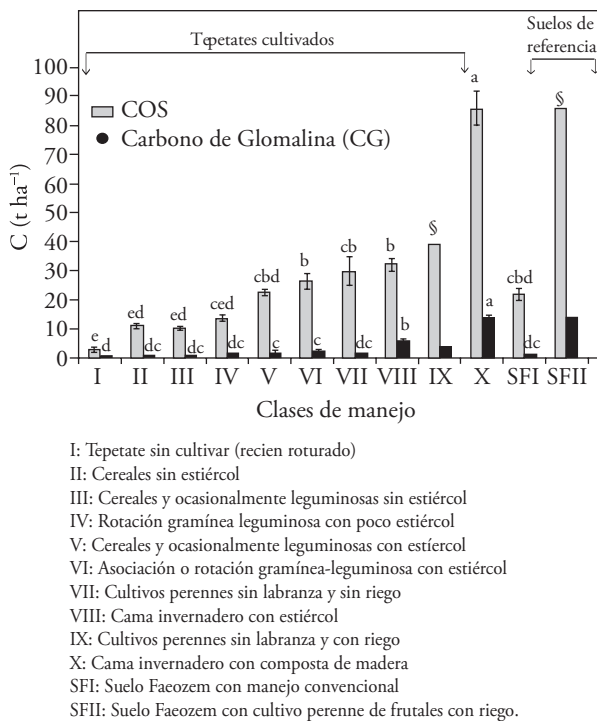


Figura 3. COS, C de la glomalina en 10 clases de manejo agronómico en tepetates y dos suelos de referencia. Valores con letras diferentes en cada línea son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$). (\$) $n=1$, no entra en el análisis estadístico.

Figure 3. COS, C of the glomalina in 10 classes of agronomic management in tepetates and two reference soils. Values with different letters in each line are statistically different ($p \leq 0.05$). (\$) $n=1$, does not enter in the statistical analysis.

observó la mayor concentración de este elemento. Según Weller (2002), la glomalina puede aportar hasta 27 % del COS al suelo. En el presente estudio, el aporte de glomalina al COS fue menor debido a que el tepetate no es un suelo sino un sustrato habilitado artificialmente para la producción agrícola y que carece de manera natural principalmente de COS, N y P (Etchevers *et al.*, 1992), elementos esenciales para la actividad biológica. Por tanto los tepetates en su estado natural contienen escasas poblaciones de microorganismos (Álvarez-Solís *et al.*, 2000). Además su estructura física carece de agregados. La evolución de sus características físico-químicas y la formación de agregados depende del manejo agronómico y el tiempo de cultivo (Báez *et al.*, 2007b). La humedad es otro factor que parece limitar la producción de glomalina en estos sistemas.

El potencial que tienen los tepetates para la acumulación de COS, según el caso más alto, fue

different crops in the SFII correspond to arbuscular mycorrhizal fungi, which were not measured in this experiment.

The COS was closely related to the glomalina and the GC ($r=0.91$ and $r=0.94$). Rillig (2004) reports similar results and suggests the feasibility of using this glycoprotein as an indicator of the change in soil use. West *et al.* (2005) also report a high correlation between COS and glomalina, and suggest that the higher store of C may be dependent on the arbuscular mycorrhizal fungi.

Contribution of C from the glomalina to the COS in cultivated tepetates

In the present study, the C contained in the glomalina (GC) represented a minimal fraction of the COS (Figure 3), which was in an interval of traces in management classes I, II, III, IV, V and XI, to approximately 15 % of the COS in management class X. This percentage is similar to the reference soil II, where the highest concentration of this element was observed. According to Weller (2002), glomalina can contribute up to 27 % of the COS to the soil. In the present study, the contribution of glomalina to the COS was lower due to the fact that tepetate is not a soil, but rather a substrate that is artificially ameliorated for agricultural production, and in its natural form is lacking mainly in COS, N and P (Etchevers *et al.*, 1992), elements that are essential for biological activity. Therefore, the tepetates in their natural state contain scant populations of microorganisms (Álvarez-Solís *et al.*, 2000). Furthermore, in that state their physical structure lacks aggregates. The evolution of their physio-chemical characteristics and the formation of aggregates depends on the agronomic management and the time of cultivation (Báez *et al.*, 2007b). Moisture is another factor that seems to limit the production of glomalina in these systems.

