



COLEGIO DE POSTGRADUADOS
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA

FORMACIÓN DE AGREGADOS Y CAPTURA DE CARBONO
EN MATERIALES DE ORIGEN VOLCÁNICO DE MÉXICO

AURELIO BÁEZ PÉREZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2008

FORMACIÓN DE AGREGADOS Y CAPTURA DE CARBONO EN MATERIALES DE ORIGEN VOLCÁNICO DE MÉXICO

Aurelio Báez Pérez, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2008

El C orgánico del suelo (COS) desempeña un papel fundamental en la restauración de suelos deteriorados, entre éstos los tepetates (tobas volcánicas endurecidas, Tc) del Estado de México y Tlaxcala, y los acrisoles y andosoles degradados de la cuenca de Coatzacoahuacán, Michoacán. Se efectuaron cinco experimentos donde se evaluó la relación entre el COS y la estructuración del suelo (E1), el COS y la dinámica de la erosión y su mineralización (E2), la acumulación del COS a nivel de partículas elementales (E3), y finalmente la acumulación de COS y su relación con las proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (PSRG) (E4 y E5). Los resultados del E1 mostraron que en los agregados fue donde se acumuló mayormente el COS y que su formación y estabilidad fue función del tiempo de cultivo y de la adición de residuos orgánicos. En el E2 la pérdida de COS dependió de la intensidad de los escurrimientos y el tipo de manejo agronómico. La emisión de CO₂ aumentó con la humedad volumétrica y los años de cultivo y fue mayor en los sistemas agrícolas donde se adicionó composta. En el E3 se determinó que la energía aplicada a una suspensión de suelo para fraccionarlo en distintos tamaños de partícula dependió de la proporción de partículas elementales contenida en cada suelo y de la naturaleza de los minerales de arcilla. El COS en el Tc se acumuló mayormente en la fracción arcilla, pero en el acrisol fue en el limo, mientras que en el andosol lo hizo por igual en ambas partículas. En el E4 hubo una estrecha relación entre el COS, la PSRG y el C ligado a la PSRG (C-PSRG). El pirofosfato extrajo de dos a tres veces más PSRG y C-PSRG que el citrato. La mayor acumulación de COS en los Tc (0-20 cm de profundidad) se estimó en cerca de 90 t ha⁻¹, del cual, 30% lo aportó el C-PSRG cuando se extrajo con pirofosfato y 15% cuando éste se extrajo con citrato. En el E5 se concluyó que había diferencias significativas (P<0.05) en la acumulación de COS por la presencia de vermicomposta, por el tipo de suelo y el tipo de cultivo. La inoculación con el hongo micorrízico no presentó diferencias en la acumulación de carbono; sin embargo, como no se comprobó la colonización de éste en las diferentes plantas, la ausencia del efecto del hongo resultó incierta.

Palabras clave: Tepetate, suelos volcánicos endurecidos, acrisol, andosol, glomalina, erosión.

FORMATION OF AGGREGATES AND CARBON SEQUESTRATION IN VOLCANIC MATERIALS FROM MEXICO

Aurelio Báez Pérez, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2008

Soil organic carbon (SOC) performs a fundamental role in the restoration of deteriorated soils, like the tepetates (hardened volcanic tuff, Tc) in the State of Mexico and Tlaxcala, and acrisols and andosols in the basin of Cointzio, Michoacán. On that account five experiments were analyzed, an assessment was made of the relation between SOC and soil structure (E1), SOC and erosion dynamics and organic matter mineralization (E2), the accumulation of SOC at the level of elementary particles (E3), and finally the accumulation of SOC and its relation with soil proteins associated with glomaline (PSRG) (E4 and E5). E1 results showed that SOC accumulated mostly in aggregates and its formation and stability depended on the time of cultivation and the addition of organic residues. In E2 SOC loss depended on the intensity of runoffs and the type of agronomic management. CO₂ emission increased with volumetric moisture and time of cultivation and was higher in compost-added agricultural systems. In E3 the energy applied to a soil suspension for its fractioning in different particle sizes was found to depend on the proportion of elementary particles contained in each soil and the nature of clay minerals. Soil organic carbon in Tc was mostly accumulated in the clay fraction, but in acrisol it did so in silt, while in andosol it did it equally in both particles. In E4 a close relation between SOC, PSRG and C linked to PSRG (C-PSRG) was found. Pyrophosphate extracted two or three times more PSRG and C-PSRG than citrate. The highest accumulation of SOC in Tc (0-20 cm deep) was estimated to be about 90 t ha⁻¹, of which 30% was provided by C-PSRG when extracted with pyrophosphate and 15% with citrate. In E6 significant differences (P<0.05) were detected in the accumulation of SOC due to the presence of vermicompost, the type of soil and the type of crop. Inoculation with the micorrhizal fungus showed no differences in the accumulation of carbon; yet as the colonization of this fungus in the different plants was not proven, the absence of the fungus effect remains uncertain.

Key words: Tepetate, hardened volcanic soil, acrisol, andosol, erosion.

AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Postgraduados, por permitirme realizar mis estudios de postgrado y por la experiencia laboral adquirida en esta gran institución durante más de 13 años. Muchas gracias.

Al CONACYT y al pueblo de México, por la beca otorgada para la realización de mis estudios de postgrado y formación académica. Muchas gracias.

Al proyecto REVOLSO (Alternative Agriculture for a Sustainable Rehabilitation of Deteriorated Volcanic Soils in Mexico and Chile), European Contract n° ICA4-CT-2001-10052. Por el financiamiento otorgado para el desarrollo de mi investigación y su contribución a mi formación académica. Muchas gracias.

A todos mis profesores, por su empeño y sus enseñanzas vertidas en mi formación académica. Muchas gracias.

A la Dra. Claudia Hidalgo Moreno, por sus enseñanzas, consejos y orientación en la investigación realizada, pero más que nada por su amistad y calidad humana. Muchas gracias.

Al Dr. Jorge D. Etchevers Barra, por su orientación y enseñanzas durante mi formación académica en el Colegio de Postgraduados. Es para mí un ejemplo de disciplina, persistencia, tolerancia, diplomacia, audacia, sagacidad y dedicación al trabajo. Muchas gracias.

Al Dr. Christian Prat, por orientarme en el camino hacia la investigación científica, por su amistad y apoyo moral y en muchas ocasiones económico. Muchas gracias.

A la Dra. Carmen A. González Chávez, por su orientación y dirección en el desarrollo de mi investigación y por el intenso trabajo que realizó en la revisión de mi tesis. Es para mí un ejemplo de disciplina. Muchas gracias.

Al Dr. Carlos Monreal, por la excelente crítica y sugerencias realizadas a mi trabajo de investigación. Muchas gracias.

Al Dr. Francisco Matus, por su orientación y sugerencias realizadas a mi trabajo de investigación y por su amistad. Muchas gracias.

Al Dr. Gerd Werner, líder del Proyecto REVOLSO, por los recursos otorgados para el desarrollo de mi investigación y mi formación académica, pero más que nada por su amistad y calidad humana. Muchas gracias.

Al Dr. Juan F. Gallardo Lancho, por su amistad y las facilidades otorgadas para la publicación de los resultados de mi investigación en el IV Congreso Internacional de Física y Química Ambiental en Cáceres, España y la red Iberoamericana de Física y Química Ambiental. Muchas gracias.

Al Dr. Miguel Acosta Míreles y el Dr. Alejandro Alarcón, por su amistad y sugerencias para mejorar mi tesis. Muchas gracias.

A la Dra. Emma Zapata, por su amistad y valiosas enseñanzas en cuestiones de género. Muchas gracias.

A la Dra. Blanca Prado, por brindarme su amistad y apoyo económico, pero sobre todo por su sencillez y admirable labor altruista. Muchas gracias.

A la Dra. Celine Dwing y el Dr. Patrice Delmas, por su amistad y por su apoyo moral y económico en los momentos más difíciles. Muchas gracias.

Al Dr. Humberto Vaquera, por su amistad y por su orientación y sugerencias en los análisis estadísticos realizados en la presente investigación. Muchas gracias.

A mis profesores de inglés Alejandro y Christian, por disponibilidad en la enseñanza del idioma inglés. Muchas gracias.

A mi profesor de Ecología, Dr. Edmundo García Moya, por su amistad y valiosas enseñanzas. Muchas gracias.

A la M. C. Juliana Padilla Cuevas, por su amistad y apoyo moral, y por sus valiosas enseñanzas en la realización de análisis químicos de suelos. Muchas gracias.

A Mariela Hada Fuentes, por su amistad y compañerismo, pero sobre todo por su calidad humana. Muchas gracias.

A David Gómez, por sus buenos consejos y por su amistad. Muchas gracias.

A Andrea Chocobar, Sara Covalada, Blanca Margarita, Andrea Vera, Silvia Pajares, Mathiehu Ahulon, Gustavo Flores y Lenin Medina, compañeros estudiantes todos del proyecto REVOLSO. Gracias por su compañerismo y momentos compartidos. Muchas gracias.

A Magali Odi y Claudio Balbontin, por su amistad y compañerismo. Muchas gracias.

A María de Lourdes Morales y Mayra Venegas Torres, secretarias del Laboratorio de Fertilidad de Suelos del Colegio de Postgraduados. Por su amistad y la importante labor que desempeñan. Muchas gracias.

Al Dr. A. Enrique Becerril Román, por su disposición y orientación en las cuestiones administrativas. Muchas gracias.

A la Lic. Carmen Padilla Pastrana, por su amistad y orientación durante los trámites de titulación. Muchas gracias.

Al Dr. Manuel Arreola Tostado y al Dr. Bernard Triomphe, por su amistad y orientación para comenzar los estudios de postgrado. Muchas gracias.

Al M.C. Rafael Trigueros Cazares, Ing. Héctor Aguilar Ponce e Ing. Héctor Balderas, del Instituto Tecnológico de Roque, Gto., por su confianza y el apoyo laboral otorgado en la etapa final de mis estudios de postgrado. Muchas gracias

Al M.C. Guadalupe Villegas y al Ing. Lorenzo Licea, por su amistad, confianza y apoyo otorgado en la etapa final de mis estudios de postgrado. Muchas gracias.

DEDICATORIAS

Al creador por permitirme alcanzar esta meta.

A mis Padres: Isabel Pérez Ramírez y Pedro Báez Velásquez, quienes fomentaron en mí el estudio y con muchos sacrificios nos proporcionaron una educación a mis hermanos y a mí.

A mis hermanos y hermanas: Irma, Germán Bernardo, Isabel, Carlos Alfonso, Natalia, Pedro, José Luis y Mario, por su apoyo moral y en muchas ocasiones económico.

A mi querida esposa Rocío Canchola Bautista, por su amor, comprensión y apoyo incondicional durante la realización de mis estudios de postgrados.

A mis hijos: Aurelio, Ángela Edith, Sara Isabel y Rocío, todo mi esfuerzo para ellos.

A mis abuelos: Aurelio Leónides Báez Elizalde (q.p.d.) y Genaro Pérez (q.p.d.) que fomentaron mi interés en el campo.

A mis abuelas Zenaida Ramírez y Graciana Velázquez (q.p.d.) por su cariño y comprensión.

A mis suegros: Ángela Bautista Garibay y Alberto Canchola por su apoyo moral y calidad humana.

A mis cuñados: Silvia, Alberto, Ángel, Francisco (q.p.d.), Sergio, Pablo, Lourdes y Celia por su apoyo moral.

A mi tía Severa (q.p.d.) y Leonila Báez Velázquez, por su cariño y apoyo moral.

A mis tías Ricarda Báez Palacios e Isidra Pérez Ramírez, por su apoyo moral y su amistad entrañable.

A mi prima Dulce María, por su amistad y buen humor.

A mis primos: Beatriz, Francisca, María de la Luz, Ezequiel y Tomas Cortés Báez, por su apoyo moral.

A mi tío Tomas Báez, por sus consejos y amistad

A mis tíos Ignacio, Patricio y Silvino Vázquez Ramírez, por su apoyo moral y amistad entrañable.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	2
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
2.1. Degradación de los suelos y emisión de CO ₂	5
2.2. Los suelos volcánicos.....	6
2.3. Los tepetates y su importancia económica y ambiental.....	7
2.3.1. Incorporación de los tepetates a la agricultura.....	8
2.3.2. El carbono orgánico en los tepetates.....	10
2.4. Agregación de las partículas del suelo.....	11
2.4.1. Agregación en los tepetates.....	12
2.5. Secuestro de carbono.....	13
2.6. Oxidación de carbono orgánico del suelo.....	14
2.7. Carbono orgánico y arcillas del suelo.....	15
2.8. La glomalina.....	16
2.8.1. Limitantes y controversias en la determinación de la PSRG.....	17
2.8.2. Utilización de diferentes extractantes.....	19
2.8.3. Ventajas y limitantes de los hongos micorrízico arbusculares (HMA).....	19
2.8.4. Implicación de la glomalina en el ciclo del C.....	20
3. LITERATURA CITADA.....	21
CAPITULO I. FORMACIÓN DE AGREGADOS Y SECUESTRO DE CARBONO EN TEPETATES CULTIVADOS DE LA CUENCA DEL RÍO TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO	30
RESUMEN.....	30
1.1. INTRODUCCIÓN.....	31
1.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	33
1.2.1. Sitio de estudio.....	33
1.2.2. Muestro.....	33
1.2.3. Evaluación de agregados y fragmentos.....	35
1.2.4. Análisis de datos.....	35

1.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
1.3.1. Estabilidad de los fragmentos y agregados	35
1.3.2. Porcentaje de C y su distribución por tamaño partícula.....	37
1.3.3. Acumulación de carbono en fragmentos y agregados	38
1.3.4. Dureza de fragmentos y agregados	39
1.3.5. Clases de manejo agronómico y carbono orgánico.....	42
1.3.6. Producción de agregados y tiempo de cultivo	44
1.4. CONCLUSIONES.....	46
1.5. LITERATURA CITADA	46
CAPITULO II. CARBONO ASOCIADO CON LA EROSIÓN HÍDRICA Y LAS EMISIONES DE CO₂ EN TEPETATES (SUELOS VOLCÁNICOS ENDURECIDOS) HABILITADOS PARA LA AGRICULTURA EN TLAXCALA, MÉXICO.....	50
RESUMEN.....	50
2.1. INTRODUCCIÓN.....	51
2.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	52
2.2.1. Sitio de estudio.....	52
2.2.2. Características de los lotes experimentales.....	53
2.2.3. Monitoreo de la emisión de CO ₂	54
2.2.4. Monitoreo de la humedad volumétrica y calibración del TDR.....	54
2.2.5. Monitoreo de la erosión y escurrimiento.....	55
2.2.6. Monitoreo de pérdida de COS por efecto de la erosión hídrica.....	55
2.2.7. Análisis de los datos.....	56
2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	56
2.3.1. Distribución de las lluvias y temperatura.....	56
2.3.2. Calibración del TDR.....	57
2.3.3. Emisión de CO ₂	58
2.3.4. Pérdida de C por efecto de erosión hídrica.....	61
2.4. CONCLUSIONES.....	65
2.5.LITERATURA CITADA.....	66
CAPITULO III. FRACCIONAMIENTO FÍSICO DE TRES SUELOS VOLCÁNICOS DE MÉXICO Y SU RELACIÓN CON EL CARBONO.....	69

RESUMEN.....	69
3.1. INTRODUCCIÓN.....	70
3.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	72
3.2.1. Sitios de estudio.....	72
3.2.2. Muestreo de suelos.....	72
3.2.3. Fraccionamiento de los suelos.....	73
3.2.4. Análisis estadístico.....	74
3.3. Resultados y discusión.....	74
3.3.1. Fraccionamiento físico.....	74
3.3.2. El carbono orgánico asociado a las fracciones.....	78
3.4. CONCLUSIONES.....	83
3.5. LITERATURA CITADA.....	84
CAPITULO IV. PROTEÍNAS DEL SUELO RELACIONADAS CON LA GLOMALINA (PSRG) Y EL SECUESTRO DE CARBONO EN TEPETATES CULTIVADOS.....	86
RESUMEN.....	86
4.1. INTRODUCCIÓN.....	87
4.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	89
4.2.1. Sitio de estudio.....	89
4.2.2. Extracción de la PSRG.....	91
4.2.3. Análisis estadístico.....	91
4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	91
4.3.1. Cuantificación de PSRG con pirofosfato de sodio y con citrato de sodio.....	91
4.3.2. COS, PSRG y C-PSRG en los tepetates cultivados.....	94
4.3.3. Contribución del C-PSRG al COS en los tepetates.....	98
4.3.4. COS, C-PSRG y tiempo de cultivo.....	99
4.4. CONCLUSIONES.....	101
4.5. LITERATURA CITADA.....	102
CAPITULO V. LOS EFECTOS DE LA INOCULACIÓN CON HMA, TIPO DE CULTIVO Y ABONO SOBRE LA ACUMULACIÓN DEL CARBONO Y PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA EN TEPETATES.....	107

RESUMEN.....	107
5.1. INTRODUCCIÓN.....	108
5.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	109
5.2.1. Sitios de estudio.....	109
5.2.2. Recolección de los suelos.....	111
5.2.3. El experimento.....	111
5.2.4. Los tratamientos.....	112
5.2.5. Evaluaciones de C orgánico.....	112
5.2.6. Evaluaciones de materia seca.....	113
5.2.7. Diseño experimental.....	113
5.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	114
5.3.1. Características físico-químicas de los sustratos volcánicos.....	114
5.3.2. Acumulación de carbono.....	114
5.3.3. Producción de materia seca.....	116
5.4. CONCLUSIONES.....	117
5.5. LITERATURA CITADA.....	118
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.....	121
RESUMEN GENERAL.....	124
APÉNDICES.....	129

ÍNDICE DE CUADROS

CAPITULO I

Cuadro 1.1.	Clases de sistemas de manejo de las parcelas experimentales evaluadas en la cuenca del río Texcoco.....	34
-------------	---	----

CAPITULO II

Cuadro 2.1.	Parcelas experimentales de tepetate cultivado en el ejido de Santiago de Tlalpan, Tlaxcala.....	54
Cuadro 2.2.	Erosión y pérdida de C en parcelas experimentales de Tlalpan, Tlaxcala.....	62

CAPITULO III

Cuadro 3.1.	Recuperación de masa del fraccionamiento de los suelos volcánicos evaluados (promedio tres repeticiones).....	75
Cuadro 3.2.	Fraccionamiento de tres suelos del Eje Neovolcánico Transversal (ENT), México, mediante dos métodos (promedio de tres repeticiones).....	78
Cuadro 3.3.	C orgánico asociado a las fracciones >250 μm y <250 μm en los suelos evaluados (promedio de tres repeticiones).....	79

CAPITULO IV

Cuadro 4.1.	Clases de manejo agronómico en las que se agruparon las parcelas evaluadas de las comunidades de la cuenca del río Texcoco, Estado de México.....	90
-------------	---	----

CAPITULO V

Cuadro 5.1.	Combinación de tratamientos del experimento factorial 2^4	113
Cuadro 5.2.	Características físico-químicas de los sustratos volcánicos.....	114
Cuadro 5.3.	Evaluaciones de C orgánico en cuatro muestreos en los tratamientos evaluados	115
Cuadro 5.4.	Producción de materia seca de cinco cortes en los tratamientos evaluados.....	116

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO I

Figura 1.1.	Estabilidad de agregados en húmedo y estabilidad de agregados en seco en tepetates cultivados de la cuenca del río Texcoco. Barras de error indican la desviación estándar.....	36
Figura 1.2.	Carbono orgánico y diámetro medio de partícula en distintos sistemas agrícolas en tepetates cultivados.....	37
Figura 1.3.	Acumulación de C total en fragmentos y agregados en seis tamaños diferentes de partícula.....	39
Figura 1.4.	Relación entre dureza y diámetro medio ponderado en nueve sistemas específicos de manejo agronómico y tiempo de cultivo.....	40
Figura 1.5.	Relación entre dureza de los agregados y fragmentos y la concentración de carbono orgánico en tepetates cultivados con diverso manejo agronómico y tiempo de cultivo.....	41
Figura 1.6.	Contenido de carbono orgánico en tepetates cultivados según el manejo agronómico.....	43
Figura 1.7.	Contenido de carbono orgánico en tepetates cultivados en fragmentos y agregados según el manejo agronómico.....	43
Figura 1.8.	Evolución de agregados (a) y fragmentos (b) mayores de 3.36 mm a través del tiempo en tepetates cultivados.....	45

CAPITULO II

Figura 2.1.	Localización de la zona de estudio (Quantin <i>et al.</i> , 1993).....	53
Figura 2.2.	Distribución de la precipitación pluvial y temperatura en las parcelas experimentales de tepetate cultivado en Tlalpan, Tlaxcala.....	57
Figura 2.3.	Relación entre la humedad volumétrica medida por el cilindro y mediante un TDR.....	58
Figura 2.4.	Resultados de la tasa de emisión de CO ₂ (TEC) en 2004 y 2005 en tepetates cultivados de Tlalpan, Tlaxcala. TE: tepetate expuesto, Tr: tradicional, TM: tradicional mejorado, Or: orgánico. RT: recién roturado con manejo tradicional, TO: recién roturado con manejo orgánico, Mn: matorral natural,	

	Pn: pastizal natural.....	59
Figura 2.5.	Concentración de C en los sustratos evaluados en Tlalpan, Tlaxcala. TE: tepetate expuesto, Tr: tradicional, TM: tradicional mejorado, Or: orgánico. RT: recién roturado con manejo tradicional, TO: recién roturado con manejo orgánico, Mn: matorral natural, Pn: pastizal natural.....	60
Figura 2.6.	Relación entre la tasa de emisión de CO ₂ y la humedad volumétrica en los tepetates evaluados de Tlalpan, Tlaxcala.....	61
Figura 2.7.	Erosión en parcelas experimentales de tepetate cultivado en Tlalpan, Tlaxcala. (a): Relación entre pérdida de sedimento y pérdida de COS. (b): Relación entre volumen de escurrimiento y pérdida de COS.....	63
Figura 2.8.	Pérdida total de sedimentos (masa de sedimentos arrastrados + sedimentos en suspensión) y COS por efecto de la erosión hídrica en parcelas experimentales de Tlalpan, Tlaxcala.....	63
Figura 2.9.	Distribución del COS en sedimentos, sedimentos en suspensión y el agua de escurrimiento en parcelas experimentales de Tlalpan, Tlaxcala.....	64

CAPITULO III

Figura 3.1.	Localización de los suelos colectados en el eje neovolcánico de México. (a) Tlalpan, Tlaxcala y (b) Cuenca de Cointzio, Michoacán.....	73
Figura 3.2.	Fraccionamiento de microagregados (<250 μm) de tres suelos del eje neovolcánico de México bajo dos manejos agronómicos distintos (promedio de tres repeticiones). Letras semejantes son estadísticamente iguales en la aplicación de energía para cada fracción (p≤0.05).	77
Figura 3.3.	C orgánico en arena fina, limo y arcilla de tres suelos del eje neovolcánico de México bajo dos manejos agronómicos distintos (promedio de tres repeticiones). Letras semejantes son estadísticamente iguales en la aplicación de energía para cada fracción (p≤0.05).	80
Figura 3.4.	Balance de C orgánico en tres suelos del eje neovolcánico de México bajo dos manejos agronómicos distintos (promedio de tres repeticiones). Letras semejantes son estadísticamente iguales en la aplicación de energía para cada fracción (p≤0.05).....	82

CAPITULO IV

Figura 4.1.	Zona de estudio y comunidades de la cuenca del río Texcoco, Estado de México	89
Figura 4.2.	Relación entre la concentración de PSRG (a) y C-PSRG (b) obtenidas mediante dos extractantes: pirofosfato de sodio y citrato de sodio, en tepetates cultivados y suelos de referencia de la cuenca del río Texcoco.....	92
Figura 4.3.	PSRG, C-PSRG obtenidos mediante dos extractantes: pirofosfato de sodio y citrato de sodio, y su relación con el COS en tepetates cultivados y suelos de referencias de este estudio. a) Relación COS y PSRG; b) Relación entre COS y C-PSRG; c) Relación entre PSRG y C-PSRG.....	94
Figura 4.4.	Clases de manejo agronómico de los tepetates cultivados y suelos de referencia, y su concentración media de COS y PSRG (citrato y pirofosfato). Valores con letras diferentes en cada línea son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$). (§) $n=1$, no entra en el análisis estadístico.....	95
Figura 4.5.	COS, C-PSRG (citrato y pirofosfato) en 12 clases de manejo agronómico en tepetates y 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.....	98
Figura 4.6.	Acumulación del COS y C-PSRG según el tipo de manejo y los años de cultivo desde que fueron habilitados para la producción agrícola.....	100