The potential of the tepetates for the accumulation of COS, according to the highest case, was approximately 90 t ha^{-1} , with an average contribution of 13.5 t ha^{-1} of C associated to glomalina, equivalent to 15 % of the COS. However, with lower concentrations of COS, the contribution of stabilized C from the activity of the AFs is lower than 10 %.

aproximadamente 90 t ha^{-1} con una aportación promedio de 13.5 t ha^{-1} de C asociado a la glomalina, equivalente a 15 % del COS. Sin embargo, con concentraciones menores de COS, el aporte del C estabilizado proveniente de la actividad de los HMA es menor de 10 %.

Acumulación del carbono de la glomalina(CG) y años de cultivo

La tasa de acumulación del CG en función de los años de cultivo en estos tepetates se muestra en la Figura 4, donde se presentan dos modalidades de manejo agronómico contrastantes: uno, en monocultivo de cereales con escaso ingreso de residuos orgánicos, y otro, en rotación de cultivos (gramínea-leguminosa) con constante incorporación de residuos orgánicos. Es evidente que en ambos casos se observó una tendencia de acumulación logarítmica, y el comportamiento fue semejante a la tasa de acumulación del COS descrita por Báez *et al.* (2002) para los tepetates cultivados. Es decir, después de una rápida acumulación de este elemento en los primeros años de cultivo, ésta decrece, alcanzando un equilibrio entre la acumulación y las pérdidas de carbono. Las primeras son función del manejo agronómico y del ingreso de residuos orgánicos al agrosistema, y las segundas, de la erosión hídrica y la mineralización química-biológica. Estas últimas corresponden principalmente a las emisiones de CO_2 (Báez *et al.*, 2009).

Accumulation of the carbon of the glomalin (GC) and years of cultivation

The accumulation rate of the GC as a function of years under cultivation in these tepetates is shown in Figure 4, which shows two contrasting modalities of agronomic management; one, in monoculture of cereals with scant input of organic residues, and the other, under crop rotation (grass-legume) with constant incorporation of organic residues. It is evident that in both cases a tendency of logarithmic accumulation was observed, and the behavior was similar to the accumulation rate of the COS described by Báez *et al.* (2002) for the cultivated tepetates. That is, after a rapid accumulation of this element in the first years of cultivation, it decreases, reaching equilibrium between the accumulation and losses of carbon. The former are a function of the agronomic management and the input of organic residues to the agro-system, and the latter, of water erosion and the chemical-biological mineralization. These correspond mainly to the emissions of CO_2 (Báez *et al.*, 2009).

The GC, fraction of stabilized C, represented in these management classes approximately one tenth of the total COS during the years under cultivation (Figure 4). The equilibrium reached shows that higher inputs of C would be required and lower losses to increase the levels of COS and GC. This partially explains why the accumulation of C in the tepetates