CAPITULO V

Figura 5.1.	Sitios de estudio (a) Cuenca del río, Texcoco y (b) Cuenca de Coitzio, Michoacán.....	110
Figura 5.2.	(a) Inoculo del HMA BEG-25. (b) Conteo de esporas. (c) Inoculación de las macetas.....	112
Figura 5.3.	Producción de materia seca total del experimento factorial 2^4 . Letras semejantes son estadísticamente iguales ($p \leq 0.05$).....	117

ÍNDICE DE APÉNDICES

Apéndice 1.	Erosión hídrica y pérdida de C durante 2004 y 2005 en parcelas experimentales de tepetate cultivado en Tlalpan, Tlaxcala.....	129
Apéndice 2.	Relación entre sedimentos, sedimentos en suspensión, agua de escurrimiento y C asociado a éstos en parcelas experimentales de tepetate cultivado en Tlalpan, Tlaxcala.....	133
Apéndice 3.	Fraccionamiento físico de un tepetate t2 colectado en Tlalpan, Tlaxcala.....	134
Apéndice 4.	Fraccionamiento físico de un andosol cultivado colectado en la microcuenca de Coinzio, Michoacán.....	135
Apéndice 5.	Fraccionamiento físico de acrisol colectado en la microcuenca de Coinzio, Michoacán.....	136
Apéndice 6.	Corte transversal del sustrato tepetate correspondiente al tratamiento testigo sin inoculación del HMA <i>Glomus mosseae</i> y sin adición de vermicomposta.....	137
Apéndice 7.	Corte transversal del sustrato tepetate correspondiente al tratamiento con inoculación del HMA <i>Glomus mosseae</i> y con adición de vermicomposta.....	137
Apéndice 8.	Producción de agregados mayores de 4.76 mm en el tepetate después de concluir el experimento en invernadero.....	138

INTRODUCCIÓN GENERAL

El estudio del C en el suelo es un tema que requiere especial atención en el marco la investigación científica que se realiza sobre cambio climático global, porque éste es uno de los componentes principales del ciclo del carbono (Stevenson y Cole, 1999). El suelo es un emisor de CO₂ a la atmósfera, el gas de efecto invernadero que contribuye mayormente a este fenómeno, pero al mismo tiempo constituye uno de los principales reservorios de C en el mundo (Badjes, 1996). Éste sostiene la vegetación, la cuál, captura el C atmosférico mediante la fotosíntesis y recicla constantemente la materia orgánica residual que producen las plantas. Swift (2001) señaló que la reserva de C en los suelos del mundo es más del doble que las que se encuentran en la atmósfera y la vegetación, mientras Lal (2004) indicó que esta reserva es 3.3 veces mayor que la reserva atmosférica y 4.5 veces mayor que el que está contenido en los seres vivos. El C en los suelos es fijado o secuestrado en forma orgánica (humus) e inorgánica (carbonatos de calcio). La reserva global de C en el suelo se estima en 2500 Gt, de la cual, 62% corresponde al primero y 38% al segundo (Lal 2004). La dinámica del carbono orgánico del suelo (COS) a través del perfil, depende de las condiciones climáticas, la vegetación, el relieve y el grado de perturbación de los suelos (deforestación, erosión, prácticas agrícolas) (Lal *et al.*, 1998). La presión que las actividades humanas han ejercido sobre este recurso natural (deforestación, agricultura, ganadería, etc.), ha ocasionado un desequilibrio en el flujo de este elemento en el suelo, al aumentar la emisión de CO₂ a la atmósfera y disminuir de las reserva de C del mismo. Lal (1997) mencionó que el cambio de uso de suelo y las actividades agrícolas han aportado 50% de las emisiones de CO₂ que son producidas por la actividad humana. Se estima que la destrucción de la cobertura vegetal, lo cual implica necesariamente un cambio en el uso del suelo, aportó 63% de las emisiones de CO₂ a la atmósfera emitidas por los países llamados “en desarrollo” en los últimos 50 años, según datos reportados por la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático en México (2006). Entre los ecosistemas terrestres más sensibles al cambio de uso de suelo, se encuentran aquéllos que se ubican en laderas. Los suelos en esta situación son más susceptibles a la erosión hídrica cuando son deforestados y expuestos a las lluvias. Miles de hectáreas en México y Latinoamérica han sido afectadas por esta situación, transformándolas en paisajes yermos y estériles (Zebrowski, 1992). En el eje neovolcánico transversal, la pérdida de suelo ocasiona el afloramiento de un material volcánico que se conoce localmente como “tepetate”. El vocablo deriva de la lengua náhuatl: “*tel*”=piedra y “*petlalt*”=petate o lecho, y literalmente quiere decir

lecho endurecido (Simeón, 1885). El término alude a capas duras y compactas que fueron expuestas después de que se erosionó el suelo que las cubría. Tepetate se define científicamente como toba volcánica endurecida por procesos geológicos y pedológicos (Etchevers *et al.*, 2006; Miehlich, 1992). Éste es improductivo y no puede sostener vegetación. Sin embargo, es posible transformarlo artificialmente en suelo, aunque el costo económico y energético es alto (Báez, 2007). Se reconocen dos tipos de tepetate de acuerdo a su grado de dureza: fragipán y duripán (Zebrowski, 1992). El primero es duro cuando seco, pero se reblandece cuando húmedo y el segundo es duro tanto en estado seco, como húmedo. El tepetate tipo fragipán es más susceptible de habilitarlo para la producción agrícola o forestal. La marginación que impera en la región, que es la más poblada del país, demanda tierras de cultivo y pone de manifiesto la urgente necesidad de habilitar los tepetates para fines agrícolas y satisfacer en parte la demanda local de alimento.

Otros tipos de suelos degradados del eje neovolcánico transversal por la pérdida del horizonte A o el cambio de uso de suelo, se encuentran en la cuenca de Cointzio, Michoacán: los acrisoles y los andosoles. El primero cubre 223 km² y representa 33% de su superficie (Medina-Orozco, 2006), mientras que en el país éstos cubren cerca de 10 000 km² (INEGI, 2004). Los acrisoles presentan pH ácido, alta proporción de arcilla, óxidos de hierro y baja saturación en bases. El término acrisol proviene del latín "*acris*" que significa muy ácido. Esta característica química ocasiona restricciones para la nutrición de los cultivos por la baja disponibilidad P y algunos micronutrientes. Estos suelos son poco productivos, salvo para especies tolerantes a la acidez. Los andosoles en la misma cuenca cubren cerca de 237 km². Éstos son constantemente deforestados para utilizarlos con fines agrícolas. El cambio de uso de suelo provoca también un cambio drástico en sus propiedades físico-químicas. Medina-Orozco (2006) mencionó que en la cuenca de Cointzio los agricultores practican un sistema tradicional de agricultura que denominan "año y vez", que consiste en cultivar las parcelas durante un año y usarlas como agostadero durante dos o tres años. Los rendimientos de maíz bajo este sistema fluctúan de 1 a 2.5 Mg ha⁻¹.

El C en el suelo incide en sus propiedades físicas, químicas y biológicas e influye en su productividad Lal (2004). El grado de acumulación de este elemento determina la calidad del mismo. El autor menciona que por cada tonelada de COS que se almacena en un suelo

degradado, éste puede aumentar el rendimiento de trigo de 20 a 40 kg ha⁻¹ y de 10 a 20 kg ha⁻¹ de maíz.

Los tepetates y algunos suelos deteriorados constituyen una reserva potencial para futuras áreas de cultivo, particularmente, en aquellos lugares donde las tierras de labor son insuficientes por la alta densidad poblacional. Esta es la situación de los piedemonte del eje neovolcánico transversal. La habilitación de los tepetates para las actividades agrícolas, pecuarias y forestales, brinda la oportunidad de utilizar estos sustratos como almacenes de C atmosférico. Es dentro de esta última vertiente donde se ubica el presente trabajo.

La acumulación y emisión de COS está regido por diversos factores que interaccionan intrínsecamente entre sí. El clima, el relieve, la vegetación, el material parental, las propiedades químicas, físicas y microbiológicas, el grado de perturbación del suelo o el manejo agronómico del mismo, determinan el grado de acumulación y emisión de este elemento (Lal, 2004). Es necesario realizar investigación que conlleve a generar tecnología para acumular COS en los suelos que han sido degradados.

La presente investigación tuvo como tema central estudiar el COS en los tepetates habilitados para la producción agrícola y en los suelos volcánicos deteriorados arriba mencionados, para generar conocimiento que permita entender los mecanismos de acumulación de este elemento y su interacción con los agentes físicos, químicos y biológicos que influyen en la fertilidad de los suelos. Este propósito responde a las expectativas del proyecto: “Alternative Agriculture for a Sustainable Rehabilitation of Deteriorated Volcanic Soils in Mexico and Chile” (REVOLSO European Contract n° ICA4-CT-2001-10052). Se abordan temas específicos sobre aspectos de microbiología, de la dinámica de la erosión y mineralización y el fraccionamiento físico, orientados a generar conocimiento básico sobre la dinámica del COS y a hurgar en algunos mecanismos específicos sobre la captura de carbono en los tepetates, acrisoles y andosoles.

1. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Se exponen cinco objetivos particulares y cinco hipótesis con el propósito de estudiar la acumulación del COS en tepetates cultivados del Estado de México y Tlaxcala, y en acrisoles y andosoles de la cuenca de Coinzio, Michoacán. Sitios ubicados dentro del eje neovolcánico transversal. Cada objetivo e hipótesis respondió a un experimento diferente. El primero fue evaluar en tepetates cultivados en condiciones de campo, la formación de agregados su estabilidad y la acumulación de COS en agregados y fragmentos en función de su tamaño. Se planteó la siguiente hipótesis: la formación y estabilidad de agregados es función de la acumulación de COS. Este trabajo consistió en analizar el conocimiento adquirido previamente sobre el tema del COS en tepetates cultivados y su influencia en estructura física del sustrato. El segundo experimento tuvo por objetivo evaluar durante dos años, en parcelas experimentales de tepetate cultivado, la pérdida de COS por efecto de la erosión hídrica y la mineralización. Se postuló la siguiente hipótesis: la mayor pérdida de COS ocurriría en los tratamientos con manejo tradicional (como lo hace comúnmente el agricultor). El tercer experimento fue evaluar la energía de sonicación y la acumulación del COS en tepetates, acrisoles y andosoles en fracciones $>250 \mu\text{m}$ y $<250 \mu\text{m}$. Se planteó la siguiente hipótesis: la acumulación de COS en los suelos evaluados es función de la proporción de arcilla presente en los mismos. El cuarto objetivo fue evaluar la concentración de proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (PSRG), el C ligado las PSRG y a su contribución al COS. La glomalina se define como una glicoproteína producida por la actividad natural de los HMA e influye positivamente en la acumulación de carbono y la estabilidad de agregados del suelo (Wright y Upadhyaya, 1996). Para este experimento se planteó la siguiente hipótesis: la concentración de COS, PSRG y C-PSRG en tepetates cultivados, son función de la frecuente incorporaron de abonos orgánicos y del tiempo de cultivo. El quinto y último objetivo fue evaluar la acumulación de COS y la producción de biomasa aérea en condiciones de invernadero. Se abordaron simultáneamente cuatro factores de estudio: (a) inoculación de HMA, (b) distintos tipos de sustratos, (c) distintos tipos de cultivo y (c) la adición de abonos orgánicos. Se planteó la siguiente hipótesis: la acumulación de COS es función de HMA *Glomus mosseae* BEG-25 y la adición de vermicomposta.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Degradación del suelo y emisión de CO₂

La degradación del suelo es uno de problemas ambientales que requiere prioritaria atención porque amenaza a la agricultura, la biodiversidad, la ecología y la seguridad alimentaria (Stocking, 2003). La dimensión de las tierras degradadas en el mundo crece de manera alarmante cada año. Pimentel (1993) señaló que 80% de los suelos del mundo presenta algún grado de degradación. La SEMARNAT (2002) reportó que la degradación de los suelos por la acción del hombre en la República Mexicana es de 45.1%, de la cual, más de 18% se debe a problemas químicos (salinidad), más de 11% a problemas de erosión hídrica, cerca de 10% por erosión eólica y 6% por degradación física. La institución señaló que las principales causas son: las actividades agrícolas, el sobrepastoreo, la deforestación, la urbanización y las actividades industriales. En suelos de ladera, el problema de degradación es ocasionado por la erosión hídrica, después que la vegetación original es removida. Se ha calculado que más de 40 millones de hectáreas en esta situación han sido totalmente erosionadas en el país, quedando al descubierto horizontes cementados o endurecidos conocidos localmente como tepetates (Trueba, 1995).

La erosión del suelo reduce la producción de biomasa y el rendimiento de los cultivos (Stocking, 2003) porque afecta su estructura física. Ésta provoca la ruptura de los macro y microagregados y la dispersión de las partículas del suelo, exponiendo la materia orgánica, que estaba protegida, a los procesos microbianos y al arrastre de sedimentos (Ghadiri y Rose, 1991). Los cambios en la humedad del suelo y la temperatura también provocan un aumento en la tasa de descomposición de la materia orgánica. En los suelos erosionados la radiación solar tiene mayor incidencia, lo cual, influye en la temperatura, un factor importante para el control de emisión de CO₂ de los suelos (Mielnick y Dugas, 2000).

Los sedimentos arrastrados por la erosión son comúnmente enriquecidos con COS de baja densidad y su concentración puede ser de 5 a 32 veces mayor que el promedio global. La mayoría de los sedimentos transportados contienen la fracción lábil del COS, la cuál, es fácilmente mineralizable (Sterk *et al.*, 1996). Debido a lo anterior la erosión del suelo es una fuente neta de CO₂ para la atmósfera y de otros gases.

2.2. Los suelos volcánicos

Los suelos volcánicos presentan características muy peculiares debido a la abundancia de minerales primarios muy fragmentados, como el vidrio volcánico y materiales amorfos. Las propiedades físicas y químicas de estos suelos, están fuertemente influenciadas por la forma en que se depositaron las cenizas, por su composición mineralógica, por el grado de intemperización de la misma y por el tiempo entre depósitos de capas sucesivas (Ishizuka y Black, 1977). Según la edad de los depósitos de ceniza y de las condiciones medioambientales, los suelos originados a partir de éstos, pueden tener un grado de desarrollo inmaduro o maduro. Las deposiciones de la ceniza volcánica puede acontecer por caída (tipo lluvia), o bien, por flujo (nubes ardientes). En el primer caso los fragmentos piroclásticos más grandes caen cerca del volcán, mientras que las partículas más finas son arrastradas por el viento y caen a mayor distancia, cubriendo grandes superficies con un manto de material cuyo espesor varía de milímetros hasta metros. En el segundo caso los flujos piroclásticos se transportan en forma de masas nubosas incandescentes de gas, ceniza y fragmentos de roca y piedra pómez que se desplazan ladera abajo a grandes velocidades siguiendo la topografía del terreno (Shoji *et al.*, 1993).

En el primer caso se encuentran los leptosoles o suelos poco desarrollados que cubren 24% de la superficie del país (FAO-UNESCO-ISRIC, 1998). En el segundo caso se encuentran los andosoles que tienen una alta fertilidad, son ricos en materia orgánica, con alta porosidad, baja densidad aparente, alta capacidad de retención de humedad, alta estabilidad de agregados e intensa actividad biológica. Estos cubren 1.2% de la superficie del país.

La naturaleza estratigráfica de las diferentes capas sucesivas de ceniza volcánica en un perfil, está influenciada por el tipo de depósito, el tipo de mineral por el cual está compuesto y el grado de intemperismo. Las capas más superficiales presentan un mayor intemperismo que las capas más subyacentes, por tanto, son más aptos para soportar vegetación. Sin embargo, debido a que se encuentran generalmente sobre pendientes, son muy susceptibles a la erosión, inducida principalmente por el hombre. El afloramiento de capas de ceniza menos intemperizadas, compactadas y que no soportan vegetación se les conocen como tepetates.

2.3. Los tepetates y su importancia económica y ambiental

Los tepetates, como se mencionó anteriormente son tobas volcánicas endurecidas (Etchevers *et al.*, 2006). Éstos se ubican al piedemonte, entre 2250 a 2800 m de altitud (Peña y Zebrowski, 1992) con un clima que fluctúa de templado subhúmedo a templado húmedo. Existe una época de sequía bien definida que es aproximadamente de noviembre a abril, y las lluvias se distribuyen irregularmente de mayo a octubre. La precipitación varía de 600 a 900 mm. En México, Guerrero *et al.* (1992) estimaron que los tepetates cubren 11.6% de la superficie del país (más de 232,000 km²). En el eje neovolcánico transversal, donde se encuentra asentada la mayor parte de la población de la República Mexicana, los tepetates cubren más de 30 000 km² (Zebrowski, 1992). Sin embargo, no se sabe la extensión de superficie en que se encuentran aflorando. Se reconocen dos tipos de tepetate de acuerdo a su grado de dureza: fragipán y duripán (Zebrowski, 1992). Los tepetates fueron clasificados por Quantin *et al.* (1993) en t1, t2 y t3 con y sin carbonatos de calcio respectivamente, con base en la edad de las tobas que le dan origen T1, T2, T3 (Miehlich, 1992). La marginación que impera en las regiones donde abundan los tepetates, pone de manifiesto un problema social y económico. Los campesinos demandan tierras de cultivo para satisfacer las necesidades locales de maíz, frijol, cebada, trigo y otros cultivos. Pero la escasez de éstas y la baja rentabilidad de la agricultura de temporal, ocasionan el abandono de las parcelas de cultivo y la migración de la población rural a los centros urbanos o a Estados Unidos, en busca de mejores oportunidades para mejorar su situación económica. Tales circunstancias ponen de manifiesto la importancia de considerar una estrategia para tratar de retener la población rural.

Existe la posibilidad de renovar el suelo que fue erosionado. Durante la época lluviosa, el tepetate de tipo fragipán, que es el más abundante y susceptible de ser trabajado, se reblandece y es posible rotarlo con maquinaria y convertirlo artificialmente en suelo, aunque el costo económico y energético es alto. Sin embargo, es necesario recuperar este recurso que fue erosionado, porque la degradación de los suelos y el afloramiento de los tepetates influyen negativamente al medio ambiente (Gama-Castro, *et al.*, 2007) y ocasiona pobreza, por la imposibilidad de producir alimentos. El natural endurecimiento de estos materiales volcánicos limita su porosidad, por tanto, la aireación, la infiltración de agua y el establecimiento de especies vegetales. Debido a esto, durante la época de lluvias aumenta la escorrentía y el arrastre de sedimentos. Esto ocasiona una disminución en almacenamiento de agua y la recarga de acuíferos

y un aumento en las inundaciones en las poblaciones que se encuentran aguas abajo. En el lugar donde se erosionó el suelo solo quedan cárcavas y paisajes yermos y estériles, por la extinción de flora y fauna silvestre.

La erosión del suelo y la destrucción de la cobertura vegetal, ocasionan otro problema ambiental que se relaciona con el cambio climático global, por la emisión de CO₂ al ambiente. Según datos reportados por la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (2006), se estima que la destrucción de la cobertura vegetal, lo cual, implica necesariamente un cambio en el uso del suelo, aportó 63% de las emisiones de CO₂ a la atmósfera emitidas por los países llamados “en desarrollo” en los últimos 50 años.

Lo mencionado anteriormente pone de manifiesto la importancia de tratar de habilitar los tepetates ya sea con fines de reforestación o para fines de producción agrícolas, porque es la única forma de contrarrestar, en parte, el deterioro ambiental que han ocasionado el impacto de las actividades humanas en el eje neovolcánico transversal (Báez 2007).

2.3.1. Incorporación de los tepetates a la agricultura

Los tepetates en condiciones naturales, debido a su dureza, prácticamente no permiten la penetración de las raíces de las plantas, y su capacidad de almacenamiento de agua es muy limitada (Arias, 1992; Báez, 1998; Werner, 1992). La incorporación agrícola de los tepetates comienza con el acondicionamiento físico de este substrato endurecido, mediante la roturación y la construcción de terrazas. Estas prácticas que se han realizando desde la época precolombina (Hernández-Xolocotzi, 1987), tienen el propósito de favorecer la penetración de las raíces de las plantas en profundidad, aumentar la capacidad de almacenamiento de agua y aumentar la retención de humedad, para favorecer el establecimiento de cultivos. La construcción de terrazas es una alternativa importante para el control de la erosión. Se realizan más o menos de forma horizontal siguiendo o no las curvas de nivel del terreno (Ruiz, 1979). Las terrazas se delimitan con bordes que pueden ser contruidos por montículos de tierra, muros de piedra, o bien por algunas especies vegetales como árboles, magueyes, nopales, etc.

La incorporación de abonos orgánicos como pajas y estiércoles es importante para el mejoramiento de la estructura física del tepetate cultivado y la acumulación de reservas orgánicas, pero los beneficios de estas prácticas agrícolas son a mediano y largo plazo. En el caso de la incorporación de estiércoles de buena calidad (relación C/N 20:1) se han observado resultados favorables inmediatos en cuanto a aspectos nutrimentales (Álvarez *et al.*, 2000; Báez *et al.*, 1997; Ferrera-Cerrato *et al.*, 1997; Navarro y Flores 1997). Las deficiencias de N y P en los tepetates pueden corregirse suministrando estos elementos en forma de abonos químicos. La adecuada selección y rotación de cultivos, la asociación de gramíneas con leguminosas y las técnicas de captación de agua de lluvia, son indispensables para obtener buenos resultados en los primeros años de cultivo (Báez *et al.*, 2007).

Es importante señalar que el proceso de habilitación de tepetates no es un proceso tan simple. El material recién roturado es altamente erosionable por acción de las lluvias, ya que se encuentra completamente suelto. Por ello la importancia de construir las terrazas y otras obras de conservación como: bordes altos, pendientes suaves o curvas de nivel, etc. Esto es fundamental para reducir al mínimo la erosión hídrica. El escurrimiento y la pérdida de sedimentos implican la posibilidad de que se pierda fertilizante, si éstos se hubiesen adicionado, adelgazamiento de la capa roturada, deterioro de la parcela y poco éxito en el establecimiento de cultivos.

La habilitación de tepetates con fines agrícolas supone un aumento en la producción de cultivos básicos. En ensayos realizados en parcelas de tepetate habilitadas bajo condiciones de temporal se han obtenido rendimientos de más de 3 t ha⁻¹ de trigo y cebada, hasta 5 t ha⁻¹ de maíz y más de 1.5 t ha⁻¹ de frijol (Báez *et al.*, 1997; Navarro y Flores 1997, Werner, 1992). Estos rendimientos son comparables con lo que se obtienen en suelos que no han sido degradados en la misma región. Satisfacer la demanda en la producción de alimentos en cualquier país o región es de primordial importancia. Actualmente todos estos productos se importan del extranjero. Se cuenta con la tecnología y con conocimiento técnico y científico para realizar un programa de habilitación de tepetates a gran escala. Con una inversión moderada por parte del Estado y con la colaboración de diversas instituciones es factible y necesario realizar esta labor. En los estados de México y Tlaxcala, donde los tepetates son muy abundantes, se han realizado algunos esfuerzos para incorporar los tepetates a la producción agrícola y forestal.

2.3.2. El carbono orgánico en los tepetates

El COS se considera como uno de los principales indicadores de la calidad agrícola de los suelos, proporciona información en cuanto a la capacidad que tiene un suelo para sostener una determinada productividad y el potencial de éste para aportar nutrimentos disponibles para los cultivos, principalmente nitrógeno y fósforo (Lal, 1999). Sin embargo, dicha disponibilidad nutrimental depende del tipo de residuos orgánicos, la calidad de éstos y su grado de descomposición. A los distintos componentes de la MO se les denomina reservas orgánicas del suelo (ROS) y su permanencia en el suelo puede mantener un nivel adecuado de aporte nutrimental para la producción de los cultivos (Zilbilske, 1994).

El contenido de C orgánico en los tepetates cultivados en condiciones de temporal, con prácticas de labranza convencionales y con el retiro de los residuos de cosecha, es en general menor a 1%. (Báez *et al.*, 2002; Cajuste, 1997; Etchevers *et al.*, 1992). Pérez *et al.* (2000) estudiaron la mineralización de los pocos residuos vegetales de maíz y frijol que los productores dejan en el terreno de cultivo después de las cosechas. Los autores evaluaron parcelas de tepetates que con un año de cultivo y otras que habían sido cultivadas por seis décadas. Concluyeron que la concentración de C orgánico en todos los tepetates fue baja, independientemente de su historial de manejo agronómico. Lo anterior sugiere que no es posible mejorar las condiciones físicas y químicas de los tepetates con el propósito de aumentar la producción agrícola, sin incrementar los porcentajes de materia orgánica. Báez *et al.*, 2002 midieron la tasa de acumulación de COS en tepetates cultivados con distinto manejo agronómico y tiempo de cultivo, y concluyeron que la concentración de este elemento aumentaba mayormente en aquéllos sistemas donde se incorporaba constantemente residuos orgánicos. Sin embargo, el nivel de acumulación era bajo, respecto a la cantidad de materia orgánica incorporada.

Los tepetates antes de ser cultivados solamente contienen trazas de C orgánico, por lo cual, constituyen un potencial para el almacenamiento del mismo. Este elemento es indispensable para sostener los procesos biológicos del suelo. Con el tiempo de cultivo y el empleo de prácticas de manejo agronómico adecuadas, el C se acumula paulatinamente en los tepetates cultivados (Báez *et al.*, 2002). Desde el punto de vista ambiental, la conversión de lechos de tepetate a terrenos de cultivo o de reforestación, contribuiría de manera importante a secuestrar carbono. Los autores

estimaron que la tasa de acumulación de este elemento en parcelas de tepetate con un manejo agronómico que comprende incorporación de abonos orgánicos y empleo de leguminosas, es de 1.1 a 2.2 t ha⁻¹ de COS durante los primeros 4 años de cultivo. En tepetates cultivados en invernadero y con incorporación de composta la acumulación de este elemento fue de cerca de 90 t ha⁻¹ en menos de una década (Báez *et al.*, 2002).

2.4. Agregación de las partículas del suelo

El término agregación de las partículas del suelo se refiere a la unión de partículas minerales del suelo (arenas, limos y arcillas) por la intervención de agentes cementantes orgánicos (polímeros orgánicos, bacterias, hongos, raíces etc.) e inorgánicos (arcillas, carbonatos, sílice) (Tisdall y Oades, 1982). En estas últimas intervienen fuerzas electrostáticas entre las cargas del borde positivo sobre un dominio de arcilla y la fase cargada negativamente del otro (Six *et al.*, 2000; Chenu *et al.*, 2000). Los agregados que se forman cuando las partículas elementales del suelo se agrupan en unidades separables más grandes, determinan el tamaño y distribución de poros en el suelo y, en general, la estructura del suelo (Stott. *et al.*, 1999). Es evidente que los agregados del suelo se forman por procesos químicos, físicos y biológicos. Mann (1986) mencionó que la cantidad y estabilidad de agregados está en función del clima, tipo de suelo, la actividad microbiana, el contenido de C y cantidad de raíces finas.

Tisdall y Oades (1982) mencionaron que las sustancias húmicas (8% de C) son los agentes estabilizantes muy persistentes asociados principalmente a microagregados (< 0.25 mm), mientras que las raíces de las plantas e hifas de hongos son agentes estabilizantes temporales asociados principalmente con macroagregados (> 0.25 mm), pero los polisacáridos y microorganismos del suelo son agentes estabilizantes transitorios que contribuyen, tanto a la micro como macroagregación. Según Jastrow *et al.* (1996) en los macroagregados se encuentra mayor cantidad de C soluble, que es más fácilmente oxidable y en las partículas más finas se encuentra mayor cantidad de C más resistente a la biodegradación. Monreal *et al.* (1997) mencionaron que en los compuestos orgánicos que se asocian mayormente con los macroagregados están constituidos por carbohidratos, ligninas, lípidos, monómeros y fenoles, compuestos alifáticos y aromáticos, mientras que los microagregados se asocian más con moléculas altamente humificadas. Estos intervienen en la producción de coloides orgánicos del

suelo, en la capacidad amortiguadora del éste y en la producción de agregados que mejoran sustancialmente sus propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos (Chenu *et al.*, 2000; Lal *et al.*, 1999; Six *et al.*, 2000; Stott. *et al.*, 1999). Los compuestos húmicos también son importantes en la vinculación de iones metálicos, ya que incrementan la disponibilidad de algunos nutrimentos y reducen el efecto tóxico de otros (Fisher, 1995).

La fracción mineral provee protección física a la MO cuando esta última queda encapsulada al interior de los agregados. Elliot (1986) mencionó que cuando los agregados se rompen por acción mecánica o por presiones naturales como humedecimiento y secado, la mineralización del C se incrementa. Beare *et al.* (1994) señaló que el nivel de protección de la MO varía con el manejo agrícola del suelo y que ésta es mayor en suelos con labranza reducida. La estabilidad de los agregados del suelo es indispensable para aumentar su calidad agrícola. Ésta repercute directamente en las propiedades físicas y químicas del suelo, influye en la porosidad y la infiltración de agua, mantiene o incrementa el secuestro de C, que a la vez incurre en la retención y disponibilidad de nutrimentos esenciales para las plantas (Lal *et al.*, 1999).

2.4.1. Agregación en los tepetates

El lecho de tepetate tiene una estructura masiva que es susceptible de ser rota mecánicamente y formar un sustrato cultivable. Inicialmente este último no contiene agregados, solamente fragmentos de tepetate de diverso tamaño. La acumulación de C orgánico, dentro del sustrato, comienza cuando se forman agregados, es por eso que la incorporación de materia orgánica (MO) es necesaria para incrementar las fuentes de C en el suelo. Sin este elemento es difícil lograr que los fragmentos de tepetate evolucionen hacia agregados y formen suelo (Báez *et al.*, 2007). La roturación del tepetate favorece la penetración de las raíces de las plantas, agua y oxígeno, aumenta la reproducción de organismos y microorganismos del suelo como anélidos, insectos, microflora y microfauna que provocan un aumento en la actividad biológica en el sustrato. Durante este proceso se promueve la actividad biológica del suelo como: exudados radicales, excretas, secreciones, sustancias orgánicas derivadas de los distintos grados de descomposición de la MO (fenoles, polisacáridos, ácidos húmicos, ácidos fúlvicos, etc.) que son la materia prima para la producción de algunos agentes cementantes orgánicos como polisacáridos gomosos, que al interactuar con las partículas del suelo, forman complejos orgánico-minerales que aglutinan

las partículas del suelo para formar los agregados (Oades y Waters, 1991). En los tepetates los agregados que se forman inicialmente son muy inestables (Báez *et al.*, 2007). La velocidad de formación de éstos depende en gran medida de la incorporación de fuentes de C (abonos orgánicos), del manejo agronómico y de la temperatura y humedad, las cuales determinan la intensidad de la actividad biológica en el suelo.

Acevedo y Flores (1997) y Velásquez y Flores (2001) estudiaron la formación de agregados en tepetates en condiciones de invernadero y macetas experimentales, las cuales fueron tratadas con materia orgánica, riego y varias especies vegetales (*Leucaena esculenta*, *Chloris guayana* y *Psidium guajava*). Después de 1 año de observaciones, concluyeron que había aproximadamente 10% de agregados. Báez *et al.* (2007) estudiaron los agregados en tepetates cultivados en condiciones de temporal bajo distinto manejo agrícola y tiempo de cultivo, mencionaron que la prueba de estabilidad de agregados sobreestima la presencia de agregados estables, dado que ésta no discrimina entre agregados y fragmentos; la dureza de estos últimos es hasta tres veces superior a la de los agregados. La cantidad relativa de agregados se incrementa con el tiempo de cultivo y puede alcanzar hasta 80% después de 100 años. Los mismos autores señalaron que la producción de agregados en tepetates cultivados en condiciones de cama invernadero y riego, fue mayor que en aquéllos sistemas sometidos a labranza convencional en condiciones de temporal, donde la formación de agregados está expuesta a una constante destrucción por el laboreo. Lo anterior trae como consecuencia una débil estructura física del sustrato por la frágil estabilidad de los agregados.

De manera general el porcentaje de agregados en los tepetates cultivados aumenta a medida que se incrementa el tiempo de cultivo. Los agregados contienen casi 90% más de C que los fragmentos y su estabilidad se relaciona estrechamente con el manejo agronómico. La concentración de C orgánico en función del tamaño de partícula, tanto en fragmentos, como en agregados, se ajustan a modelos logarítmicos o potenciales (Báez, 2007).

2.5. Secuestro de carbono

Secuestro de C es un término que indica la cantidad de CO₂ que pueden capturar los organismos autótrofos de la atmósfera y permanecer como C orgánico después de la biodegradación de la

MO (Angers y Chenu, 1998). Es importante diferenciar los términos captura y secuestro de C. El primero se refiere al C que es captado por organismos autótrofos y utilizado en su metabolismo para la construcción de esqueletos hidrocarbonados. El secuestro se interpreta de dos maneras. En el caso de la MO que regresa al suelo después de su muerte, una parte del carbono que forma parte de su estructura es rápidamente degradado y convertido nuevamente en CO₂ por la respiración microbiana, y otra parte, el que es más recalcitrante, puede permanecer en el suelo con una tasa de degradación muy baja y ser transformado por los microorganismos del suelo en sustancias húmicas altamente estables. El secuestro de C en este caso, es parte de la MO que es recalcitrante y puede permanecer por largo tiempo en el suelo. Se encuentra asociado con la fracción mineral del suelo y forma complejos órgano-minerales. Oades (1988) menciona que la transformación química del C en el suelo y su asociación con la fracción mineral proporcionan protección física a éste. Esta teoría ha sido fuertemente aceptada para fundamentar el mecanismo que explica la secuestro de C en el suelo. Otros autores mencionan que la protección físico-química que el suelo puede proporcionar al C es finita, y ésta se relaciona directamente con el contenido de partículas finas (limo y arcilla) (Hassink, 1997; Matus y Maire, 2000). Los autores mencionaron que la estabilización de las nuevas aportaciones de C varía con respecto al grado de saturación de los suelos. La segunda acepción del C secuestrado es aquella parte de este carbón que queda temporalmente fuera del ciclo, principalmente en productos maderables, en caliza o carbonatos de calcio.

2.6. Oxidación del carbono orgánico del suelo

La oxidación es la pérdida de electrones que ocurren en un sistema y que forman parte de los diversos ciclos biogénicos que ocurren en la naturaleza (Sparks, 1988). La vida en el planeta depende del equilibrio de estos sistemas, en donde intervienen de manera activa los animales, las plantas, el suelo, los mares, la atmósfera, etc. El intercambio de C entre el suelo y la atmósfera ocupa una posición importante dentro del ciclo global del C. La transformación del C en el suelo ocurre por la mineralización de la MO, la descomposición de los residuos de cultivo, la respiración de las raíces de las plantas y la respiración de la biomasa microbiana que convierten el C de forma orgánica a forma inorgánica por un proceso de oxidación, generando CO₂ (Curtin *et al.*, 1998). La oxidación del C del suelo también la definió Zibilske (1994) como la respiración del suelo, y es el resultado de la suma de todas las actividades metabólicas de diversos

organismos como animales, plantas y microorganismos que producen CO₂ como resultado de la absorción de oxígeno.

El grado de oxidación de la MO en los suelos agrícolas depende del manejo agrícola. Al reducir la labranza, incluir leguminosas, rotar cultivos, fertilizar apropiadamente y reforestar tierras marginales, ocurre una reducción en el flujo de CO₂ en el suelo (Campbell *et al.*, 1995). El secuestro de C en los suelos ocurre cuando la incorporación de residuos orgánicos es mayor que las pérdidas de C por emisión de CO₂ resultado de la oxidación biológica de la MO y respiración de las raíces (Curtin *et al.*, 1998).

2.7. Carbono orgánico y las arcillas del suelo

Las arcillas de suelo forman parte importante de la estabilización del COS y la estabilidad de agregados del suelo. Varios estudios han señalado que existe una fuerte correlación entre la concentración de COS y el contenido de arcillas, principalmente con las del tipo 2:1 (Monreal *et al.* 1997; Monreal y Kodama 1997; Spain, 1990). Sin embargo, otros estudios señalan que el contenido de arcilla no se relaciona con la concentración de COS, debido a la influencia de los minerales primarios y al tipo de arcillas que inciden en la acumulación de este elemento (Percival *et al.*, 1999; Ramson *et al.*, 1998). Deneff, *et al.* (2004), Sollins *et al.* (1996) y Torn *et al.* (1997) mencionaron que el C del suelo podría asociarse mayormente con óxidos de Fe y Al debido que las interacciones electrostáticas de estos coloides del suelo retienen con mayor fuerza el carbono.

Homann *et al.* (1997) y Burke, *et al.* (1989) sugirieron que el clima influye significativamente en la acumulación de C del suelo, especialmente en condiciones de alta humedad. Es importante señalar que se reconoce de manera general que el COS es estabilizado principalmente por tres mecanismos: protección física proporcionada por los agregados del suelo, la asociación íntima con partículas de limo y arcilla y por la transformación bioquímica de la materia orgánica a formas recalcitrantes (Six *et al.* 2002). Varios estudios han explicado la relación que existe entre dinámica de l COS y los agregados del suelo (Elliott, 1986; Jastrow, 1996; Six *et al.*, 1998; Six *et al.*, 2000). En los sistemas agrícolas las prácticas de labranza en el suelo ocasionan la dispersión de las arcillas y la inestabilidad de los agregados, lo que conlleva a la pérdida de C (Fuller *et al.*, 1995). Las sustancias húmicas son químicamente estables, mientras que los minerales asociados con moléculas orgánicas (interacción órgano-mineral) pueden ser temporalmente estables

(protección química) dependiendo de su interacción con la matriz del suelo (Baldock y Skjemstad 2000).

La capacidad de los suelos para proteger la materia orgánica también depende de su composición mineral, la cual, influye en las interacciones covalentes entre las superficies minerales y moléculas orgánicas. Las uniones covalente y las interacciones no covalentes entre las unidades estructurales de las moléculas orgánicas influyen de manera determinante en la estabilización química del carbono (Piccolo 2002). La heterogeneidad y el tamaño molecular de sustancias húmicas son también importantes. La degradación microbiana es más lenta cuando las moléculas orgánicas son demasiado grandes para pasar a través de las membranas celulares (Swift 2001).

2.8. La glomalina

La glomalina es una glicoproteína producto de los hongos micorrízico arbusculares (HMA), debe su nombre a su asociación con la anterior ubicación de estos hongos en el orden de los *Glomales*. Se menciona que es abundante en el suelo y está implicada con importantes propiedades físicas y bioquímicas de éste (Ogunseitan, 2006). La glomalina fue identificada por Wright y Upadhyaya (1996). Los autores mencionan que su molécula es muy estable y contiene entre 30 y 40% de carbono recalcitrante. Es insoluble en agua y soluciones salinas comúnmente usadas en extracciones de compuestos del suelo. La solubilización de la glomalina puede lograrse con éxito utilizando citrato de sodio como extractante, sometido a una temperatura en autoclave de 121 °C y presión de 103 KPa (Wright y Jawson, 2000). Al interaccionar con la fracción inorgánica del suelo funciona como un cementante que proporciona estabilidad a los agregados del suelo (Wright y Upadhyaya 1998; Rillig *et al.*, 2002). La glomalina además de contribuir a mejorar la estructura física de los suelos, juega un papel importante en la captura de carbono atmosférico (CO₂). Weller (2002) mencionó que ésta constituye aproximadamente el 27% del COS. Se estima que su durabilidad en los suelos fluctúa de 7 a 42 años, según las condiciones medioambientales, el ecosistema o el manejo agrícola de los suelos. La glomalina es sensible a los cambios de uso de suelo y puede usarse como un indicador de dichos cambios (Rillig *et al.*, 2002).

Se señala, en otro tipo de estudios, que la glomalina tiene la capacidad de secuestrar en el suelo los elementos denominados potencialmente tóxicos (Cd, Pb, Cu y Mn) (González-Chávez *et al.*,

2004). Esto evidencia el potencial que tienen los HMA en la remediación de suelos contaminados. González-Chávez *et al.* (2002) mostraron que estos elementos se precipitan en las hifas del micelio de los HMA, lugar donde se secreta la glomalina. Sánchez-Viveros *et al.* (2004) reportaron que las esporas de algunos HMA pueden acumular elementos tóxicos. Chern *et al.* (2007) por su parte estudiaron la acumulación de dichos elementos en cuencas hidrográficas y concluyeron que sus resultados fueron afectados por la carga erosiva de la cuenca. El éxito del uso de los HMA en la remediación de suelos contaminados, dependería de la adecuada selección y establecimiento de especies resistentes a la toxicidad de dichos elementos.

Un avance importante en el estudio de la glomalina fue la descripción de la secuencia de su gen, trabajo que realizaron recientemente Gadkar y Rillig, (2006). Aunque esta descripción fue de manera parcial, es una evidencia relevante para la identificación de esta glicoproteína y amplía las perspectivas en el campo de la investigación a nivel de biología molecular.

2.8.1. Limitantes y controversias en la determinación de las PSRG

Estudios recientes señalan que existen algunos problemas para aislar las proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (PSRG). Operacionalmente, la glomalina se cuantifica en el micelio y en el suelo por el mismo procedimiento de extracción (Wright y Upadhyaya, 1998). Se ha sugerido que la proteína producida directamente en las hifas de los HMA (glomalina *sensu stricto*) difiere de éstas cuando se cuantifican en el suelo, la cual, se denomina: PSRG. Se sugiere que varias fracciones proteínicas relacionadas con la glomalina se obtienen con los drásticos métodos de extracción (Rillig, 2004; Wright y Upadhyaya, 1996). El método original menciona que para extraer la glomalina del suelo se utiliza citrato de sodio y se aplican 121 °C de temperatura y 15 PSI. Treinta minutos para obtener la fracción fácilmente extractable y una hora para obtener la fracción total. Para esta última, se repite la operación hasta obtener un sobrenadante color pajizo. Se asume que este procedimiento destruye todas las proteínas contenidas en la fracción orgánica del suelo, excepto las de la glomalina, que son recalcitrantes y tienen su origen en los HMA. Para evaluar la glomalina se utiliza un estándar de albúmina de suero bovino y el Bradford Protein Assay/ELISA. Rosier *et al.* (2006) evaluó este procedimiento y concluyó que la extracción no elimina totalmente otro tipo de proteínas derivadas de las plantas, lo cual, ocasiona interferencias en la detección del Bradford Protein Assay. Ellos

mencionaron que este problema podría ser mayor en suelos donde se adicionan considerables cantidades de materia orgánica.

Las glicoproteínas son moléculas que forman parte en todas las células de los seres vivos y están compuestas por una proteína unida a uno o varios hidratos de carbono, simples o compuestos. Schindler *et al.* (2007) indicaron que las PSRG contenían una alta cantidad de compuestos aromáticos (42–49%) y carboxílicos (24–30%) y baja cantidad de compuestos alifáticos (4–11%) y carbohidratos (4–16 %). Estos resultados sugieren que la PSRG no corresponde con una típica glicoproteína y la composición bioquímica presenta cierta similitud con los ácidos húmicos. Estos resultados ponen en duda la pureza de la glicoproteína aislada del suelo. Concluyeron que había una co-extracción de ambas sustancias, porque el método de extracción presenta cierta similitud con el que se utiliza para extraer ácidos húmicos. Más recientemente Bolliger *et al.* (2008) evaluaron la pureza de las PSRG y reportaron que aunque existen trazas de proteínas de diferente origen a los HMA, predominante dominan aquellas de origen de una sola proteína glicosilada reactiva a la glomalina definida como: MAb32B11. Nichols y Wright (2005) estudiaron con anterioridad las diferencias entre glomalina y sustancias húmicas y mencionaron que los resultados de la electroforesis y los espectros de resonancia magnética nuclear de la glomalina no fueron iguales a los de los ácidos húmicos. Esto permitió verificar que la glomalina era el compuesto más abundante y mejor caracterizado, y que no había ocurrido co-extracción de otros compuestos proteicos o taninos (Nichols, 2003; Rillig *et al.* 2001).

Otros investigadores señalaron que el método de extracción de la glomalina es muy severo y puede destruir también parte de ésta. Rosier *et al.* (2006) mencionaron que la temperatura y la presión aplicadas durante este procedimiento de extracción, pueden desnaturalizar la proteína. En otro estudio realizado por Halvorson y González (2007) mencionaron que el Bradford Protein Assay, que se utiliza en la determinación colorimétrica de la glomalina, puede sobreestimar la concentración de proteína cuando hay presencia de taninos en la fracción orgánica del suelo.

Driver *et al.* (2005) señalaron que el 80% de la glomalina se encuentra contenida en el micelio y las esporas y no en las secreciones que se producen en el micelio. Esto podría explicar en parte la problemática en la extracción de la proteína del suelo relacionada con la glomalina.

2.8.2 Utilización de diferentes extractantes

El citrato de sodio es el extractante más común que se emplea para evaluar la glomalina. Sin embargo, también se han experimentado con otros reactivos. Wright *et al.* (2006) evaluaron tres diferentes extractantes: citrato de sodio, hidróxido de sodio y pirofosfato de sodio, para averiguar cuál de éstos podía obtener una mayor cantidad de glomalina. El último de estos fue el que tuvo un mayor poder de extracción y el segundo fue el que extrajo menor cantidad de glomalina. Halvorson y González (2007) también han experimentado con varios extractantes para evaluar proteínas en el suelo y mencionaron que citrato de sodio y pirofosfato de sodio obtienen una mayor cantidad de proteína. Wright *et al.* (2007) en sus estudios más recientes utilizaron pirofosfato de sodio para evaluar la glomalina. Cabe señalar que el pirofosfato de sodio es un extractante que se utiliza comúnmente en la evaluación de sustancias húmicas del suelo (Kananova, 1966), pero con distinto procedimiento. Como se ha mencionado anteriormente, Nichols y Wright (2005) estudiaron las diferencias entre glomalina y sustancias húmicas, y mostraron que la glomalina poseía estructura propia. Sin embargo, para realizar este estudio, utilizaron citrato de sodio para extraer la glomalina e hidróxido de sodio para extraer las sustancias húmicas. Dado que el pirofosfato de sodio se ha empleado también para evaluar la glomalina (Wright *et al.*, 2006; Wright *et al.*, 2007) existiría el riesgo de co-extracción con sustancias húmicas.

2.8.3. Ventajas y limitantes de los hongos micorrízico arbusculares (HMA)

Una de las principales ventajas que tienen los HMA es su capacidad para asociarse con cerca del 90% de las plantas terrestres (Harley and Smith 1983). Los HMA influyen en la fertilidad del suelo, en la diversidad vegetal y en la sustentabilidad en diferentes ecosistemas (Van der Heijden *et al.* 1998). El efecto positivo de los HMA incide de manera directa en la planta hospedera, al incrementar su adaptación al medio y aumentar su producción de biomasa (Fisher y Jayachandran 2002). Dichos hongos actúan como extensiones del sistema radical y favorecen la asimilación de nutrimentos del suelo, principalmente los de lenta movilidad, como: P, K, Cu y Zn. El diámetro (3 a 30 μm) y longitud de las hifas (0.03 a 6.95 m g^{-1} de suelo) de los HMA permite explorar un mayor volumen del ambiente edáfico (Bolan, 1991; Harley y Smith 1983).

Partiendo del hecho que la glomalina es un producto biológico de los HMA, cabría señalar algunas ventajas y limitaciones que tiene el establecimiento de estos microorganismos bajo ciertas condiciones restrictivas en los suelos. Los HMA son componentes esenciales de la microbiota del suelo y pueden constituir hasta 50% de la biomasa microbiana (Olsson *et al.*, 1999). Se sabe que la mayor parte de las plantas terrestre son capaces de establecer una simbiosis con este tipo de hongos (Azcón-Aguilar y Barea, 1996). Se ha mostrado que su diversidad influye en la productividad, en las relaciones competitivas y en el funcionamiento general de los ecosistemas naturales (Picone, 2000). Sin embargo, las prácticas de manejo agrícola, el cambio de uso de suelo y la perturbación de los ecosistemas pueden afectar la simbiosis. Ryan y Graham (2002) mencionaron que la proliferación de HMA (por tanto la producción de glomalina) puede ser limitada en suelos con alta disponibilidad de P, por las prácticas de fumigación, por la adición excesiva de fertilizantes fosfatados y por el empleo irracional de plaguicidas comunes en la agricultura. Con base en lo anterior, se deduce que establecimiento y proliferación de los HMA puede estar limitada por una serie de factores que afectan su entorno. Los suelos agrícolas son sometidos a un alto grado de perturbación y constantemente se realizan continuas y con altas concentraciones aplicaciones de fertilizantes fosfatados y plaguicidas. En estas circunstancias el establecimiento de los HMA, y por lo tanto la producción de glomalina, podría estar limitada. Borie (2005) y Preger *et al.* (2007) estudiaron la pérdida de glomalina en sistemas agrícolas y concluyeron que las prácticas agrícolas tienen mayor influencia en la glomalina fácilmente extractable (GFE) que en glomalina total. La GFE representa la extracción de la fracción más inmunorreactiva de la glomalina y representa el reservorio de más reciente deposición, incluso se ha mencionado que proviene de una descomposición parcial de la glomalina más estable. La GFE presenta estrecha correlación con la estabilidad de los agregados (Wright y Upadhyaya, 1998). Con la glomalina total se obtiene un extracto que no es totalmente purificado, por lo cual, pueden estar asociados otros compuestos de naturaleza proteica (Rillig *et al.*, 2001).