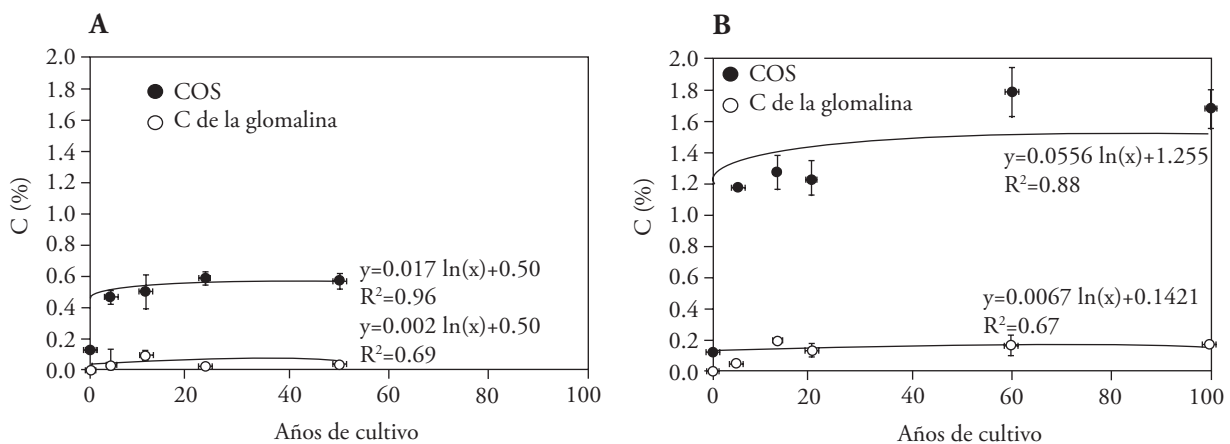


Figura 4. Relación entre la acumulación de COS y C de la glomalina con los años de cultivo en tepetates cultivados de la cuenca del río Texcoco. A) Monocultivo de cereales con escaso ingreso de residuos orgánicos; B) rotación de cultivos (gramínea-leguminosa) con constante incorporación de residuos orgánicos.

Figure 4. Relationship between the accumulation of COS and C of the glomalin with the years of cultivation in cultivated tepetates of the Texcoco River basin. A) Monoculture of cereals with scant intake of organic residues; B) crop rotation (grass-legume) with constant incorporation of organic residues.

El CG, fracción de C estabilizado representó en estas clases de manejo aproximadamente una décima parte del COS total durante los años de cultivo (Figura 4). El equilibrio alcanzado muestra que se requeriría mayores ingresos de C y menores pérdidas para aumentar los niveles de COS y CG. Esto explica en parte porque la acumulación de C en los tepetates es limitada aún después de décadas de cultivo. Para un mejoramiento sustancial de la estructura física de los tepetates, que está relacionada con la estabilidad de agregados, se requiere también un aumento significativo de C estabilizado.

CONCLUSIONES

La concentración de glomalina varió de trazas a 2 mg g⁻¹ en los tepetates cultivados y de 0.2 a 2.2 mg g⁻¹ en los suelos Faeozem, usados como referencia. Hubo una estrecha relación (R=0.91) entre la glomalina y CG con el COS. El potencial de acumulación de carbono estabilizado (CG) proveniente de la actividad de los HMA en los tepetates cultivados, fue semejante al acumulado en los suelos agrícolas de la misma región, con alrededor de 13.5 t ha⁻¹. De acuerdo con el máximo valor de COS determinado en los tepetates, éstos pueden almacenar más de 90 t ha⁻¹, en los primeros 20 cm de profundidad, con una aportación de 15 % del C por parte de la glomalina. La acumulación del CG durante los años de cultivo siguió una tendencia logarítmica, semejante a la observada en la acumulación del carbono orgánico.

AGRADECIMIENTOS

Al IRD (ex-ORSTOM), a INSTRUCT, al CONACYT y la Unión Europea (REVOLSO Proyecto ICA4-CT-2001-0052) por el financiamiento otorgado para iniciar esta investigación.