2.8.4. Implicación de la glomalina en el ciclo del C

Los HMA, organismos responsables de producir la glomalina, son un componente dominante de la biomasa microbiana (Rillig *et al.*, 1999), por lo cual, tienen múltiple influencia en los ecosistemas terrestres y en el ciclo del C (Rillig *et al.*, 2006; Treseder, 2007). Las proteínas del suelo juegan un papel importante en la estabilización del C y los compuestos peptídicos en

general, son probablemente más persistentes que otros compuestos carbonados y tienen gran influencia en el secuestro de C del suelo (Rillig *et al.*, 2007). El autor mencionó que las proteínas del suelo influyen de manera importante en la dinámica del C en el suelo, porque que almacenan C recalcitrante y contribuye a aumentar la fertilidad de los suelos. Es posible predecir la contribución de glomalina en los ecosistemas terrestres (Treseder y Turner 2007).

3. LITERATURA CITADA

- Acevedo, O. y D. Flores. 1997. Efecto de especies vegetales en la agregación y disgregación en dos tipos de tepetates del estado de México, en condiciones de invernadero. *In: III Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. Zebrowski, C., P. Quantin y G. Trujillo (eds.). ORSTOM. Quito, Ecuador, pp: 178-184.
- Álvarez D., R. Ferrera-Cerrato y J. D. Etchevers. 2000. Actividad microbiana en tepetates con incorporación de residuos orgánicos. *Agrociencia* 34:523-532.
- Angers, D., and C. Chenu, 1998. Dynamics of soil aggregation and C sequestration. *In: Soil processes and the carbon cycle*. Lal, R., J. Kimble, R. Follett, and E. Stewart (eds.). CRC. Boca Raton, Florida, pp: 199-223.
- Arias R., H. M., M. E. Miranda M. y D. Gabriels. 1992. Dinámica de la erosión en tepetates roturados. *Terra* 10 (Número especial): 370-373.
- Azcón-Aguilar, C., and J. M. Barea. 1996. Arbuscular mycorrhizas and biological control of soil-borne plant pathogens: an overview of the mechanisms involved. *Mycorrhiza* 6:457-464.
- Badjes, N. H. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science* 47: 151-163.
- Báez, A., E. Ascencio-Zapata., C. Prat y A. Márquez, 1997. Análisis del comportamiento de cultivos en tepetate t3 incorporado a la agricultura de temporal, Texcoco, México. *In: III Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. Zebrowski, C., P. Quantin y G. Trujillo (eds.). ORSTOM. Quito, Ecuador, pp: 296-310.
- 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. 2007. Manejo agronómico de los suelos endurecidos (tepetates) del eje neovolcánico de México. *In: La captura de*

- carbono en ecosistemas terrestres Iberoamericanos. Gallardo-Lancho, J. (*ed.*). Sociedad Iberoamericana de Física y Química Ambiental. Salamanca, España, pp: 69-84.
- Baldock, J. A., and J.O. Skjemstad. (2000). Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. *Organic Geochemistry* 31:697-710.
- Beare, M., H., F. Heldrix and C. Coleman. 1994. Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional and no tillage soil. *Soil Science Society of America Journal* 58:777-786.
- Bolan, N.S. 1991. A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. *Plant and Soil* 134: 189-207.
- Bolliger, A., A. Nalla, J. Magid, A. Neergaard, A.D. Nalla, and T.C. Bøg-Hansen. 2008. Re-examining the glomalin-purity of glomalin-related soil protein fractions through immunochemical, lectin-affinity and soil labelling experiments. *Soil Biology and Biochemistry* 40:887-893.
- Borie, F., R. Rubio, J. L. Rouanet, A. Morales, G. Borie, and C. Rojas. 2005. Effects of tillage systems on soil characteristics, glomalin and mycorrhizal propagules in a Chilean Ultisol. *Soil and Tillage Research* 88:253-261.
- Burke, I., M. Yonker, C. Parton, C. Cole, K. Flach, and S. Schimel. 1989. Texture, climate and cultivation effects on soil organic matter content in U.S. grassland soil. *Soil Science Society of America Journal* 53:800-805.
- Campbell, C., B. McConkey, R. Zentner, F. Dyck, F. Selles, and D. Curtin. 1995. Carbon sequestration in a Brown Chernozem as affected by tillage and rotation. *Canadian Journal of Soil Science* 75:449-458.
- Chenu, C., and Le Bissonnais, and D. Arrouays. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal* 64:1479-1486.
- Chern, E., D. Tsai, and O. Ogunseitan. 2007. Deposition of Glomalin-Related Soil Protein and Sequestered Toxic Metals into Watersheds. *Environmental Science Technology* 41:3566-3572.
- Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. 2006. Hacia una estrategia nacional de acción climática. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D. F., pp. 1-42.

- Curtin, D., F. Selles, H. Wang, and C. Biederbeck. 1998. Carbon dioxide emissions and transformation of soil carbon and nitrogen during wheat straw decomposition. *Soil Science Society of America Journal* 62:1035-1041.
- Denef, K., J. Six, R. Merckx and K. Paustiand. 2004. Carbon sequestration in microaggregates of no-tillage soils with different clay mineralogy. *Soil Science Society of America Journal* 68:1935-1944.
- Driver J. D., W. E. Holben, and M. C. Rillig. 2005. Characterization of glomalin as a hyphal wall component of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biology and Biochemistry* 37:101-105.
- Elliot, E T. 1986. Aggregates structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated. *Soil Science Society of America Journal* 50:627-633.
- Etchevers, J. D., R. M. López, C. Zebrowski, y D. Peña. 1992. Fertilidad de los tepetates de la vertiente occidental de la sierra nevada (México). *Terra* 10 (Número especial): 379-384.
- Etchevers, J. D., C. Hidalgo, C. Prat y P. Quantin. 2006. Tepetates of Mexico. *In: Encyclopedia of Soil Science*. Lal, R. (Ed.). Marcel Dekker, Nueva York, pp: 1745-1748.
- FAO-UNESCO-ISRIC. 1998. Mapa de suelos dominantes, escala 1: 4 000 000, primera aproximación. SEMARNAP/CP/INEGI. México, D. F.
- Ferrera-Cerrato., R., A. Ortiz, J. Delgadillo y S. Santamaría. 1997. Uso de la materia orgánica en la recuperación de tepetates y su influencia en los microorganismos. *In: III Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. Zebrowski, C., P. Quantin y G. Trujillo (eds.). ORSTOM. Quito, Ecuador, pp: 225-237.
- Fisher, R. 1995. Soil organic matter: clue or conundrum? *In: Carbon form and functions in forest soil*. McFee, W. and M. Kelly (Ed.). Soil Science Society of America. Madison, Winsconsin. USA, pp: 1-3.
- Fisher, J.B., and K. Jayachandran. 2002. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance seedling growth in two endangered plant species from south Florida. *International Journal of Plant Science* 163:559–566.
- Fuller, L. G., Goh T B., and Oscarson D. W. 1995. Cultivation effects on dispersible clay of soil aggregates. *Canadian Journal of Soil Science* 75:101-107.
- Gadkar, V., and M. C. Rillig. 2006. The arbuscular mycorrhizal fungal protein glomalin is a putative homolog of heat shock protein 60. *FEMS Microbiology Letter* 263:93–101

- Gama-Castro, J. E. Solleiro-Rebolledo D. Flores-Román, S. Sedov, H. Cabadas-Báez y J. Díaz-Ortega. 2007. Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: el caso del glacis de Buenavista, Morelos. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 1:133-145.
- Ghadiri, H., and C.W. Rose. 1991. Sorbed chemical transport in overland flow: II. enrichment ratio variation with erosion processes. *Journal of Environmental Quality* 20:634-641.
- González-Chavez, M.C.A., J.D. Haen, J. Vangrosveld, and J. Dodd. 2002. Cooper sorption and accumulation by the extraradical mycelium of three arbuscular mycorrhizal fungi isolated from the same polluted soil. *Plant and Soil* 240:287-297.
- González-Chávez, M.C.A., R. Carrillo-González, S.F. Wright, and K.A. Nichols. 2004. The role of glomalin, a protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi, in sequestering potentially toxic elements. *Environmental Pollution* 130:317-323.
- Guerrero-Eufracio, E. G., J. L. Luna y E. Caballero. 1992. Distribución de los tepetates de la República Mexicana escala 1:4,000,000. *Terra* 10 (Número especial):131-136.
- Harley, J.L, and Smith, S.E. 1983. *Mycorrhizal symbiosis*. Academic Press, London. 483, pp.
- Hassink, J. 1997. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and Soil* 191:77-87.
- Hernández-Xolocotzi., E. 1987. Etnobotánica de Tlaxcala. *In: Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*. Ruiz, F. (ed.). Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, pp: 1-8.
- Homann, P., P. Sollins, M. Fiorella, T. Torzón, and S. Kern, J. 1997. Regional soil organic carbon storage estimates for western Oregon by multiple approaches. *Soil Science Society of America Journal* 62:789-796.
- INEGI. 2004. Conjunto de datos vectoriales de la carta fisiográfica, escala 1:1000,000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México. Aguascalientes, México.
- Ishizuka, Y., and C.A. Black. 1977. Soils derived from volcanic ash in Japan. CIMMYT. México, D.F, pp: 3.
- Jackson, L. M. 1976. *Análisis químicos de suelos*. Tercera Edición. Beltrán, J (traductor). Ediciones Omega. Barcelona, España, pp: 282-283.
- Jastrow, J.D. 1996. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry* 28:656-676.

- Lal, R. 1997. Low input agriculture and greenhouse gas emissions. *Terra* 15:109-117.
- Lal, R., M. Kimble, F. Follet, and A. Stewart. 1998. Pedospheric processes and the carbon cycle. *In: Soil processes and the carbon cycle*. Lal, R., J. Kimble, R. Follett, and A. Stewart (eds.). Chapter 1. CRC. Boca Raton, Florida, USA, pp: 1-7.
- Lal, R. 1999. Soil quality and food security: The global perspectives. *In: Soil quality and soil erosion*. Lal, R. (ed.). CRC. Boca Raton, Florida, USA. pp: 3-15.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304:1624-1627.
- Lauffer, M., Y. Leroux, C. Prat y J. L. Janeau. 1997. Organización superficial de los tepetates cultivados, Texcoco (México). *In: III simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. Zebrowski, C., P. Quantin y G. Trujillo (eds.). ORSTOM. Quito, Ecuador, pp: 443-456.
- Mann, L. K. 1986. Changes in soil carbon storage after cultivation. *Soil Science*. 142:279-288.
- Medina-Orozco, L. E. 2006. Pérdidas de suelo, agua y nutrimentos en parcelas experimentales con sistemas agrícolas de año y vez y alternativos en un acrisol de Michoacán. Tesis de Maestría de Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México.
- Matus, F. J., y C. R. Maire. 2000. Relación entre la materia orgánica y textura del suelo y tasa de mineralización de carbono y nitrógeno. *Agricultura Técnica (Chile)* 60:112-126.
- Miehlich, G., 1992. Formation and properties of tepetate in the central highlands of Mexico. *Terra* 10 (Número especial): 136-144.
- Mielnick, P.C., and W.A. Dugas. 2000. Soil CO₂ flux in a tall grass prairie. *Soil Biology and Biochemistry* 32:221-228.
- Monreal, C. M., H. R. Schulten and H. Kodama. 1997. Age, turnover and molecular diversity of soil organic matter in aggregates of a Gleysol. *Canadian Journal of Soil Science* 77:379-388.
- Monreal, C. M., and H. Kodama. 1997. Influence of aggregate architecture and minerals on living habitats and soil organic matter. *Canadian Journal of Soil Science* 77:367-377.
- Navarro, H y D. Flores. 1997. Manejo agronómico diferencial de la asociación maíz-haba en tepetate de quinto año de uso agrícola. *In: III Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. Zebrowski, C., P. Quantin, y G. Trujillo. (eds.). ORSTOM. Quito, Ecuador, pp: 287-295.

- Oades, J. M. 1988. The retention of organic matter in soils. *Biogeochemistry* 5:35-70
- Oades, J. M., and G. A. Waters, 1991. Aggregates hierarchy in soil. *Australian Journal Soil Research* 29:815-828.
- Olsson, P.A., I. Thingstrup, I. Jakobsen, and E. Baath. 1999. Estimation of the biomass of arbuscular mycorrhizal fungi in linseed field. *Soil Biology and Biochemistry* 31:1879-1887.
- Peña, D. y C. Zebrowski. 1992. Los suelos y tepetates de la vertiente occidental de la sierra nevada. *Terra* 10 (Número especial): 156-163.
- Percival, H., R. Parfitt, and A. Scott 1999. Factors controlling soil carbon levels in New Zealand grasslands: Is clay content important? *Soil Science Society of America Journal* 34:1623-1630.
- Pérez O., A., J.D. Etchevers., H. Navarro, y R. Núñez. 2000. Aporte de los residuos del cultivo anterior al reservorio de nitrógeno en los tepetates. *Agrociencia* 34:115-125.
- Picone, C. 2000. Diversity and abundance of arbuscular-mycorrhizal fungus spores in tropical forest and pasture. *Biotropica* 32: 734-750.
- Piccolo, A. (2002). The supramolecular structure of humic substances: a novel understanding of humus chemistry and implications in soil science. *Advances in Agronomy* 75:57-134.
- Pimentel, D. 1993. *World soil erosion and conservation*. Cambridge University Press. Cambridge, England, pp: 349.
- Prat, C. 1997. Análisis de las características de las precipitaciones de 1992 a 1995 en San Miguel Tlaixpan, Texcoco, México. In: III Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos. Zebrowski, C., P. Quantin, y G. Trujillo (*eds.*). ORSTOM. Quito, Ecuador, pp: 359-370.
- Preger, A. C., Matthias C. R., A. R. Johns, C. Du Preez, I. Lobe, and W. Amelung. 2007. Losses of glomalin-related soil protein under prolonged arable cropping: A chronosequence study in sandy soils of the South African Highveld. *Soil Biology and Biochemistry* 39:445-453.
- Purin, S., and M.C. Rillig. 2007. The arbuscular mycorrhizal fungal protein glomalin: limitations, progress, and a new hypothesis for its function. *Pedobiologia* 51:123-130.
- Quantin, P., H. Arias, J. D. Etchevers, R. Ferrera-Cerrato, K. Olechko, H. Navarro, G. Wernern y C. Zebrowski. 1993. Tepetates de México: caracterización y habilitación para la agricultura: *Terra* 11:33-34.

- Ramson, B., K. Dongseon, M. Kastner, and S. Wainwright. 1998. Organic matter preservation on continental slopes: Importance of mineralogy and surface area. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62:1329–1345.
- 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 and 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 and 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 and Soil* 253:293-299.
- Rillig, M.C. 2004. Arbuscular mycorrhizae, glomalin and soil quality. *Canadian Journal of Soil Science* 84, 355–363.
- Rillig, M.C., B.A. Caldwell, H.A. Wo, and P. Sollins. 2007. Role of proteins in soil carbon and nitrogen storage: controls on persistence. *Biogeochemistry* 85:25–44.
- Rosier, C.L., A.T. Hoyer, and M. C. Rillig. 2006. Glomalin-related soil protein: Assessment of current detection and quantification tools. *Soil Biology and Biochemistry* 38:2205-2211.
- Ruiz, J. F. 1979. Evaluación de cinco tipos de terrazas en suelos de ladera de la cuenca del río Texcoco. Tesis de Maestría en Ciencia del Colegio de Postgraduados. Montecillos México, pp: 8-21.
- Sánchez-Viveros, G., R. González-Carrillo, A. Martínez-Garza y M.C.A. González-Chávez. 2004. Tolerancia adaptativa de hongos micorrizico arbusculares al crecer en sustratos contaminados por As y Cu. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 20:147-158.
- Schindler, F.V., E.J. Mercer, and J.A. Rice. 2007. Chemical characteristics of glomalin-related soil protein (GRSP) extracted from soils of varying organic matter content. *Soil Biology and Biochemistry* 39:320–329.
- SEMARNAT. (2002). Memoria nacional de evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana escala 1:250 000. Colegio de Posgraduados. Montecillo, Texcoco, México, pp: 26-34.

- Shoji, S., M. Nanzio, and R. A. Dahlgren. 1993. Volcanic ash soils: genesis, properties and utilization. *Developments in soil science* 21. Elsevier, Amsterdam, pp: 12.
- Simeon, R. 1885. *Dictionnaire de la langue Nahuatl ou mexicaine*. 9 ed. 1992 *Diccionario de la lengua Nahuatl o Mexicana*. Siglo XXI, D. F., México, pp: 784.
- Six, J., E.T. Elliott, K. Paustian, and J.W. Doran. 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal* 62:1367–1377.
- Six, J., K. Paustian, and C. Combrink. 2000. Soil structure matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate associated carbon. *Soil Science Society of America Journal* 64:681-689.
- Sollins, P., P. Homann, and B.A. Caldwell. 1996. Stabilization and destabilization of soil organic matter: Mechanisms and controls. *Geoderma* 74:65-105.
- Spain, A. 1990. Influence of environmental conditions and some soil chemical properties on the carbon and nitrogen contents of some tropical Australian rainforest soil. *Australian Journal of Soil Research* 28: 825-839.
- Sparks, D. L. 1988. *Soil physical chemistry*. CRC Press. Boca Raton, Florida, USA, pp: 180-181.
- Sterk, G., L. Herrmann, A. Bationo. 1996. Wind-blown nutrient transport and soil productivity changes in southwest Niger. *Land Degradation and Development* 7:325:335.
- Stevenson, F., and M. Cole. 1999. *Cycles of soil*, second edition. Edit. John Wiley and Sons. CRC. Inc. Boca Raton, Florida, pp: 2-20.
- Stocking, M.A. 2003. Tropical soils and food security: the next 50 Years. *Science* 302:1356-1359.
- Stott, D., A. Kennedy A. and C. Cambardella. 1999. Impacts of soil organisms and organic matter on soil structure. *In: Soil Quality and Soil Erosion*. Rattan, L. (ed.). CRC Press, pp: 57-60.
- Swift, R. S. 2001. Sequestration of carbon by soil. *Soil Science* 166:858-871.
- Tisdall, J. and J. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates. *Journal of Soil Science* 33:141-163.
- Torn, M., S Trumbore, A. Chadwick, P. Vitousek, and D. Hendricks. 1997. Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. *Nature* 389:170-173.

- Treseder, K. K., and K. Turner. 2007. Glomalin in ecosystems. *Soil Science Society of America Journal* 71:1257-1266.
- Trueba, C. A. 1995. Antecedentes de la conservación de suelos y perspectivas en México. *In: Simposio universitario de edafología*. García, N. E. y R. M. Gama (eds.). Facultad de Ciencias de la UNAM. México, D.F., pp: 253.
- Van der Heijden, M.G.A., J.N. Klironomos, M. Ursic, P. Moutoglis, R. Streitwolf-Engel, T. Boller, A. Wiemken, and I.R. Sanders. 1998. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature* 396:69-72.
- Velásquez, A. S., D. Flores y O. Acevedo. 2001. Formación de agregados en tepetates por influencia de especies vegetales. *Agrociencia* 35:311-320.
- Werner, G. 1992. Suelos volcánicos endurecidos (tepetates) en el estado de Tlaxcala: distribución, rehabilitación, manejo y conservación. *Terra* 10 (Número especial): 318-331.
- 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 Science* 198:97-107.
- Wright, S.F., and A. Upadhyaya. 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil* 198:97-107.
- Wright, S.F., K.N. Nichols, and W.F. Schmidt. 2006. Comparison of efficacy of three extractants to solubilize glomalin on hyphae and in soil. *Chemosphere* 64: 1219-1224.
- Wright, S.F., V.S. Green, and M.A. Cavigelli. 2007. Glomalin in aggregate size classes from three different farming systems. *Soil and Tillage Research* 94:546-549.
- Zebrowski, C. 1992. Los suelos volcánicos endurecidos de América Latina. *Terra* 10 (Número especial): 15-23.
- Zibilske, L. M. 1994. Methods of Soil Analysis, Part 2. *In: Carbon mineralization*. SSSA Book Series, number 5. Madison, Wisconsin, pp: 835-837.

CAPITULO I. FORMACIÓN DE AGREGADOS Y SECUESTRO DE CARBONO EN TEPETATES CULTIVADOS DE LA CUENCA DEL RÍO TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

RESUMEN

En muchos estados del centro de México afloran materiales volcánicos endurecidos conocidos localmente como tepetates. Debido a su amplia distribución en el eje neovolcánico, la zona más poblada del país, adquieren importancia económica y social. Los tepetates son poco productivos bajo condiciones naturales, porque están compactados y tienen pocos poros, pero una vez roturados y después de aplicar fertilizantes y abonos orgánicos, es factible utilizarlos en la agricultura. Los tepetates recientemente roturados son sustratos constituidos de fragmentos angulares de diferentes tamaños y no presentan agregados. Tienen muy poca materia orgánica y su disponibilidad de N y P es muy baja, al igual que la infiltración del agua y la capacidad de retención de humedad. La aplicación de abonos orgánicos y el cultivo de leguminosas mejoran las propiedades físicas de los tepetates, y sobre todo, promueven la formación de agregados. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la formación de agregados en tepetates recién roturados y cultivados durante 1 y 100 años, determinar su estabilidad en seco y en húmedo y medir el contenido de carbono orgánico (COS) en agregados y fragmentos en función de su tamaño. Las parcelas de tepetates seleccionadas se clasificaron arbitrariamente en las siguientes clases: (I) recién roturadas; (II) afectadas por erosión severa; (III) cultivadas predominantemente bajo monocultivo; (IV) cultivadas con leguminosas durante por lo menos 20 años y con adiciones regulares de $2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de estiércol cada año; (V) cultivadas con labranza mínima y con bajos insumos adicionales; (VI) cultivadas con cereales y leguminosas y adicionando más de $10 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de estiércol por año; (VII) utilizadas como cama de siembra en invernaderos; (VIII) cultivadas bajo labranza mínima y con adiciones de 5 a $10 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de estiércol; (IX) tepetates utilizados como cama de siembra en invernaderos y con adiciones regulares de $2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de compostas de residuos de madera cada año. Adicionalmente se incluyeron dos parcelas de suelos agrícolas como testigos: una bajo labranza convencional (X) y otra sin labranza alguna (IX). Se colectaron 97 muestras de tepetates y cuatro muestras de suelos agrícolas en la cuenca del río Texcoco y en las comunidades aledañas. La prueba de estabilidad de agregados sobreestimó la presencia de agregados estables, dado que no discriminó entre agregados y fragmentos; la dureza de estos

últimos fue una a tres veces superior a los agregados. La cantidad relativa de agregados estables se incrementó con el tiempo bajo cultivo y alcanzó 80% después de 100 años. Los tepetates recién roturados mostraron bajos contenidos de carbono orgánico, mientras que los agregados estables tenían concentraciones entre 1 y 3 veces mayores. La mayor acumulación de COS se observó en agregados pequeños y siguió un comportamiento logarítmico o potencial. Los resultados mostraron que los tepetates habilitados para la producción agrícola tienen alto potencial para secuestrar COS.

Palabras clave: suelos volcánicos endurecidos, tepetates, acumulación de materia orgánica.

1.1. INTRODUCCIÓN

Los tepetates son tobas volcánicas endurecidas por procesos geológicos o pedológicos (Miehlich, 1992; Etchevers *et al.*, 2006). En la naturaleza las capas de estos materiales se encuentran cubiertas por suelos de diversos espesores. Los tepetates se localizan en las zonas con mayor actividad volcánica del país, caracterizadas por condiciones extremas de clima entre el invierno y el verano, como ocurre en el piedemonte del eje neovolcánico de México. Cuando la capa de suelo superficial se pierde por erosión natural o, como ocurre frecuentemente, por actividad humana, los tepetates quedan expuestos. Se ha calculado que las áreas con tepetates expuestos abarcan más de 30 000 km² en el eje neovolcánico de México (Zebrowski, 1992). Las áreas con mayor incidencia de éstos están densamente pobladas y allí existe una apremiante necesidad por tierras de cultivo. Por esa razón, numerosas comunidades marginadas en los estados de México y Tlaxcala que practican agricultura de subsistencia, han convertido estos materiales en tierras de labor desde tiempos antiguos (Hernández-Xolocotzi, 1997).

El endurecimiento natural que han experimentado los materiales volcánicos que dan origen a los tepetates, limita su porosidad; por tanto, la aireación, la infiltración de agua y el establecimiento de especies vegetales se ve limitada. Pero los tepetates pueden incorporarse a la agricultura mediante roturación y prácticas agrícolas adecuadas (Báez *et al.*, 1997; Prat y Báez, 1998; Navarro, 1992; Navarro y Flores, 1997). Un problema común en todos estos materiales es que sus contenidos de N y P son bajos, y que presentan algunas características físicas indeseables (Etchevers *et al.*, 1992). Los problemas nutrimentales pueden corregirse en el corto plazo

mediante la adición de abonos químicos y orgánicos. Sin embargo, el mejoramiento de la estructura física del sustrato requiere de un periodo más largo y de prácticas culturales adecuadas.

Los tepetates recién roturados con maquinaria pesada presentan abundantes poros grandes ($> 120 \mu\text{m}$) y grietas, pero la proporción de poros pequeños y medianos (0.2 a $10 \mu\text{m}$), principales responsables del almacenamiento de agua aprovechable para los cultivos, es escasa. Los primeros pueden reducirse sometiendo el tepetate recientemente roturado a una compactación ligera (Werner, 1992). Este autor mencionó que con dicha práctica se puede generar una porosidad total de aproximadamente 50%, distribuida en: 20% de poros gruesos, 20% de poros medianos y 10% de poros finos. Un problema de los materiales recuperados es que las lluvias intensas provocan la formación de costras superficiales que sellan los poros, reduciendo la infiltración de agua y la aireación (Lauffer *et al.* 1997). Este fenómeno interfiere en la emergencia de semillas pequeñas (cebada, trigo, veza, etc.), retrasa la emergencia de semillas más grandes (maíz, frijol, haba, ayocote etc.) y favorece la erosión y la escorrentía. El sellado de los poros es consecuencia, principalmente, de la ausencia o la debilidad de la estructura del material, lo cual, puede atribuirse a la falta de estabilidad de los agregados y la escasez de carbono, como ocurre en los suelos que se han deteriorado (Angers y Mehuys, 1989; Beare *et al.*, 1994; Elliot, 1986).

El tepetate recién roturado es un material fragmentado constituido por partículas de diversos tamaños, las cuales contienen cantidades extremadamente bajas de carbono. Este elemento contribuye fundamentalmente a la formación de los agregados, de manera similar que en los suelos tradicionales. La formación de agregados estables está relacionada con el mejoramiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas y con la participación de los tepetates habilitados para la agricultura en la captura de carbono. La agregación es el resultado de la unión de las fracciones mineral y orgánica del suelo, por la interacción entre agentes cementantes orgánicos (polímeros naturales, bacterias, hongos), así como inorgánicos (arcillas, carbonatos y sílice) (Tisdall y Oades, 1982). Los agregados con sus distintos tamaños, formas, porosidad, resistencia mecánica y resistencia al agua conforman la estructura del suelo (Kaúrichev, 1984). Como el tepetate recién roturado carece de agregados y su contenido de COS es sólo de trazas (Etchevers *et al.*, 1992), el estudio del cambio que experimentan estas características en diferentes condiciones de manejo agronómico y tiempos de cultivo, permite evaluar la evolución de ambos

y, posiblemente, determinar algunos índices que indiquen la calidad de la estructura del suelo y el potencial para al captura del carbono. Por lo anterior se requiere un mejor entendimiento de los mecanismos responsables de tales procesos. Independientemente de la contribución de los tepetates habilitados para la agricultura al secuestro de carbono, es necesario disponer de alternativas tecnológicas que aseguren el aumento de la concentración de COS en los tepetates habilitados para la producción agrícola, por la importancia que tiene este elemento en el mejoramiento de la estructura física del sustrato.

El objetivo del presente estudio fue evaluar la formación de agregados, la estabilidad de éstos en húmedo y seco, y la distribución del carbono en fracciones de agregados y fragmentos de distinto tamaño, en tepetates con periodos de incorporación al cultivo que van de 0 a aproximadamente 100 años y que han sido sometidos a diferentes manejos.

1.2. MATERIALES Y MÉTODOS

1.2.1. Sitio de estudio

El estudio se realizó con tepetates cultivados, que fueron colectados en la ladera noroccidental de la Sierra Nevada, Estado de México, ($98^{\circ} 45'$ y $98^{\circ} 50'$ de LO y $19^{\circ} 27'$ y $19^{\circ} 32'$ de LN), entre 2300 y 2900 msnm. Esta región presenta un régimen de humedad ústico a údico, con precipitación de 600 a 900 mm por año, concentrada principalmente en verano (Quantin *et al.*, 1993). Se tiene antecedentes orales que los productores de la zona comenzaron a roturar pequeñas parcelas de tepetate con pico y pala a fines del siglo XIX y que, a mediados del siglo XX, se utilizó maquinaria pesada para el mismo fin, pero en baja escala. Fue hasta 1970 que el gobierno federal y estatal llevaron a cabo programas de reforestación a gran escala en áreas degradadas con tepetates aflorados, para proteger de las inundaciones las ciudades y poblaciones localizadas aguas abajo (Pimentel-Bribiesca, 1992). Es gracias a esos trabajos que en la región existen parcelas con tepetate correspondiente a diversos periodos de cultivo y manejos agronómicos.

1.2.2. Muestreo

Con el propósito de recabar información acerca del historial de las parcelas se realizó una encuesta al inicio del trabajo, inquiriendo acerca del tiempo transcurrido desde la habilitación agrícola de las parcelas, el tipo de cultivos empleado, el manejo de los residuos de cosecha y

otros materiales orgánicos. Estos datos no se reportan aquí. Simultáneamente se hizo una caracterización general de los sitios. Del total de las parcelas encuestadas se seleccionaron 93, que contaban con información confiable y que poseían un amplio intervalo de variación de tiempo de cultivo y sistema de manejo. En todas ellas se tomaron, para el análisis de COS, muestras (0 a 20 cm) compuestas 22 submuestras de 0-20 cm de profundidad. Para la evaluación de los agregados y fragmentos se colectaron muestras compuesta por cinco submuestras (8000³). Estas fueron secadas al aire ya temperatura ambiente. Los sistemas de manejo fueron agrupados por similitud con base en el tiempo transcurrido desde su habilitación, la erosión, el manejo, el tipo de rotación, el tipo de labranza y la adición de residuos en nueve clases arbitrarias (Cuadro 1.1).

Cuadro 1.1. Clases de sistemas de manejo de las parcelas experimentales evaluadas en la cuenca del río Texcoco.

Clases	N ₁	N ₂	Sistema de cultivo	Suelo	Descripción
I	4	3	Recién roturado	Tepetate	Tepetate roturado antes de ser cultivado.
II	5	5	Erosión fuerte	Tepetate	Parcelas sin obras de conservación de suelo y muy deterioradas. Evidente la presencia de canalillos y cárcavas.
III	17	12	Monocultivo	Tepetate	Únicamente han sido cultivadas con maíz (<i>Zea mays</i> L.), trigo (<i>Triticum vulgare</i> L.) y cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.), y se retiran los rastrojos.
IV	41	24	Leguminosas o poco estiércol	Tepetate	Se han cultivado gramíneas y leguminosas en asociación o por rotación, y ocasionalmente se agrego estiércol de vacuno. También maíz (<i>Zea mays</i> L.) monocultivos de gramíneas, pero con adición irregular de abonos orgánicos. Se retiran los rastrojos.
V	14	11	Labranza cero	Tepetate	Parcelas cultivadas con agapando (<i>Agapanthus africanus</i> Hoffmans), nopal (<i>Opuntia spp</i>) y maguey (<i>Agave spp</i>). Nunca ha sido removido el suelo.
VI	5	5	Leguminosas y mucho estiércol	Tepetate	Se han cultivado gramíneas y leguminosas en asociación o por rotación, y frecuentemente se agrego estiércol de vacuno. Se retiran los rastrojos.
VII	1	1	Invernadero	Tepetate	Parcelas tratadas como cama invernadero, donde se cultivan plantas de ornato, se incorporan abonos orgánicos y se utiliza el riego.
VIII	8	1	Labranza cero, estiércol y riego	Tepetate	Parcelas cultivadas con agapando (<i>Agapanthus africanus</i> Hoffmans), ciruelo (<i>Prunus domestica</i> L.), peral (<i>Pyrus communis</i> L.) y plantas medicinales. Se agrega ocasionalmente estiércol de vacuno y se utiliza el riego.
IX	2	1	Invernadero con manejo intensivo	Tepetate	Igual que la clase VII, pero además se incorporó madera podrida molida al suelo como abono orgánico, y su uso fue más intensivo.
X	3	0	Referencia de suelo con manejo tradicional	Feozem	Monocultivo de maíz (<i>Zea mays</i> L.), trigo (<i>Triticum vulgare</i> L.) y cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.).
XI	1	0	Referencia de suelo con cultivos perennes	Andosol	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

N₁: número de muestras compuestas por 22 submuestras de 0 a 20 cm de profundidad para análisis químico
N₂: número de muestras inalteradas de 8000³ para la evaluación de las determinaciones físicas.

1.2.3. Evaluación de agregados y fragmentos

Las muestras se tamizaron para obtener 13 fracciones (agregados y fragmentos) de diferentes tamaño: <50.8-31.7>, <31.7-22.2>, <22.2-11.5>, <11.5-6.35>, <6.35-4.76>, <4.76-3.36>, <3.36-2.00>, <2.00-1.00>, <1.00-0.46>, <0.46-0.25>, <0.25-0.10>, <0.10-0.05> y < 0.05 mm. A cada fracción se le determinó la estabilidad de agregados en seco y en húmedo mediante el método de Kemper y Rosenau (1986) y la concentración de C mediante combustión seca (Shimadzu, modelo TOC-5050A). También se midió la proporción de agregados y fragmentos presentes en las siguientes fracciones: >50.3 mm, <50.3-22.2> mm, <22.2-11.3> mm, <11.3-6.30> mm, <6.30-4.25> mm, y <4.25-3.36> mm. La diferenciación entre fragmentos y agregados se hizo visualmente y de acuerdo a la dureza de las mismas, que se midió con un penetrómetro manual. Se analizó la relación existente entre las clases de manejo agronómico y el C, tanto en el sustrato original, como en los fragmentos y agregados. Por último se evaluó la producción de agregados a lo largo de los años de cultivo.

1.2.4. Análisis de datos

En razón de la naturaleza del experimento no se contó con repeticiones en todos los casos. Donde fue posible, se calculó la desviación estándar asociada a la media. Las medias de las variables de respuesta analizadas fueron utilizadas para establecer las relaciones entre las clases de manejo y la estabilidad de los agregados en seco y en húmedo, el diámetro medio de las fracciones separadas y su dureza, y el porcentaje de carbono.

1.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.3.1. Estabilidad de los fragmentos y agregados

La prueba de estabilidad de agregados en húmedo (EAH) y en seco (EAS) estableció que ésta fue de buena a excelente, según el sistema de clasificación de Kaúrichev (1984) (Figura 1.1). La prueba EAH simula fuerzas de desintegración y cuantifica la cantidad de agregados resistentes a dichas fuerzas (Montenegro y Malagón, 1990). Sin embargo, los resultados presentados deben analizarse con reserva debido a que la estabilidad reportada no debe atribuirse exclusivamente a los agregados, ya que las fracciones del sustrato también contenían fragmentos del material original, mismos que no satisfacen el criterio para ser clasificados como agregados.

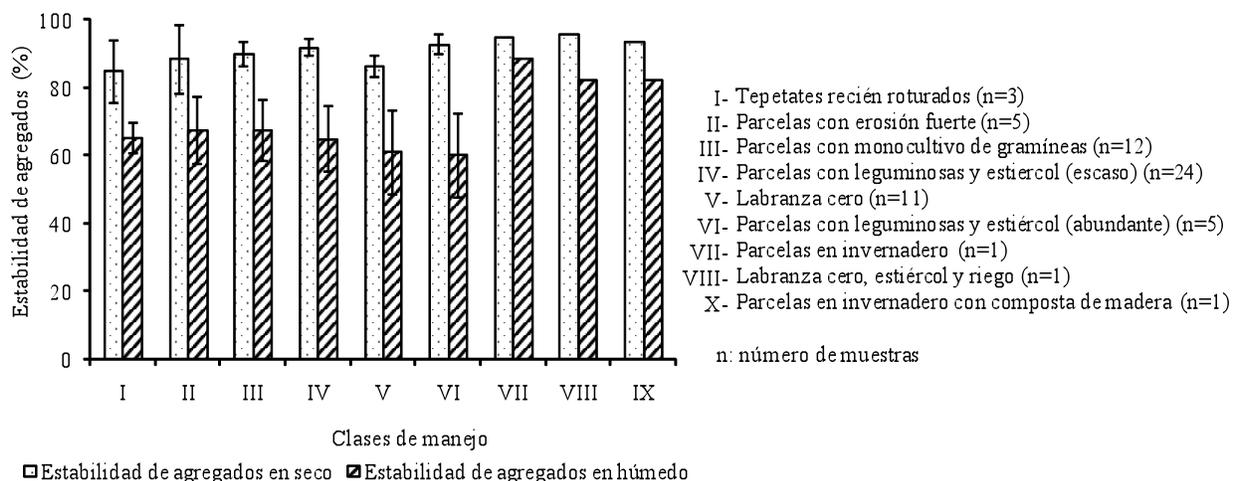


Figura 1.1. Estabilidad de agregados en húmedo y estabilidad de agregados en seco en tepetates cultivados de la cuenca del río Texcoco. Barras de error (n=3) indican la desviación estándar.

Los agregados de las clases de manejo II, III, IV y VI, en las que se practicó labranza convencional (barbecho, rastreo, surcado y aporque), no resistieron la prueba de EAH. En los tamices era posible distinguir visualmente remanentes de fragmento. Los fragmentos resultaron resistentes a las fuerzas vibratorias y al humedecimiento, por su consistencia y dureza, que en promedio fue de 1 a 3 veces mayor que la de los agregados. El C acumulado en estas clases de manejo varió desde trazas hasta 2%.

Agregados con consistencia suficiente para resistir la prueba de EAH se observaron en los sistemas agrícolas con labranza cero y en aquellos manejados bajo camas de invernadero (clases de manejo VII, VIII y IX). La cantidad de agregados resistentes fue sin embargo baja (12 a 15% mayor que en los casos anteriores). Estos resultados estuvieron influenciados, nuevamente, por la presencia de fragmentos del mismo tamaño que los agregados. La clase VIII correspondió a una parcela sin ningún tipo de labranza, cultivada con plantas ornamentales (agapando), medicinales y frutales por más de 60 años, con riego y con adición regular de abonos orgánicos.

Los sistemas agrícolas que mostraron mayor EAH, también tuvieron la mayor concentración de COS en las fracciones. Esto confirma la relación entre este elemento y la estabilidad de agregados (Denis y Claire, 1998; Jastrow y Miller 1998). Las prácticas inadecuadas de manejo constituyen la principal causa de pérdida de carbono y del deterioro de la estructura del suelo. Éstas provocan que el sustrato se desintegre y los agregados expuestos a las fuerzas producidas por la labranza, la erosión, el humedecimiento y secado se pulvericen (Mann, 1986). En el caso

de los tepetates manejados tradicionalmente, la falta de obras de conservación, la excesiva labranza, la siembra constante de gramíneas, el retiro de los esquilmos agrícolas y la escasa o nula incorporación de materia orgánica, constituyen los principales factores que limitan la formación de agregados estables.

1.3.2. Porcentaje de C y su distribución por tamaño partícula

La concentración de C en los diferentes tamaños de partículas (agregados más fragmentos) mostró un patrón de comportamiento definido en todos los sistemas de manejo: fue mayor a medida que disminuía el tamaño de partícula (Figura 1.2).

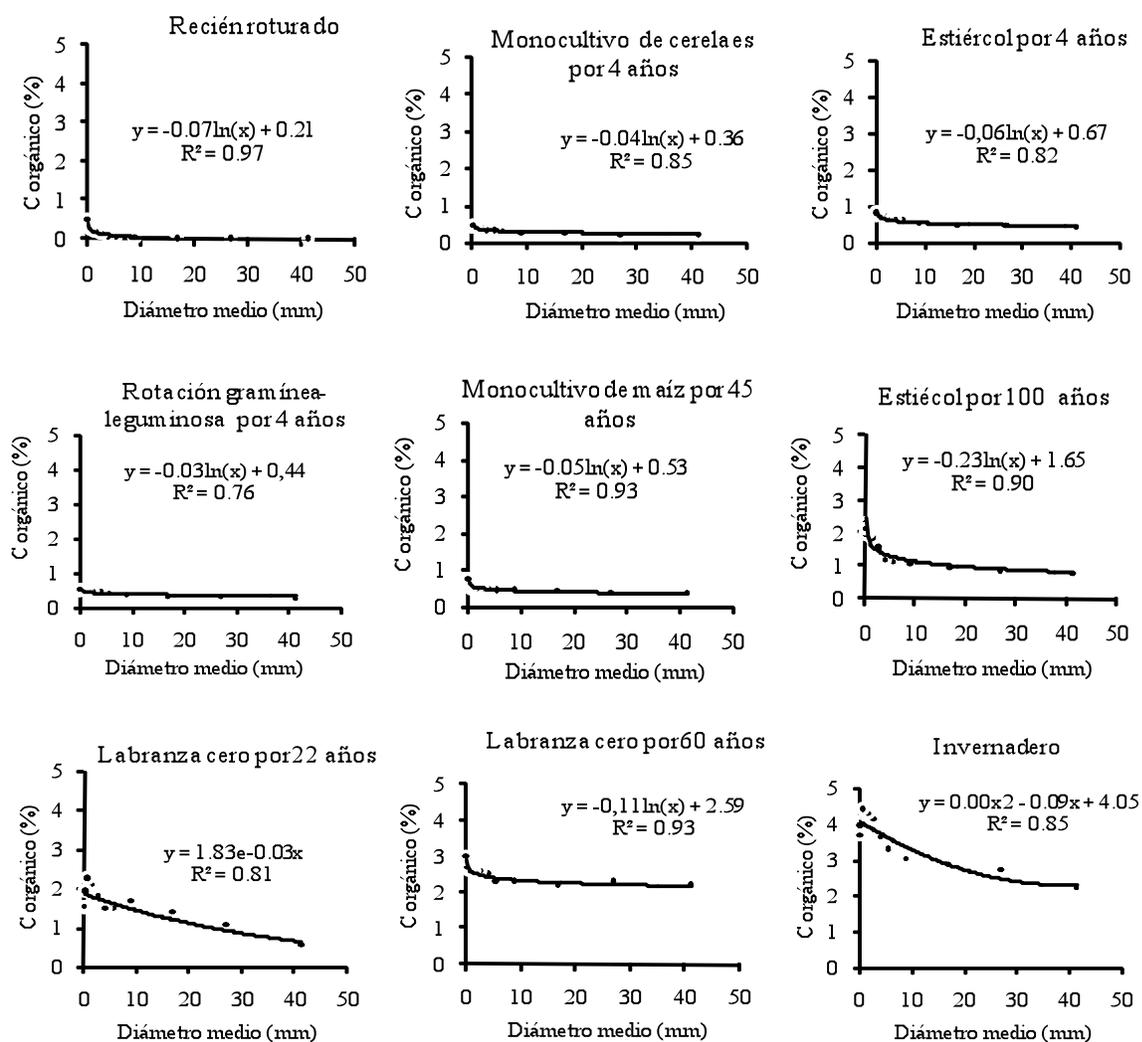


Figura 1.2. Carbono orgánico y diámetro medio de partícula en distintos sistemas agrícolas en tepetates cultivados.

Los coeficientes de ajuste de los modelos empleados fueron relativamente altos ($R^2 > 0.80$). Las diferencias en el porcentaje de COS entre las partículas >10 mm en los sistemas de agrícolas, fueron más pequeñas, pero a medida que el tamaño de partícula (<10 mm) disminuyó, las diferencias tendieron a ser mayores. El aumento en el porcentaje de COS fue mayor a partir de los diámetros de partículas inferiores a 3 o 4 mm, pero la máxima acumulación ocurrió en las fracciones <0.25 mm. Los modelos explicativos de esta tendencia fueron logarítmicos, potenciales y exponenciales negativos.

Fue evidente que el manejo agronómico influyó en el grado de acumulación de COS. El tepetate recién roturado presentó solamente trazas de C, en tanto que el manejo de este sustrato en invernadero, alcanzó hasta 4.5% de COS en las partículas más finas.

1.3.3. Acumulación de carbono en fragmentos y agregados

La acumulación de COS en fragmentos y agregados mostró una clara diferencia entre el en las fracciones con diámetro comprendido entre $<50.3-22.2>$ mm, $<22.2-11.3>$ mm, $<11.3-6.30>$ mm, $<6.30-4.25>$ mm, y $<4.25-3.36>$ mm. y $<3.36-2.00>$ mm (Figura 1.3). En el tepetate recién roturado, cuyo sustrato solamente contenía fragmentos, prácticamente no se detectó COS. De manera general los fragmentos siempre mostraron menor acumulación de este elemento que los agregados, en todas las clases de manejo. El COS aumentó de manera logarítmica, en la mayoría de los casos, a medida que el tamaño de la partícula disminuyó. El comportamiento siguió la misma tendencia tanto en los fragmentos como en los agregados. La diferencia de COS acumulado entre ambas dependió del manejo agronómico. En el monocultivo de cereales ésta fue muy baja, mientras que en el manejo con cama invernadero, los agregados acumularon tres veces más carbono que los fragmentos. La tendencia de acumulación tuvo un comportamiento muy consistente, mostrando que el COS tendió a acumularse mayormente en las partículas inferiores a 10 mm. Kong *et al.*, 2005 mencionaron que COS tiende a acumularse mayormente en microagregados.

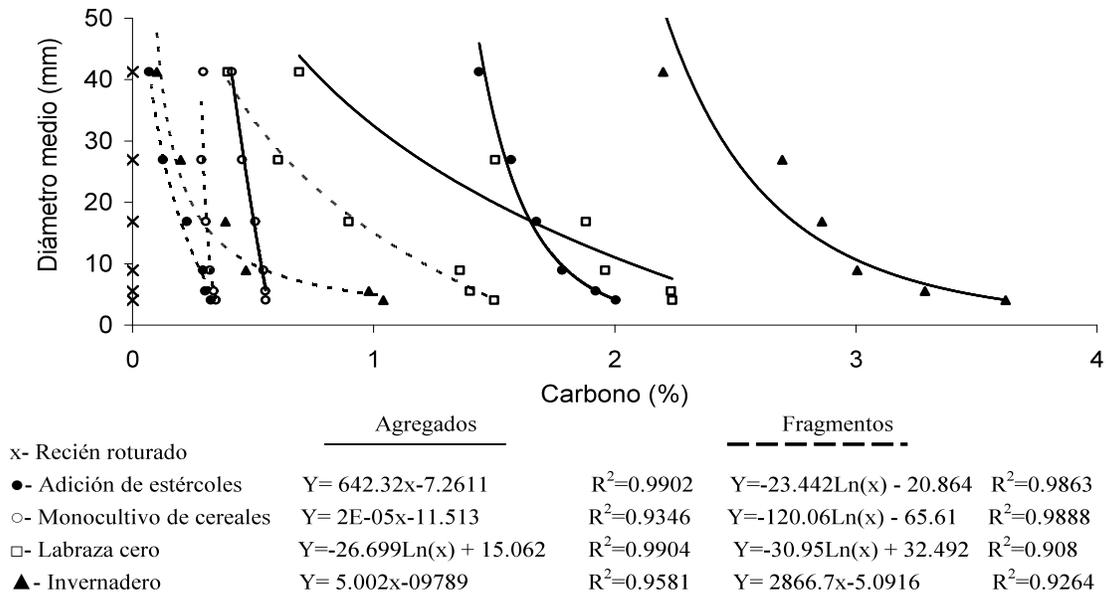


Figura 1.3. Acumulación de C total en fragmentos y agregados en seis tamaños diferentes de partícula.

1.3.4. Dureza de fragmentos y agregados

La dureza (resistencia al rompimiento al aplicar una cantidad de fuerza determinada) de los fragmentos y agregados aumentó de manera logarítmica (R^2 de 0.97 a 0.99) al incrementarse el diámetro medio de las partículas (Figura 1.4). En la mayoría de los casos (clases de manejo con labranza convencional), los fragmentos mostraron mayor dureza que los agregados, y a medida que se incrementó el diámetro de las partículas, ésta también aumentó. El sistema con labranza cero por 20 años mostró una dureza semejante entre ambas fracciones, mientras que los sistemas de manejo agrícola con labranza cero por 60 años y bajo cama invernadero, tuvieron una dureza de agregados mayor que los fragmentos. Fue evidente que los agregados sometidos bajo estos sistemas de cultivo tuvieron una mayor acumulación de C orgánico (Figura 1.5). Este elemento influyó en la dureza y estabilidad de los agregados. Lo anterior se explica porque los agregados bajo esas condiciones no son sometidos a la continua destrucción y pulverización ocasionada por las labores agrícolas, como ocurre con las prácticas que se realizan comúnmente en los sistemas con labranza convencional.

En la Figura 1.5 se presenta la relación que hubo entre la dureza de los agregados y fragmentos en los diámetros medios: 4, 6, 9, 17, 27 y 41 mm, y el porcentaje de C orgánico en los mismos

sistemas de cultivo presentados en la Figura 1.4. Los modelos estadísticos se ajustaron, en la mayoría de los casos, a tendencias lineales con R^2 de 0.77 a 0.96.