LITERATURA CITADA

- Álvarez-Solís, D., R. Ferrera-Cerrato, y J. D. Etchevers. 2000. Actividad microbiana en tepetates con incorporación de residuos orgánicos. *Agrociencia* 34:523-532.
- Báez, A., J. D. Etchevers, C. Hidalgo, C. Prat, V. Ordaz, y R. Núñez. 2002. C orgánico en tepetates cultivados de México. *Agrociencia* 36:643-653.
- Báez, A., J. D. Etchevers, C. Prat, A. Márquez, y E. Ascencio-Zapata. 2007a. Manejo agronómico de los suelos endurecidos (tepetates) del eje neovolcánico de México. *In: Gallardo-Lancho, J. (ed). La Captura de Carbono en Ecosistemas Terrestres Iberoamericanos. Sociedad Iberoamericana de Física y Química Ambiental. Salamanca, España, pp: 69-84.*

is limited even after decades of cultivation. For a substantial improvement of the physical structure of the tepetates, which is related to the stability of aggregates, a significant increase of stabilized C is also required.

CONCLUSIONS

The concentration of glomalin varied from traces to 2 mg g⁻¹ in the cultivated tepetates and from 0.2 to 2.2 mg g⁻¹ in the Phaeozem soils, used as reference. There was a close relationship (R=0.91) between the glomalin and the GC with the COS. The potential of accumulation of stabilized carbon (GC) from the activity of the AMFs in the cultivated tepetates was similar to what was accumulated in the agricultural soils of the same region, with approximately 13.5 t ha⁻¹. According to the maximum value of COS determined in the tepetates, they can store more than 90 t ha⁻¹ in the first 20 cm of depth, with a contribution of 15 % of the C from the glomalin. The accumulation of the GC during the years under cultivation followed a logarithmic tendency, similar to what was observed in the accumulation of organic carbon.

—End of the English version—

-----*-----

- Báez, A., J. D. Etchevers, C. Prat, and C. Hidalgo. 2007b. Formation of aggregates and carbon sequestration in ameliorated tepetates in the Río Texcoco basin, Mexico. *Rev. Mex. Ciencias Geol.* 24: 487-497.
- Báez, A., J.D. Etchevers, M. Haulon, G. Werner, G. Flores, y C. Hidalgo. 2009. Pérdida de carbono por erosión hídrica y emisiones de CO₂ en tepetates habilitados para la agricultura. *In: Gallardo, J.F., J. Campo y M.E. Conti (eds). Emisiones de Gases con Efecto Invernadero en Ecosistemas Iberoamericanos. Sociedad Iberoamericana de Física y Química Ambiental. Salamanca, España. pp: 25-48.*
- Bird, S.B., J.E. Herrick, M.M. Wander, and S.F. Wright. 2002. Spatial heterogeneity of aggregate stability and soil carbon in semi-arid rangeland. *Environ. Poll.* 116: 445-455.
- Borie, F., R. Rubio, J. L. Rouanet, A. Morales, G. Borie, and C. Rojas. 2006. Effects of tillage systems on soil characteristics, glomalin and mycorrhizal propagules in a Chilean Ultisol. *Soil Tillage Res.* 88: 253-261.
- Etchevers, J. D., R. M. López, C. Zebrowski, y D. Peña. 1992. Características químicas del tepetate de referencia de los estados de México y Tlaxcala, México. *Terra* 10 (Número especial): 171-177.
- Etchevers, J. D., C. Hidalgo, C. Prat, and P. Quantin. 2006. Tepetates of Mexico. *Encyclopedia of Soil Science.* Marcel Dekker, New York, USA. pp: 1745-1748.