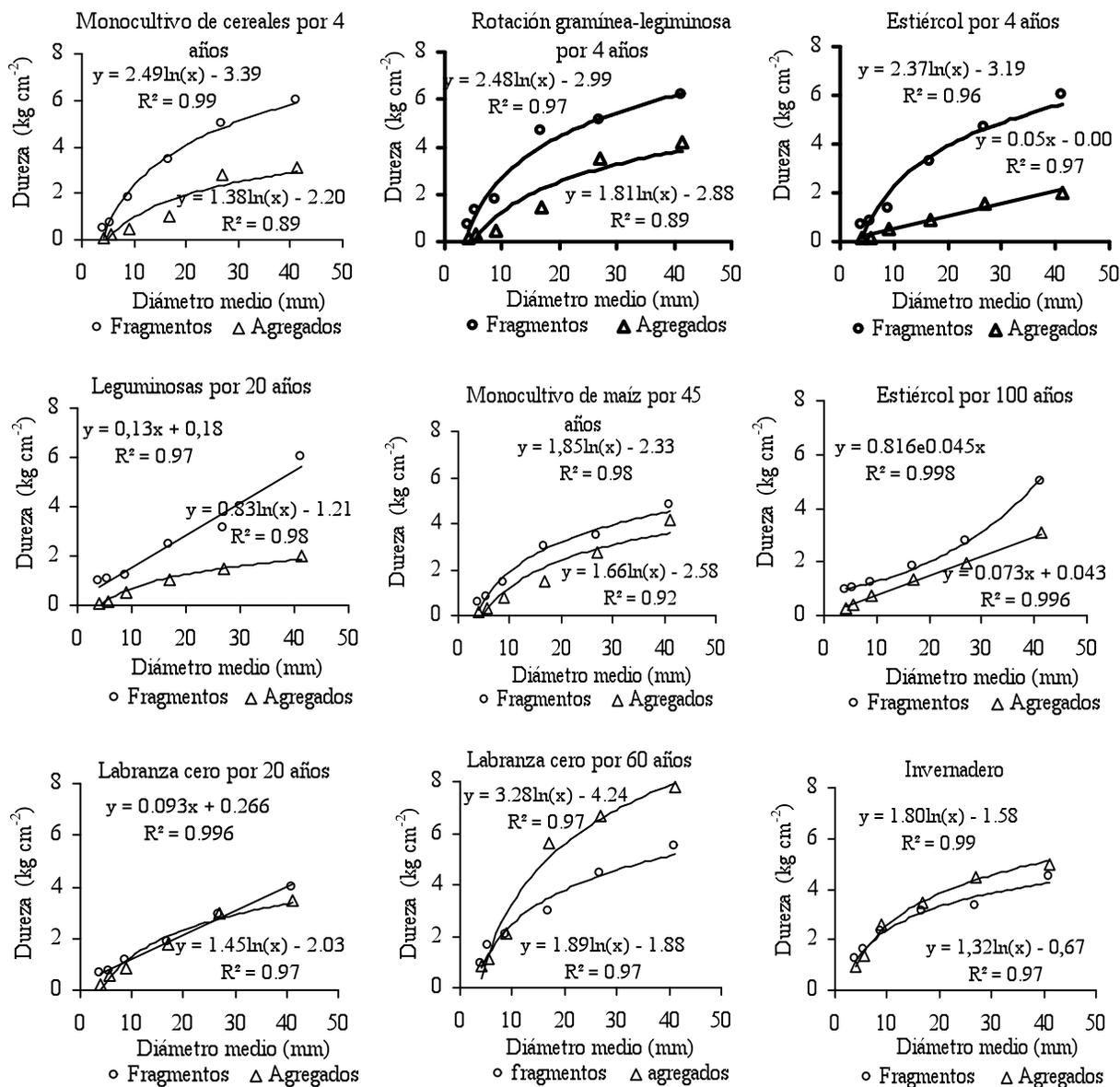


Figura 1.4. Relación entre dureza y diámetro medio ponderado en nueve sistemas específicos de manejo agronómico y tiempo de cultivo.

Se observó que los agregados, en general, acumularon de 1 a 3 veces más COS que los fragmentos y que su dureza disminuyó a medida que aumentaba la concentración de COS. Esto denota la inestabilidad de los agregados en los sistemas de cultivo donde se realizaron prácticas de labranza convencional. La mayoría de los datos se ajustó a modelos lineales, sin embargo, hubo un caso en el que la tendencia fue logarítmica; esta correspondió a un sitio donde se

cultivaron leguminosas por 20 años. La naturaleza física de esta parcela fue diferente (tepetate blanco) al resto; la dureza de los fragmentos fue mayor que en los otros tepetates y la dureza de los agregados fue muy débil. El grado de dureza del tepetate en su condición natural influye de manera determinante en las características físicas después de roturados. Se reconocen dos tipos de tepetate de acuerdo a su grado de dureza: fragipán y duripán (Zebrowski, 1992). El primero es duro cuando seco, pero se reblandece cuando húmedo y el segundo es duro tanto en estado seco, como húmedo. El tepetate tipo fragipán es más susceptible de habilitar para la producción agrícola.

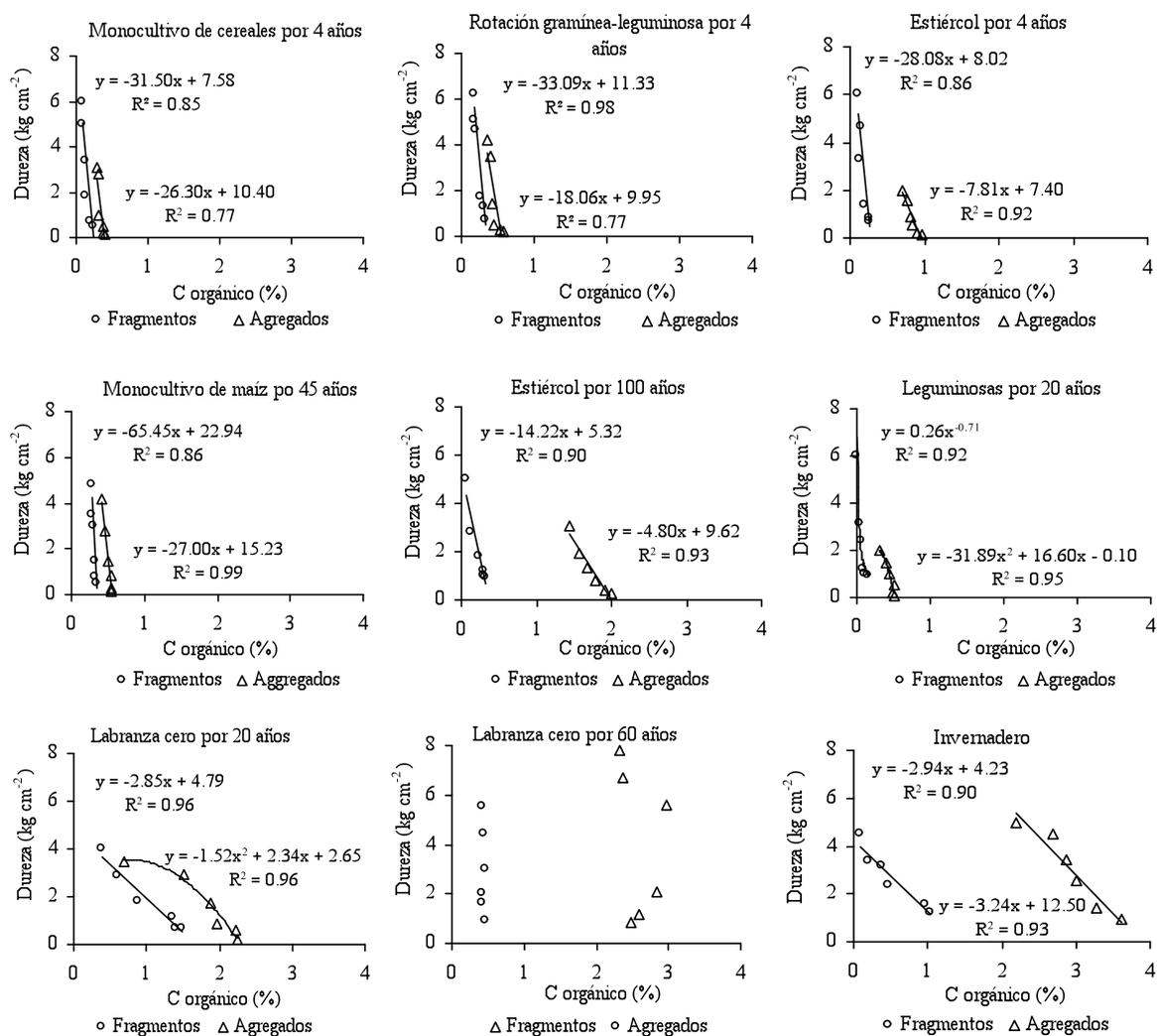


Figura 1.5. Relación entre dureza de los agregados y fragmentos y la concentración de carbono orgánico en tepetates cultivados con diverso manejo agronómico y tiempo de cultivo.

1.3.5. Clases de manejo agronómico y carbono orgánico

La concentración de COS estuvo estrechamente relacionada con las clases de manejo agronómico establecidas. Esto ha sido previamente mostrado por Báez-Pérez *et al.* (2002). Los tepetates recién roturados y los que habían experimentado una intensa erosión (Clase I y II), presentaron sólo trazas de COS (Figura 1.6). El uso continuo por años de gramíneas en monocultivo, en especial maíz (Clase III), no produjo un aumento importante en la concentración de estos elementos en los tepetates cultivados. El retiro de los rastrojos de los cultivos, que habitualmente realizan los campesinos (se utilizan como forraje), así como los escasos rendimientos de grano y, por ende, de biomasa y la casi nula incorporación de abonos orgánicos, explicarían la baja la acumulación de COS en esta clase de manejo agrícola. El uso de especies leguminosas en los sistemas de producción (Clase IV) y la incorporación de abonos orgánicos favorecieron la acumulación de COS en los tepetates, pero en cantidades inferiores a las que pudieran esperarse. En contraste, donde se practicó la labranza cero (Clase V), se acumuló aproximadamente el doble de COS que en la Clase IV. Este comportamiento se atribuyó al tipo de labranza. Mientras que en la labranza tradicional (rastreo, barbecho, surcado y aporque) se favoreció la oxidación de COS y las pérdida de éste en forma de CO₂. En la labranza cero la materia orgánica (MO) que se deja en la superficie del suelo reduce la evaporación, la temperatura y el intercambio de gases que interviene en la oxidación biológica de la MO (Reicosky y Lindstrom, 1993). La descomposición de los residuos orgánicos en la superficie del suelo es más lenta que cuando éstos se incorporan por la labranza, ya que se reduce el contacto con los microorganismos del suelo (Edwards *et al.*, 1992). Esto se evidenció al observar la cantidad de COS en el sistema con leguminosas y mucho estiércol (Clase VI), donde la frecuencia de aplicación de MO fue mayor que en la Clase V. Sin embargo, ambas clases tuvieron un porcentaje de COS semejante, aunque en la Clase V se incorporó menos MO, pero no se labró el suelo. Los tepetates que se emplean como sustratos de invernadero y que se riegan de manera continua (Clase VII), tuvieron una acumulación de COS aproximadamente 15% mayor que las Clases V y VI. Fue evidente que las condiciones de temperatura y humedad en invernadero fueron más intensas que en los casos anteriores, lo cual favoreció la acumulación y el secuestro de carbono en el corto plazo. La concentración de COS orgánico de los tepetates empleados como sustrato de invernadero, los cuales con frecuencia se riegan y se les incorporan abonos orgánicos y se someten a intenso laboreo (Clase IX), se vio favorecida considerablemente. Una de las enmiendas orgánicas usadas para aportar COS en esta

clase, es la composta de madera de pino, la cual recibió un tratamiento especial de secado y molido antes de incorporarse.

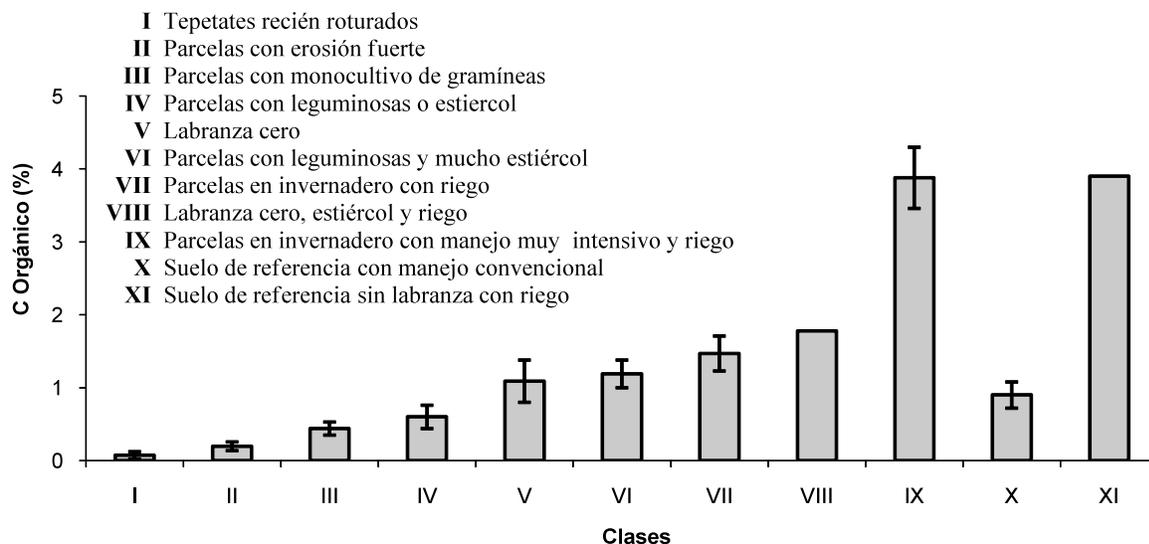


Figura 1.6. Contenido de carbono orgánico en tepetates cultivados según el manejo agronómico.

En la Figura 1.7 se presentan nueve casos particulares, seleccionados por ser representativos de la una clase manejo, que muestra la diferencia de concentración de COS entre agregados y fragmentos.

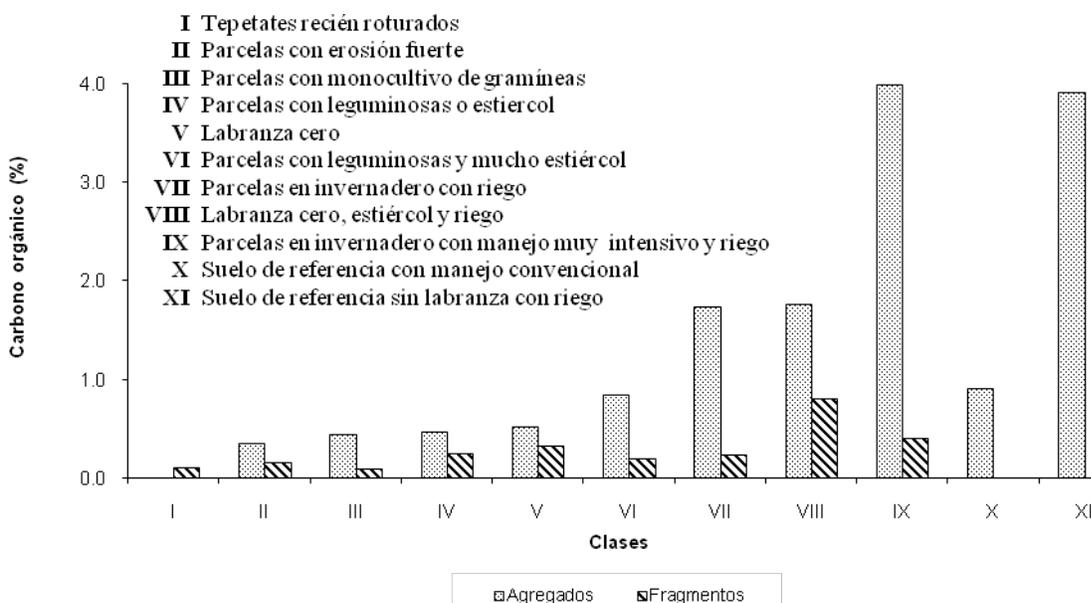


Figura 1.7. Contenido de carbono orgánico en tepetates cultivados en fragmentos y agregados según el manejo agronómico.

En el tepetate recién roturado, donde no hubo agregados, solamente se encontraron trazas de COS en los fragmentos que constituyen el sustrato. En los tepetates cultivados se encontró que este elemento se acumuló mayormente en los agregados. El C acumulado en éstos dependió del tiempo del cultivo y el manejo agronómico de cada caso en particular: fue muy escaso en los sistemas agrícolas con monocultivo de cereales y aumentó donde se incorporaron regularmente abonos orgánicos. La labranza cero presentó una mayor eficiencia en acumulación de COS y fue semejante a lo encontrado en el sistema agrícola con más de 100 años de cultivo e incorporación regular de estiércol. En los sistemas agrícolas con labranza convencional se favorece la oxidación de COS y la cero labranza la reduce, como se explicó anteriormente. Cabe resaltar que, en la labranza cero (parcela cultivada con *Agapanthus africanus* Hoffmans, por más de 20 años), los fragmentos tuvieron más del doble de C que los otros sistemas agrícolas. Esas plantas producen abundantes y vigorosas raíces, capaces de penetrar los fragmentos de tepetate. Este hecho fue visible a simple vista en los fragmentos de tepetate más grandes y también en los más pequeños cuando fueron observados en el microscopio. Se infirió que el contacto directo de las raíces del agapando con los fragmentos de tepetate, favoreció la actividad biológica y la acumulación de carbono. Este tipo de procesos han sido estudiados por De-León-González *et al.* (2006).

1.3.6. Producción de agregados y tiempo de cultivo

La evolución de la estructura del tepetate después de la roturación mecánica, estuvo influenciada por el aumento de la actividad biológica y la producción de agregados del suelo. En la Figura 1.8 se presenta la evaluación de agregados y fragmentos en parcelas de tepetate cultivado con manejo convencional, uso de leguminosas y aplicación regular de abonos orgánicos. Comprende un intervalo que va desde recién roturado (cero años) hasta aproximadamente 100 años de cultivo en varias parcelas identificadas en la comunidad de Santo Tomas Apipilhuasco, Estado de México. Se observó un aumento logarítmico en la producción de agregados > 3.36 mm, que inició con cero por ciento en el tepetate recién roturado y llegó hasta 80% después de 100 años de cultivo. La cantidad de agregados estables en seco aumentó relativamente rápido durante los primeros 5 años de cultivo, pero luego dicho aumento fue más lento. Los fragmentos, por su parte, disminuyeron de una manera inversa al aumento de agregados.

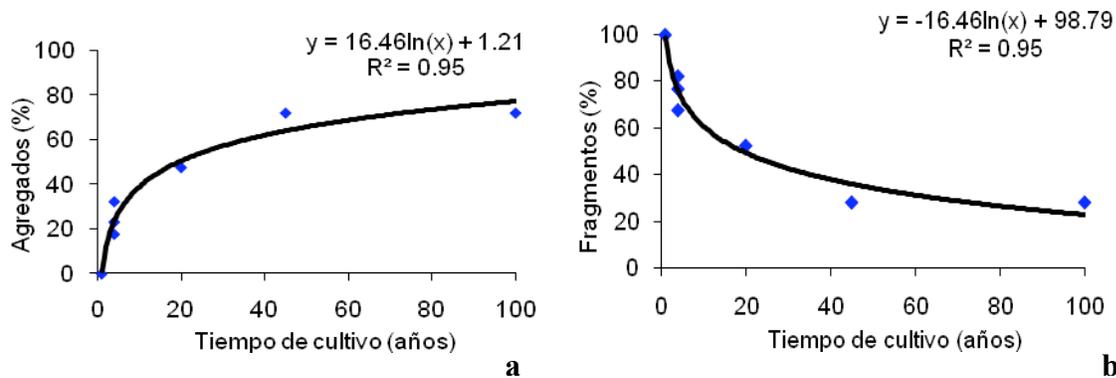


Figura 1.8. Evolución de agregados (a) y fragmentos (b) mayores de 3.36 mm a través del tiempo en tepetates cultivados.

La producción de agregados comienza al favorecerse la penetración de las raíces de las plantas, el agua y el oxígeno, que incrementan la reproducción de organismos del suelo como anélidos, insectos, microflora y microfauna que produce un aumento en la actividad biológica (Álvarez-Solís *et al.*, 2000). La generación de exudados radicales, excretas, secreciones y sustancias orgánicas derivadas de los distintos grados de descomposición de la MO (fenoles, polisacáridos, ácidos húmicos, ácidos fúlvicos, etc.) producen agentes cementantes orgánicos como polisacáridos gomosos. Estos últimos al combinarse con las partículas del suelo, forman complejos orgánico-minerales que aglutinan las partículas del suelo para formar los agregados del suelo (Oades y Waters, 1991). La velocidad de formación de éstos depende también en gran medida de la temperatura y humedad, que a su vez determinan la intensidad de la actividad biológica. En el caso de los tepetates cultivados, las labores agrícolas asociadas a la labranza convencional (barbecho, rastreo, aporque) tienen un impacto más destructivo sobre los agregados que en otros tipos de suelo. Los tepetates no son propiamente suelos, sino sustratos que pueden acondicionarse artificialmente para practicar la agricultura. La producción de agregados se encuentra limitada por su continua desintegración y pulverización en estas condiciones. El mejoramiento de las propiedades físicas químicas y biológicas de los tepetates cultivados y su gradual conversión a suelo agrícola, está intrínsecamente ligado con la formación y estabilidad de agregados. Sin embargo, con empleo moderado de insumos agrícolas y algunas prácticas de conservación de suelo se pueden obtener rendimientos de cereales y algunas leguminosas como frijol y haba semejantes a lo obtenido en un suelo agrícola (Báez *et al.*, 1997; Navarro y Flores 2002).

1.4. CONCLUSIONES

La prueba de estabilidad de agregados fue sobreestimada por la presencia de los fragmentos de tepetates. La dureza de estos últimos fluctuó desde menos de 0.5 kg cm^{-2} en fragmentos <3.36 mm hasta más de 6 kg cm^{-2} en fragmentos >40 mm. En los agregados la dureza fue $<0.1 \text{ kg cm}^{-2}$ en partículas <3.36 hasta 4 kg cm^{-2} en agregados >40 mm. La formación de agregados y su estabilidad también estuvieron influenciadas por las prácticas de manejo. Los agregados fueron las unidades donde se acumuló mayormente el COS. Los fragmentos de tepetate solamente contenían trazas de COS, mientras que los agregados tuvieron de 1 a 3 veces más C que los fragmentos. De manera global estos últimos tuvieron una dureza de 1 a 3 veces mayor que los agregados. Los sistemas agrícolas más eficientes para almacenar C fueron: labranza cero y los tepetates empleados como cama de invernadero, con una acumulación promedio de 3 y 4% de COS, respectivamente. Estos fueron los únicos sistemas agrícolas que tuvieron una dureza de agregados igual o mayor que la de los fragmentos. La proporción de agregados aumentó de manera logarítmica en función de los años de cultivo, alcanzando 80% después de 100 años, mientras que la proporción de fragmentos disminuyó de manera inversa. La acumulación de COS aumentó a medida que disminuyó el tamaño de partícula; dicha variación se ajustó a modelos logarítmicos o potenciales. Los resultados de este estudio muestran que los tepetates tienen potencial para almacenar carbono y su nivel de acumulación depende en gran medida de las prácticas de cultivo.

1.5. LITERATURA CITADA

- Álvarez-Solís J.D., R. Ferrera-Cerrato y J.D. Etchevers, 2000. Actividad microbiana en tepetates con incorporación de residuos orgánicos. *Agrociencia* 34:523-532.
- Angers, D.A., and G.R. Mehuys. 1989. Effects of cropping on carbohydrate content and water stable aggregation of a clay soil. *Canadian Journal of Soil Science* 69:373-380.
- Angers, D.A., and C. Chenu. 1998. Dynamics of soil aggregation and C sequestration. *In: Lal, R., J.M. Kimble, R.F. Follet, and B.A. Stewart (eds.). Soil Processes and the carbon cycle.* CRC Press. Boca Raton, Florida, pp: 199-205.

- Báez, A., E. Ascencio-Zapata., C. Prat y A. Márquez, 1997. Análisis del comportamiento de cultivos en tepetate t3 incorporado a la agricultura de temporal, Texcoco, México. *In: III Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. Zebrowski, C., P. Quantin y G. Trujillo (eds.). ORSTOM. Quito, Ecuador, pp: 296-310.
- Báez, A., E. Ascencio, C. Prat et A. Márquez. 1998. Conditions de mise en culture d'un tuf volcanique induré (*tepetate*) au Mexique, *in 16th World Congress of Soil Science, Proceedings (in CDROM): Montpellier, Francia, Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM)*. Enregistrement scientifique n° 2547, Symposium n° 38.
- 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. 2007. Manejo agronómico de los suelos endurecidos (tepetates) del eje neovolcánico de México. *In: La captura de carbono en ecosistemas terrestres Iberoamericanos*. Gallardo-Lancho, J. (ed.). Sociedad Iberoamericana de Física y Química Ambiental. Salamanca, España, pp: 69-84.
- Beare M., H., F. Heldrix and C. Coleman. 1994. Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional and no tillage soil. *Soil Science Society of America Journal* 58:777-786.
- De León-González, F., E. Celada-Tornel, C. Hidalgo, J.D Etchevers, M.C. Gutiérrez-Castorena, and A. Flores-Macías. 2006. Root-soil adhesion as affected by crops species in a volcanic sandy soil of Mexico: *Soil and Tillage Research* 90:77-86.
- Denis, A., and C. Claire. 1998. Dynamic of soil aggregation and C sequestration. *In: Soil Processes and the carbon cycle*. CRC Press. Boca Raton, Florida, pp: 199-205.
- Edwards, J. H., C. W. Wood, D. L.Thurlow and M. E., Ruf, 1992. Tillage and crop rotation effects on fertility status of a Hapludult soil. *Soil Science Society of America Journal* 56:1577-1582.
- Elliot, E T. 1986. Aggregates structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated. *Soil Science Society of America Journal* 50:627-633.
- Etchevers, J.D., H.L.Cruz, A.J. Mares y C. Zebrowski. 1992. Fertilidad actual y potencial de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada (México). *Terra* 10 (Número especial):379-384.

- Etchevers, J.D., C. Hidalgo, C. Prat, and P. Quantin. 2006. Tepetates of Mexico. *In: Encyclopedia of Soil Science*. Lal, R. (Ed.). Marcel Dekker, New York, USA, pp. 1745-1748.
- Hernández-Xolocotzi., E. 1987. Etnobotánica de Tlaxcala. Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. *In: Ruiz, F. (ed.)*. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, pp: 1-8.
- Jastrow, J.D., and R.M. Miller. 1998. Soil aggregate stabilization and carbon sequestration Feedbacks through organomineral associations. *in: Soil processes and the carbon cycle*. Lal, R., J.M. Kimble, R.F. Follet, and B.A. Stewart (eds.). CRC Press. Boca Raton, Florida, pp. 207-223.
- Kaurichev, I.S. 1984. Prácticas de edafología: Editorial Mir. Moscú, Rusia, pp: 79-85.
- Kemper, W.D., and R.C.Rosenau. 1986. Aggregates stability and size distribution. *In: Methods of Soil analysis, part 1: physical and mineralogical methods*. Klute, A. (ed.). Society of Agronomy (ASA). Agronomy Monographs 9(1), 2nd edition. Madison, WI, American, pp: 425-442.
- Kong, A.Y., J. Six, D.C. Bryant, R. F Denison, and C. van Kessel. 2005. The relationship between carbon input, aggregates and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems: *Soil Science Society of America Journal* 69:1078-1085.
- Lauffer, M., Y. Leroux, C. Prat y J. L. Janeau. 1997. Organización superficial de los tepetates cultivados, Texcoco (México). *In: III Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. Zebrowski, C., P. Quantin y G. Trujillo (eds.). ORSTOM. Quito, Ecuador, pp: 446-456.
- Mann, L. K. 1986. Changes in soil carbon storage after cultivation. *Soil Science*. 142:279-288.
- Miehlich, G., 1992. Formation and properties of tepetate in the central highlands of Mexico. *Terra* 10 (Número especial): 136-144.
- Montenegro, H. y D. Malagón. 1990. Propiedades físicas de los suelos. Instituto Geográfico “Agustín Codazzi”, Subdirección Agroecológica. Bogotá, Colombia, pp: 183-228.
- Navarro, H. y C. Zebrowski. 1992. Análisis agronómico comparativo en tepetates. *Terra* 10 (Número especial): 451-459.
- Navarro, H y D. Flores. 1997. Manejo agronómico diferencial de la asociación maíz-haba en tepetate de quinto año de uso agrícola. *In: III Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y*

- Endurecidos. Zebrowski, C., P. Quantin, y G. Trujillo. (*eds.*). ORSTOM. Quito, Ecuador, pp: 287-295.
- Oades, J.M., and G.A.Waters. 1991, Aggregates hierarchy in soil. *Australian Journal Soil Research*. 29:815-828.
- Pimentel-Bribiesca, L. 1992. Como hacer productivos los tepetates en México. *Terra* 10 (Número especial): 15-23.
- Quantin, P., H. Arias, J. D. Etchevers, R. Ferrera, K. Olechko, H. Navarro, G. Wernern y C. Zebrowski. 1993. Tepetates de México: Caracterización y habilitación para la agricultura. *Terra* 11:33-34.
- Reicosky, D., and M. Lindstrom. 1993. Effect of fall tillage on short term carbon dioxide flux from soil. *Agronomy Journal* 85:1237-1243.
- Tisdall, J. and J. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates. *Journal of Soil Science* 33:141-163.
- Werner, G. 1992. Suelos volcánicos endurecidos (tepetates) en el estado de Tlaxcala: distribución, rehabilitación, manejo y conservación. *Terra* 10 (Número especial): 318-331.
- Zebrowski, C. 1992. Los suelos volcánicos endurecidos de América Latina. *Terra* 10 (Número especial): 15-23.

CAPITULO II. CARBONO ASOCIADO CON LA EROSIÓN HÍDRICA Y LAS EMISIONES DE CO₂ EN TEPETATES (SUELOS VOLCÁNICOS ENDURECIDOS) HABILITADOS PARA LA AGRICULTURA EN TLAXCALA, MÉXICO

RESUMEN

Los tepetates en el estado de Tlaxcala cubren 54% de su superficie y en una quinta parte de ésta se encuentran aflorando, debido a la pérdida de la capa de suelo que los cubría. La erosión hídrica, provocada por la deforestación y el cambio de uso de suelo, es la principal causa. Como se ha explicado anteriormente, los tepetates son improductivos y su afloramiento indica un grave deterioro del entorno ecológico. Sin embargo, éstos pueden constituir una importante reserva de tierra si se roturan y acondicionan para la agricultura. La conversión de tepetates a suelo fértil implica un mejoramiento sustancial de sus características físicas, químicas y biológicas. El C orgánico (COS) es un elemento indispensable para este propósito. Se ha expuesto en capítulos anteriores que los tepetates constituyen un almacén disponible para secuestrar carbono atmosférico, sin embargo, la tasa de acumulación del mismo es baja, aún después de cultivarlos por décadas y de haber adicionado frecuentemente abonos orgánicos. El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la pérdida de COS en sustratos de tepetate habilitados para la producción agrícola por efecto de la mineralización y la erosión hídrica. Los tratamientos evaluados fueron: tradicional (Tr), monocultivos con bajo nivel de insumos inorgánicos; tradicional mejorado (TM), con cultivos asociados, coberturas con residuos de cosecha y uso moderado de agroquímicos; orgánico (Or), cultivos asociados utilizando fuentes orgánicas como fertilizante. Estas parcelas tenían 15 años de cultivo al iniciar las evaluaciones. Dos parcelas más fueron roturadas para este experimento: recién roturada con manejo tradicional (RT) y recién roturada con manejo orgánico (RO). Se consideraron dos ecosistemas naturales como referencia: pastizal natural (Pn) y matorral natral (Mn); y un lecho de tepetate expuesto (TE). Se evaluó la tasa de emisión de CO₂ (TEC) mediante un sensor infrarrojo EGM-4 PP-system y la humedad volumétrica mediante un TDR que fue previamente calibrado. La pérdida de COS por erosión se midió solamente en Tr, TM, Or, RC y RO, tratamientos equipados con vertedores y tanque de almacenamiento para medir el volumen de escurrimiento y la masa de sedimentos arrastrados. La TEC fue de tres a cinco veces mayor en los mese más lluviosos (julio a octubre) comparado con los meses más secos (diciembre a marzo). La TEC se relacionó estrechamente con la HV ($r=0.78$ a 0.90). Pn y Mn tuvieron la mayor TEC y TE la menor. Los tratamientos Pn, Mn y Or con mayor contenido de COS, también tuvieron un potencial de mineralización mayor. El COS asociado a la

erosión hídrica fluctúa de 17 a 85 kg ha⁻¹ año⁻¹. De manera global la pérdida del COS se relacionó de forma logarítmica con el volumen de sedimentos arrastrados ($R^2= 0.97$), de igual forma que con el volumen de escurrimiento ($R^2=0.93$).

Palabras clave: secuestro de carbono, suelos deteriorados, cambio climático global.

2.1. INTRODUCCIÓN

Una limitación seria que exhibe el Estado de Tlaxcala para la producción agrícola, es el alto grado de degradación que presentan sus suelos. En numerosas zonas del Estado, la superficie se encuentra gravemente afectada por el afloramiento de una capa dura conocida localmente como tepetate, la cual indica un proceso de erosión irreversible. Los tepetates son tobas volcánicas endurecidas por procesos geológicos o pedológicos (Hidalgo, 1995; Miehlich, 1992; Quantin *et al.*, 1992; Quantin *et al.*, 1993) y cubren una superficie aproximada de 30 700 km² en el eje neovolcánico transversal (Zebrowski, 1992). Estas capas se ubican principalmente en el piedemonte y en las laderas donde ha habido actividad volcánica en el pasado. En Tlaxcala se ha estimado que 54% de su superficie cuenta con algún tipo de tepetate, y más de una quinta parte de su territorio presenta erosión hídrica y exposición de estas capas endurecidas (Werner, 1992). Sin embargo, con inversiones moderadas los tepetates pueden constituir una importante reserva de tierra si se roturan y acondicionan para el establecimiento de plantas (Báez *et al.*, 2007).

Estos materiales volcánicos han sido objeto de diversos estudios en los últimos años. El potencial que tienen para el uso agrícola, pecuario y forestal ha motivado a los investigadores a caracterizarlos y realizar experimentación para obtener resultados que indiquen cómo aumentar su productividad agrícola (Báez *et al.*, 1997; Fechter-Escamilla *et al.*, 1997; Navarro y Flores, 1997). El COS es un elemento necesario para el mejoramiento de sus propiedades químicas, físicas y biológicas. Báez *et al.* (2002) estudiaron la acumulación de COS en parcelas con tepetate habilitado para la agricultura, con diverso manejo agrícola y tiempo de cultivo. Se concluyó que los tepetates tienen alto potencial para secuestrar carbono, pero la tasa de acumulación del mismo es baja, aún cuando se incorporen frecuentemente abonos orgánicos y se hayan cultivado por décadas. La matriz mineral de los tepetates está generalmente constituida por vidrio volcánico y materiales amorfos y presentan con frecuencia textura franca (Quantin *et al.*,

1992). La baja acumulación de COS en los tepetates cultivados podría relacionarse con los procesos lentos de estabilización de la materia orgánica. Sin embargo, otra hipótesis es que la pérdida de COS por efecto de mineralización y la erosión hídrica es considerable en este tipo de materiales volcánicos. Es evidente que la degradación del suelo por efecto de la erosión hídrica es el principal factor que afecta a los suelos en el estado de Tlaxcala. En el caso de los tepetates del Estado de México, se ha reportado que la tasa de erosión en parcelas habilitadas para la producción agrícola puede limitarse considerablemente (0.1 a $2 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) con obras de conservación de suelo y el empleo de cultivos con amplia cobertura vegetal (Prat *et al.*, 1997). Fechter-Escamilla *et al.* (1997) y Haulon *et al.* (2007) reportaron para el Estado de Tlaxcala pérdidas de sedimentos en tepetates cultivados del orden de 8 a $20 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. La pérdida de suelo por erosión hídrica implica necesariamente la pérdida de carbono asociado a los sedimentos arrastrados y al disuelto en el agua de escurrimiento. Los primeros son comúnmente enriquecidos con COS de baja densidad y su concentración puede ser de 5 a 32 veces mayor que el promedio global del suelo. La mayoría de los sedimentos transportados contienen la fracción lábil del COS, la cual, es fácilmente mineralizable (Sterk *et al.*, 1996). Debido a lo anterior la erosión del suelo es una fuente neta de CO_2 y de otros gases. El propósito de este estudio fue evaluar la pérdida de C en tepetates cultivados con diversos sistemas de manejo, por efecto de la mineralización (flujo de CO_2) y por la erosión hídrica.

2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.2.1. Sitio de estudio

El ejido de Santiago Tlalpan, municipio Hueyotlipan, Tlaxcala, representa otra área de estudio de la presente investigación. Se encuentra aproximadamente a 70 km de la cuenca del río Texcoco y presenta características muy similares a ésta. Se localiza al noroeste de Estado a los $19^\circ 20'$ de LN y $98^\circ 20'$ de LO, a una altitud de 2600 m , en la vertiente oriental del eje neovolcánico transversal (Figura 2.1). El clima del sitio es templado sub-húmedo: C (w1) (w). La temperatura media anual es de 14°C , con una máxima de 19°C y una mínima de -2°C . La precipitación media anual es de 543 mm , concentrada principalmente en verano, pero con una distribución de las lluvias muy irregular (Fechter-Escamilla *et al.*, 1997b).

Los tepetates que se evaluaron en el presente estudio corresponden a horizontes t2 sin carbonatos de calcio. Tal denominación deriva de su asociación de los criterios estratigráficos de tobas t1, t2 y t3 propuesto por Miehlich (1992).

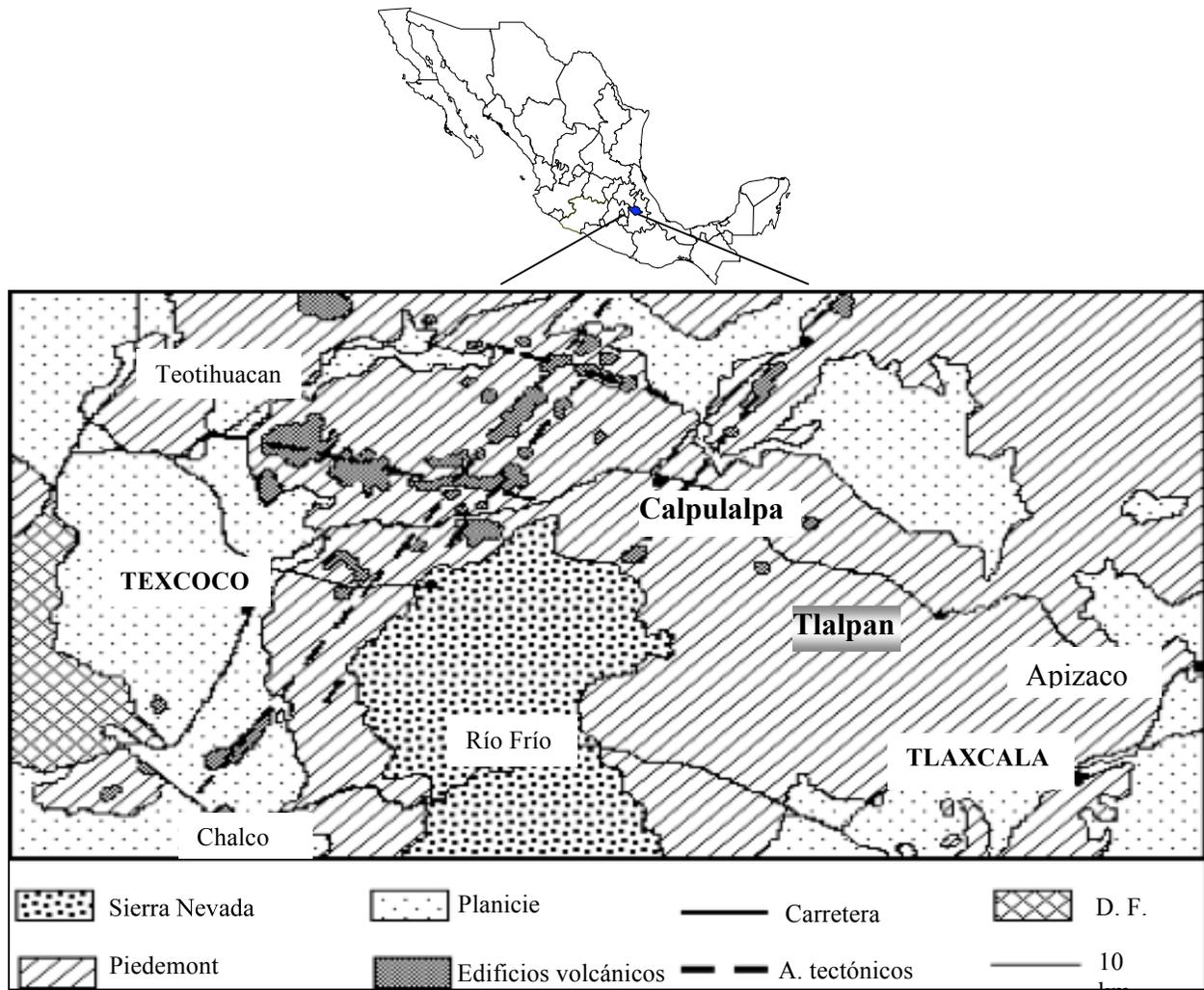


Figura 2.1. Localización de la zona de estudio (Quantin *et al.*, 1993).

2.2.2. Características de los lotes experimentales

Se estableció un experimento en parcelas de tepetate habilitadas para la producción agrícola, las cuales presentan distintas características de manejo agronómico y tiempo de cultivo (Cuadro 2.1). Seis parcelas tenían 15 años de haber sido incorporadas a la agricultura antes de iniciar con las evaluaciones. Los manejos agronómicos a las que fueron sometidas de 2003 a 2004 fueron los siguientes: Tr=tradicional, monocultivos con un nivel bajo de insumos inorgánicos; TM=tradicional mejorado, con cultivos asociados, coberturas con residuos de cosecha y uso de

agroquímicos moderado; TO=orgánico, cultivos asociados utilizando fuentes orgánicas como fertilizante. Dos parcelas fueron roturadas y acondicionadas para ser utilizadas en este experimento: RT=tradicional, recién roturada con manejo tradicional y RO=orgánico, recién roturada con manejo orgánico.

Cuadro 2.1. Parcelas experimentales de tepetate cultivado en el ejido de Santiago de Tlalpan, Tlaxcala.

Tratamientos	Área m ²	dosis de fertilización				Años cultivo	Cultivos				
		2002	2003	2004	2005		2002	2003	2004	2005	
1	TM	1450	60-100-34	23-60-00	90-40-00	74-23-00	16	H+V	Av+V	M+F	T
2	Tr	1200	23-00-00	23-00-00	80-00-00	61-23-00	16	H	Av	M+F	T
1	TM	1300	60-100-34	23-60-00	90-40-00	76-23-00	16	H+V	Av+V	M+F	T
3	Or	1400	composta	15t/ha (EF)	1.87 t/ha (ES)	3 t/ha composta	16	H+V+Bv	Av+V	M+F	T
2	Tr	1240	23-00-00	23-00-00	81-00-00	65-23-00	16	H	Av	M+F	T
3	Or	230	composta	15t/ha (EF)	2.96 t/ha (ES)	2.9 t/ha composta	16	H+V+Bv	Av+V	M+F	T
4	RT	230	23-46-00	-	81-00-00	67-23-00	4	H	Av	M+F	T
5	RO	330	23-46-00	15t/ha (EF)	2.62 t/ha (ES)	4.3 t/ha composta	4	H+V+Bv	Av+V	M+F	T

Av: avena, Bv: Barrera viva; EF: estiércol fresco, ES: estiércol seco, RO: recién roturado con manejo orgánico, RT: recién roturado con manejo tradicional, Or: orgánico, TM: tradicional mejorado, Tr: tradicional, F: frijol, H: haba, M: maíz, V: veza, T: trigo.

En el sitio experimental del 2002 al 2005 se registró diariamente la temperatura, la humedad y otras variables climáticas, mediante una estación meteorológica automatizada.

2.2.3. Monitoreo de la emisión de CO₂

Durante los ciclos de cultivo de 2004 y 2005 se midió la tasa de emisión de CO₂ (TEC) en las parcelas experimentales descritas anteriormente. Como puntos de referencia, se efectuaron también mediciones, en un lecho de tepetate expuesto (TE) y en un matorral con vegetación natural (Mn) y un pastizal natural (Pn) aledaños a las parcelas experimentales. Para llevar a cabo dichas mediciones se utilizó un sensor infrarrojo EGM4 PP-system, que contaba con una cámara especial para detectar este gas de invernadero. Se registró de manera aleatoria la TEC en 10 puntos por parcela. Se hizo una medición por mes durante los meses más secos (noviembre a abril) y de 2 a 4 mediciones por mes durante los meses más húmedos (mayo a octubre).

2.2.4. Monitoreo de la humedad volumétrica y calibración del TDR

Simultáneamente al monitoreo de la TEC se efectuaron mediciones de humedad volumétrica (HV) de 0 a 15 cm de profundidad. Se utilizó un Time Domain Reflectometry Sensor (Trase

Systems modelo 6050X1) (TDR) que fue previamente calibrado. Este equipo se basa en la constante dieléctrica del suelo para proporcionar resultados de HV. Yu (1999) mencionó que el contenido de arcilla afecta la determinación de HV que se mide con el TDR. Jackson (2004) señaló que aunque estos equipo están calibrados de fábrica, es recomendable verificar la calibración para cada tipo de suelo en específico y para las condiciones en se pretenda utilizar.

Para calibrar el TDR se midió la humedad la HV en los tepetates y suelos de referencias que se evaluaron en el presente estudio mediante el método del cilindro y se relacionó con resultados de HV obtenidos mediante un TDR. En el primero, se utilizaron cilindros de 98.2 cm³ Se midió la humedad de 0-15cm de profundidad en 55 sitios elegidos al azar y con un amplio intervalo de humedad. En el segundo método, se utilizaron varillas de 0-15 cm y se registraron mediciones de HV de manera directa en los mismos puntos donde se midió la HV con los cilindros.

2.2.5. Monitoreo de la erosión y escurrimiento

Se midió el volumen de escurrimiento y la masa de sedimentos arrastrados después de cada evento de lluvia. Una parcela por tratamiento en Tr, TM, Or, RT y RO fueron equipadas con un contenedor de aproximadamente 10 m³, el cual estaba conectado a una báscula especial para registrar el peso de los sedimentos en húmedo. Cuando el escurrimiento sobrepasaba la capacidad del contenedor, una veintea parte se colectaba en otro contenedor de 1 m³. Se recolectaron tres muestras de 1 L de aguapara determinar la proporción de sedimentos en suspensión y tres muestras de sedimento de 1 L para determinar la humedad y calcular la masa total de sedimentos en seco.

2.2.6. Monitoreo de pérdida de COS por efecto de la erosión hídrica

Se colectó una muestra de 1L de agua y 1L de sedimento por tratamiento en Tr, TM, Or, RT y RO después de cada escurrimiento. Se tomó una alícuota de 100 ml de agua y centrifugó a 3500 rpm durante 15 minutos, para asentar los sedimentos en suspensión. Se reposaron en un cuarto frío a 4 °C durante 48 horas y después se evaluó directamente el C disuelto en el agua en un analizador automatizado para carbono total: Shimatzu (TOC-5050A), en un modulo especial para líquidos. A los 900 ml restantes de la muestra de agua se les adicionó 5 ml de un floculante (K₂SO₄. Al₂(SO₄)₃.24H₂O) para precipitar los sedimentos en suspensión. Se eliminó el agua y se seco el sedimento en una estufa a 110 °C por 24 horas. Posteriormente se molió en malla número

100 y se midió el C mediante el modulo de sólidos del equipo TOC-5050A. De las muestras de sedimento de 1L se tomaron tres submuestras de aproximadamente 10 g cada una y se procedió de igual forma que el caso anterior. Para calcular la cantidad de C asociado a la erosión hídrica se consideró la suma de los siguiente factores: concentración de C disuelto en el agua por volumen total del escurrimiento + concentración de C asociado a los sedimentos en suspensión por el peso de sedimentos en suspensión contenidos en el volumen total del escurrimiento + concentración de C asociado a la masa de sedimentos por peso de la masa de sedimentos arrastrados.

2.2.7. Análisis de los datos

Para el análisis de la TEC se presentan la media ponderada y la desviación estándar obtenidas después de cada evaluación. Para el análisis de C asociado a la erosión hídrica, debido a la naturaleza del experimento, no se cuenta con medias maestras. Se presenta el resultado directo de la media poblacional.

2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Antes de analizar los resultados de pérdida de COS por efecto de la emisión de CO₂ y erosión hídrica, es necesario resaltar algunas características de la precipitación pluvial que se registró durante los años en que se efectuó este estudio.