- Franzluebbers, A. J., S. F. Wright, and J. A. Stuedemann. 2000. Soil aggregation and glomalin under pastures in the Southern Piedmont USA. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1018-1026.
- González-Chávez, M. C. A., M. C. Gutiérrez, y S. Wright. 2004. Hongos micorrízico arbusculares en la agregación del suelo y su estabilidad. *Terra Latin.* 22: 507-214.
- Hidalgo M., C., P. Quantin, y F. Elsass. 1997. Caracterización mineralógica de los tepetates tipo fragipán del Valle de México. *In: Zebrowski, C., P. Quantin, y G. Trujillo (eds). III Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos. ORSTOM. Quito, Ecuador. pp: 62-72.*
- Kurle, J. E., and F. L. Pfeleger. 1994. The effects of cultural practices and pesticides on VAM fungi. *In: Pfeleger F. L., and R. G. Linderman (eds). Mycorrhizae and Plant Health. Minnesota APS Press. pp: 101-132.*
- Navarro, H., A. Pérez, y D. Flores. 2003. Productividad de los tepetates con sistemas rotacionales. *Terra Latin.* 22:71-79.
- Oades, J. M. 1988. The retention of organic matter in soils. *Biogeochemistry* 5:35-70.
- Oehl, F., E. Sieverding, K. Ineichen, P. Mäder, T. Boller, and A. Wiemken, A. 2003. Impact of land use intensity on the species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in agroecosystems of Central Europe. *Appl. Environ. Microbiol.* 69: 2816-2824.
- Purin, S., O. F. Klauberg, and S. L. Stürmer. 2006. Mycorrhizae activity and diversity in conventional and organic apple orchards from Brazil. *Soil Biol. Biochem.* 38:1831-1839.
- Quantin, P., H. Arias, J. D. Etchevers, R. Ferrera-Cerrato, K. Olechko, H. Navarro, G. Werner, y C. Zebrowski. 1993. Tepetates de México: caracterización y habilitación para la agricultura: *Terra Latin.* 11:33-34.
- Reicosky, D., and M. Lindstrom. 1993. Effect of fall tillage on short term carbon dioxide flux from soil. *Agron. J.* 85:1237-1243.
- Rillig, M. C., S. F. Wright, K. A. Nichols, W. F. Schmidt, and M. S. Torn. 2001. Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils. *Plant Soil* 233: 167-177.
- Rillig, M. C., S. F. Wright, and V. T. Eviner. 2002. The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: comparing effects of five plant species. *Plant Soil* 238:325-333.
- Rillig, M. C., P. W. Ramsey, S. Morris, and E. A. Paul. 2003. Glomalin, an arbuscular-mycorrhizal fungal soil protein, responds to land-use change. *Plant Soil* 253:293-299.
- Rillig, M. C. 2004. Arbuscular mycorrhizae and terrestrial ecosystem processes. *Ecol. Lett.* 7:740-754.
- Roldán, A., J.R. Salinas-García, M. M. Alguacil, and F. Caravaca. 2006. Soil sustainability indicators following conservation tillage practices under subtropical maize and bean crops. *Soil Tillage Res.* 93:273-782.
- Ryan, M. G., and J. H. Graham. 2002. Is there a role for arbuscular mycorrhizal fungi in production agriculture? *Plant Soil* 244:263-271.
- SAS Institute. 1998. SAS/SAT User's Guide. Version 6.09. SAS Inst., Cary, NC. pp: 100-120.
- Six, J., S. D. Frey, R. K. Thiet, and K. M. Batten. 2006. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:555-569.
- Treseder, K. K., and K. M. Turner. 2007. Glomalin in ecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71:1257-1266.
- Weller, K. 2002. Glomalin: hiding place for a third the world's stored soil carbon. *Agric. Res. Magazine* 50: 4-7.
- West, S. B., T. C. Caesar-TonThat, S. F. Wright, and J. D. Williams. 2005. Organic matter addition, N, and residue burning effects on infiltration, biological, and physical properties of an intensively tilled silt-loam soil. *Soil Tillage Res.* 84: 154-167.
- Wright, S. F., and A. Upadhyaya. 1996. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Sci.* 198:97-107.
- Wright, S., and A. Upadhyaya. 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular micorrhizal fungi. *Plant and Soil* 198:97-107.
- Wright, S. F., and L. Jawson. 2001. A pressure cooker method to extract glomalin from soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1734-1735.
- Zebrowski, C. 1992. Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina. *Terra* 10 (Número especial): 15-23.