2.3.1. Distribución de las lluvias y temperatura

La precipitación pluvial y la temperatura registradas durante 2004 y 2005 en el sitio experimental de Tlalpan, Tlaxcala se presenta en la Figura 2.2. El volumen anual de lluvia durante primer año de evaluaciones fue de 751 mm, distribuida en 114 eventos pluviales. Durante el segundo año, la precipitación fue de 601 mm, repartida en 130 eventos pluviales. La distribución de las lluvias varió de un año a otro, siendo más irregulares durante 2005. En 2004 más del 95% de la lluvia se repartió de mayo a noviembre. Se registró un evento extraordinario de cerca 70 mm, el 17 de septiembre que representa el 9% del volumen total. En 2005 el 90% de la lluvia se repartió de julio a noviembre. A fines de mayo se registró una lluvia importante, de cerca de 20 mm, y después hubo una sequía intraestival muy prolongada, que abarco hasta fines de julio. Esta distribución pluvial impidió el establecimiento de maíz en las parcelas experimentales, el cual, había sido programado para el último año de evaluaciones. Durante este año ocurrieron dos

eventos de lluvia mayores de 30 mm: el 26 de julio y el 15 de octubre, y una lluvia mayor de 45 mm, el 31 de agosto. Las lluvias de septiembre a noviembre en esta zona, son generadas frecuentemente por la temporada de huracanes. Durante 2005 la temperatura media anual fue de 14.3 °C. Las temperaturas extremas más bajas se registraron durante enero, febrero, noviembre diciembre. En 2005 solamente se registraron datos de temperatura de abril a agosto.

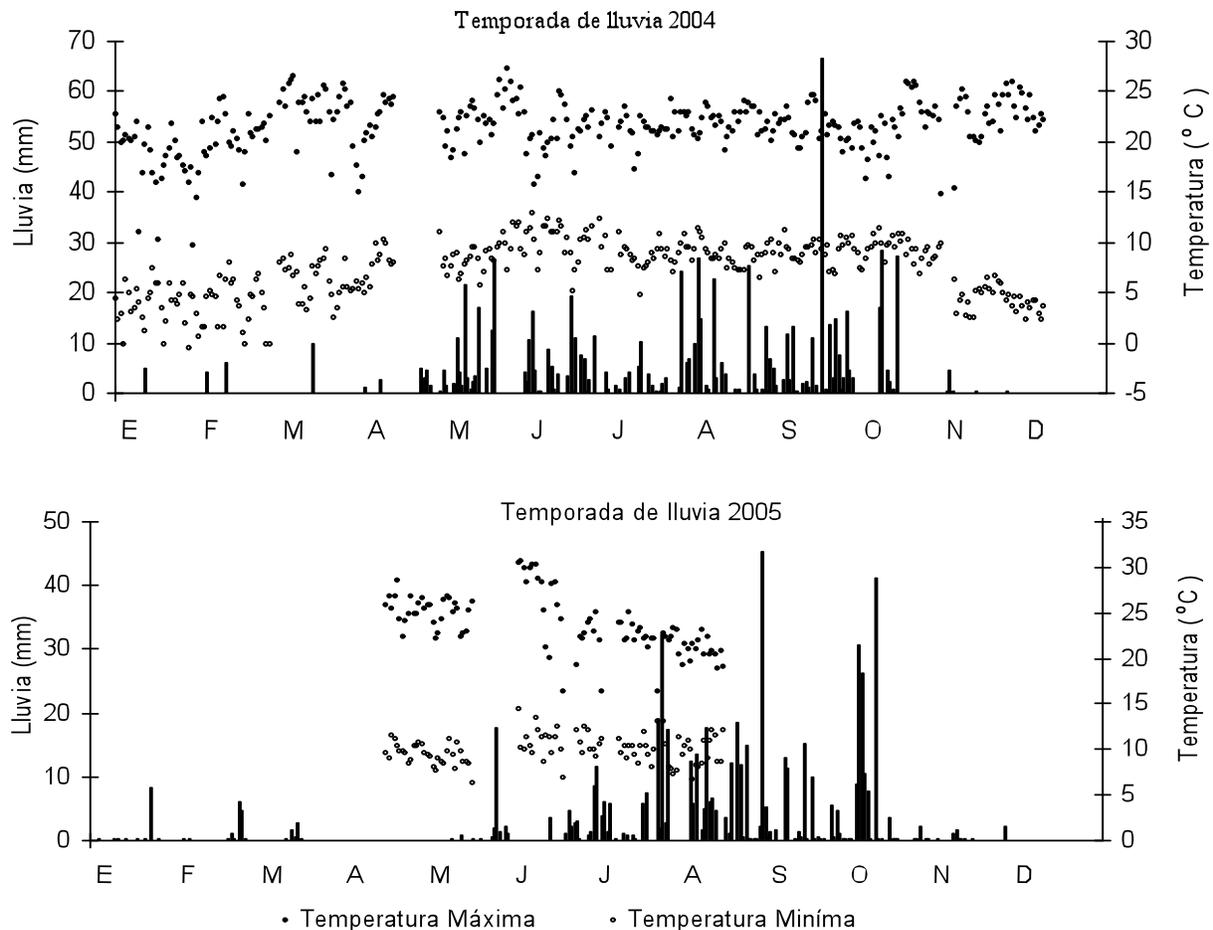


Figura 2.2. Distribución de la precipitación pluvial y temperatura en las parcelas experimentales de tepetate cultivado en Tlalpan, Tlaxcala.

2.3.2. Calibración del TDR

En la Figura 2.3 se presenta la relación entre la HV calculada por el método del cilindro y mediante el TDR. Se observa una estrecha relación entre ambas ($r=0.95$). Las lecturas con el TDR proporcionaron resultados semejantes a los obtenidos con el método del cilindro. La

pendiente mostró una desviación de 3% de la línea de 45°. Este pequeño error se consideró despreciable para las evaluaciones de humedad que se efectuaron en el presente estudio.

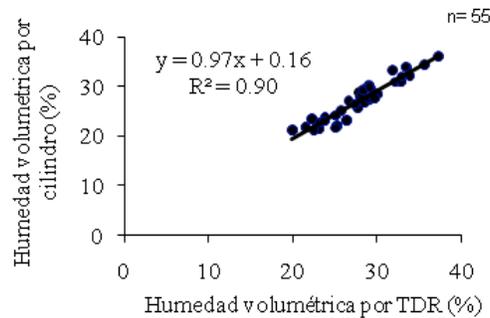


Figura 2.3. Relación entre la humedad volumétrica medida por el cilindro y mediante un TDR.

2.3.3. Emisión de CO₂

En la Figura 2.4 se presentan los resultados mensuales de la TEC de los tratamientos evaluados durante 2004 y 2005. El lecho de tepetate, con solamente tuvo trazas de COS (Figura 2.5), mostró la TEC más baja. Los tratamientos RT y RO con 2 años de cultivo, mostraron una TEC hasta 10 veces mayor que el caso anterior. Esta variable aumentó con los años de cultivo y en los sistemas agrícolas donde se adicionaron abonos orgánicos. Or, con incorporó composta, mostró la mayor TEC entre los tratamiento con tepetate (Figura 2.4). Pn, cuyo suelo tuvo una concentración de COS mayor de 3%, mostró una TEC hasta doble que Or durante los mese más secos (diciembre a marzo) y en los meses más húmedos esta diferencia fue dos veces mayor. Esto se explica en parte porque la tasa de producción de biomasa en los ecosistemas naturales Pn y Mn es mayor que en los sistemas agrícolas, porque cuentan con vegetación durante todo el año y se incorpora constantemente, lo que favorece la actividad biológica durante todo el año. Mientras que en los sistemas de producción agrícola la siembra regularmente se práctica en hileras, se combaten habitualmente las malezas y se retiran los rastrojos. La actividad biológica por lo tanto disminuye drásticamente durante la época seca. La tendencia general evidenció que la TEC aumentó a medida que la concentración de COS es mayor. De manera general, se observa que el flujo de CO₂ aumenta o disminuye de acuerdo al patrón de distribución de las lluvias. Esto indica que la humedad en el suelo es un factor que influye directamente en esta variable.

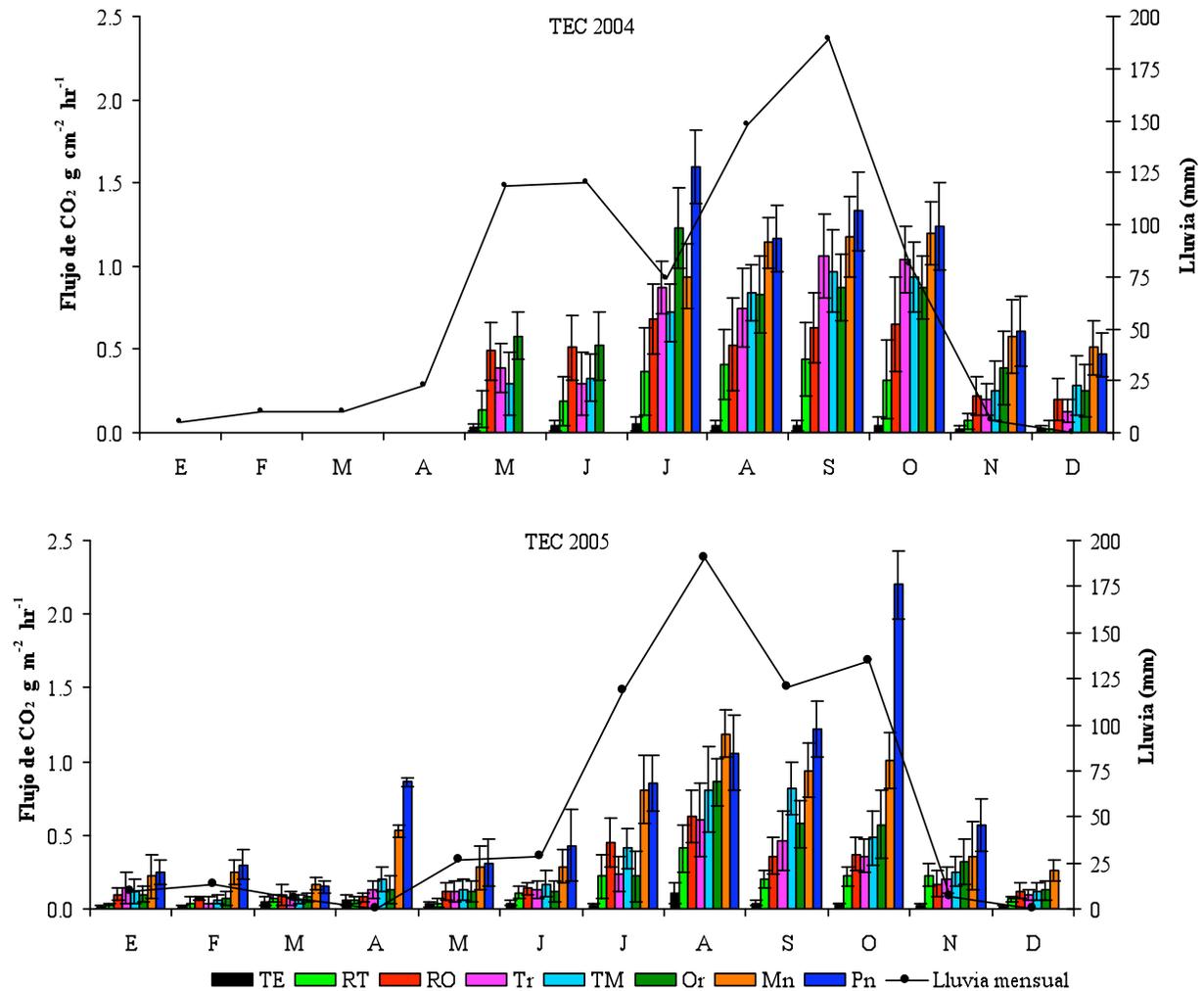


Figura 2.4. Resultados de la tasa de emisión de CO₂ (TEC) en 2004 y 2005 en tepetates cultivados de Tlalpan, Tlaxcala. TE: tepetate expuesto, Tr: tradicional, TM: tradicional mejorado, Or: orgánico. RT: recién roturado con manejo tradicional, TO: recién roturado con manejo orgánico, Mn: matorral natural, Pn: pastizal natural.

Estos resultados sugieren que la acumulación de COS es baja en los tepetates cultivados porque la actividad biológica y los ingresos de COS al sistema son limitados. Solo cuentan con vegetación aproximadamente la mitad del año, se retiran los rastrojos de las cosechas, el grado de desecación que tienen durante la época seca disminuye la respiración hasta el mínimo. La oxidación de este elemento, tanto en los ecosistemas naturales como en los sistemas agrícolas, es constante y para lograr un incremento importante en el suelo se requiere que el ingreso de COS sea mayor que las pérdidas (Lal, 2004). El retiro de los residuos de cosecha sin duda limita la acumulación de COS en los tepetates cultivados. Lograr que la tasa de acumulación de COS en estos sustratos sea mayor que la tasa de pérdida del mismo, requiere de otras estrategias

adicionales a la incorporación de residuos orgánicos. Los sistemas de labranza reducida, el empleo cultivos de amplia cobertura vegetal y las obras de conservación de suelo ofrecen una alternativa para disminuir las pérdidas de carbono por mineralización y erosión.

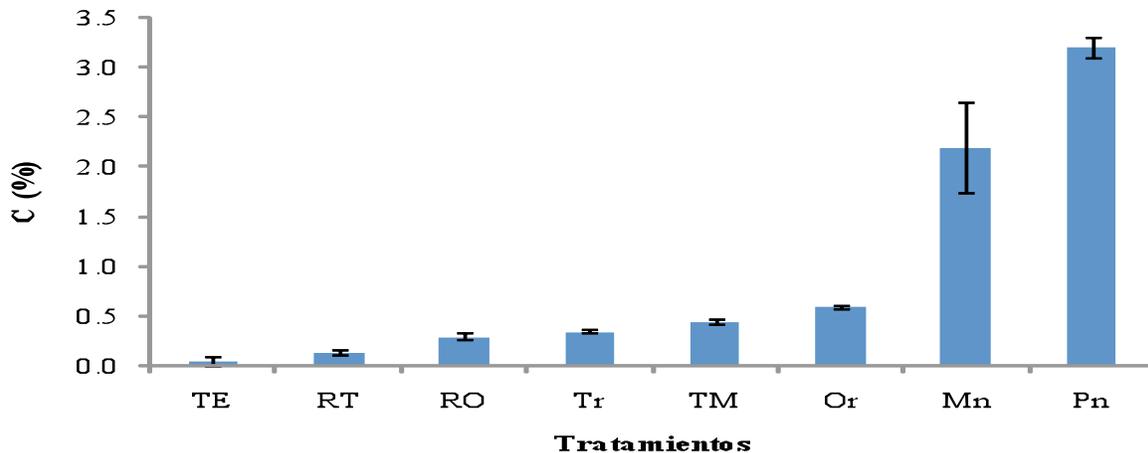


Figura 2.5. Concentración de C en los sustratos evaluados en Tlalpan, Tlaxcala. TE: tepetate expuesto, Tr: tradicional, TM: tradicional mejorado, Or: orgánico. RT: recién roturado con manejo tradicional, TO: recién roturado con manejo orgánico, Mn: matorral natural, Pn: pastizal natural.

La TEC se relacionó positivamente con la HV en todos los tratamientos (“r” de 0.76 a 0.86) (Figura 2.6). El nivel de saturación no excedió la capacidad de campo. El coeficiente de escurrimiento durante las lluvias más intensas fue mayor de 50%, es decir, que menos de la mitad de la lluvia logró infiltrarse a través del suelo. En RT este coeficiente alcanzó más de 70%. La formación de costras superficiales es la principal causa, debido al sellamiento de poros por el impacto de las gotas de lluvia en la superficie del suelo (Lauffer *et al.*, 1997). La humedad favorece la actividad microbiana al interior del suelo, ésta a su vez actúa en la degradación de la materia orgánica del mismo, produciéndose así el flujo de CO₂.

La TEC aumentó a proporcionalmente con la HV, ésta última fue mayor durante la época de lluvias. Después, con la desecación de los sustratos la HV disminuyó proporcionalmente conforme decreció la humedad en ellos.

Cabe señalar una observación de interés: cuando los sustratos se humedecían después de un periodo de sequía estival, la TEC aumentaba drásticamente. El fenómeno es aparentemente similar a la histéresis que exhiben las ganancias y pérdidas de humedad del suelo. Esto puede

explicarse porque después de un período de humedad se favorece la producción de biomasa, quedando expuesta más materia orgánica que se puede degradar al humedecerse el suelo después de un período de sequía largo.

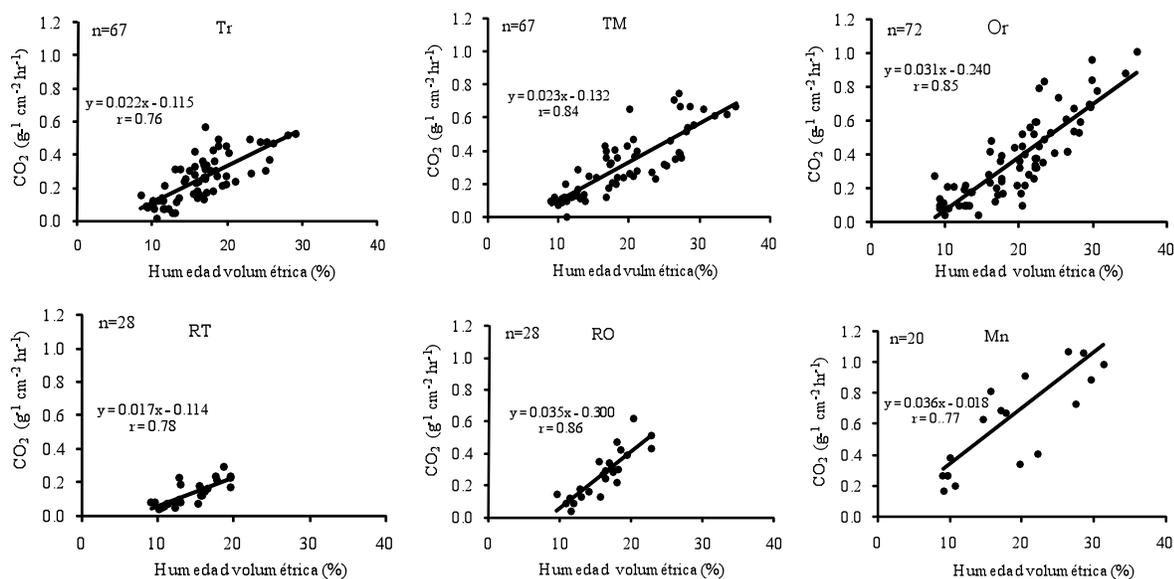


Figura 2.6. Relación entre la tasa de emisión de CO₂ y la humedad volumétrica en los tepetates evaluados de Talpan, Tlaxcala.

2.3.4. Pérdida de COS por efecto de erosión hídrica

El número de eventos de lluvia que presentaron escurrimiento en las parcelas experimentales de tepetate dependió de la intensidad de las lluvias, del tipo tratamiento y tipo de cultivo. Debido a lo anterior hubo fluctuaciones entre un año y otro. En 2004, cuando se sembró maíz asociado con frijol, se registraron 15 escurrimientos en TM, la parcela que tuvo la erosión más baja, y 22 escurrimientos en RT, donde se registró la mayor erosión. La pérdida de sedimentos fue de 2.3 y 16.2 t ha⁻¹ año⁻², respectivamente (Cuadro 2.2). En 2004 la masa de sedimentos arrastrados por los escurrimientos, fue el doble en TM, RT y RO, en comparación con 2005, cuando se sembró trigo en monocultivo; mientras que en Or y Tr, ésta diferencia fue más del triple. Estas discrepancias de erosión entre un año y otro, se deben por una parte, al volumen de lluvia; que fue de 751 mm en 2004 y 601 mm en 2005; por otra parte, a la energía cinética de éstas; y a la cobertura vegetal que proporcionaron los cultivos. En 2004 la energía global acumulada de lluvia fue de 147 MJ ha⁻¹, mientras que en 2005 fue de 110 MJ ha⁻¹. Prat (1997) mencionó que la carga de sedimentos arrastrados por los escurrimientos pueden depender más de la intensidad de las lluvias que del volumen de las mismas. En 2004 más del 50% de la erosión fue ocasionada

solamente por 2 aguaceros (20 de mayo y 18 de septiembre) y en 2005 ocurrió algo similar (26 y 28 de julio). El cultivo de trigo podría proporcionar más protección al suelo contra la energía cinética de las gotas de lluvia, al ser un cultivo de cobertera. Estos resultados coinciden con lo reportado por Fechter-Escamilla *et al.* (1997).

Cuadro 2.2. Erosión y pérdida de C en parcelas experimentales de Tlalpan, Tlaxcala.

Tratamiento	NE	MS	SS	VE	MS	SS	VE	Total
		t ha ⁻¹		mm ha ⁻¹	COS (kg ha ⁻¹)			
Temporada de lluvias 2004								
TM	15	2.3	2.0	58	18	15	5	38
Tr	16	5.6	4.0	99	36	27	8	71
Or	17	4.2	3.6	82	29	28	8	65
RT	22	16.2	9.2	207	40	30	17	87
RO	21	10.2	7.0	146	41	31	13	85
Temporada de lluvias 2005								
TM	11	1.1	0.8	27	8	7	2	17
Tr	12	1.3	0.8	39	11	8	3	22
Or	17	1.4	0.8	31	13	7	2	22
RT	18	8.6	7.1	177	27	36	12	75
RO	19	5.5	5.0	149	24	33	11	68

NE: número de escurrimientos, MS: masa de sedimentos arrastrados, SS: sedimentos en suspensión, VE: volumen de escurrimiento.

De manera global la pérdida del C por efecto de la erosión hídrica se relacionó linealmente con el volumen de sedimentos arrastrados ($R^2= 0.97$) y con el volumen de escurrimiento ($R^2=0.93$) (Figura 2.7). Durante 2004 las parcelas recién roturadas (RT y RO) presentaron 18 a 56% más pérdida de COS ocasionado por la erosión hídrica en comparado con los demás tratamientos, mientras que en 2005 esta diferencia fue hasta el triple. TM fue el tratamiento que presentó menor pérdida de COS en ambos años. Las lluvias más intensas disminuyen la infiltración y aumenta el coeficiente de escurrimiento, provocando una mayor carga de sedimentos. Este efecto es mayor para tepetates recién roturados como RT y RO. El sustrato recién fragmentado es altamente erosionable por acción de las lluvias ya que se encuentra completamente suelto. Por ello la importancia de construir terrazas y obras de conservación de suelo como: bordes altos, pendientes suaves o curvas de nivel, etc., fundamentales para reducir al mínimo la erosión hídrica. El escurrimiento y la pérdida de sedimentos implican no solamente implica la pérdida de COS, también la posibilidad de que se pierda fertilizante si éstos se hubiesen adicionado, adelgazamiento de la capa roturada, deterioro de la parcela y poco éxito en el establecimiento de cultivos.

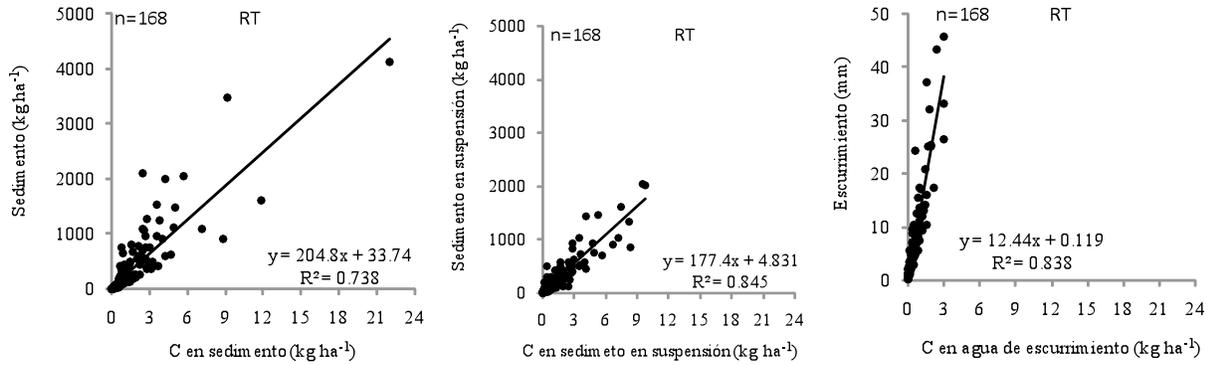


Figura 2.7. Erosión en parcelas experimentales de tepetate cultivado en Tlalpan, Tlaxcala. (a): Relación entre pérdida de sedimento y pérdida de COS. (b): Relación entre volumen de escurrimiento y pérdida de COS.

El COS asociado con los sedimentos totales (masa de sedimentos arrastrados + sedimentos en suspensión) fluctuó de 20 kg ha⁻¹ año⁻¹ en TM, con la menor erosión, a más 60 kg ha⁻¹ año⁻¹ en RT y RO donde se registró la mayor erosión (Figura 2.8). El comportamiento global fue semejante al del sedimento explicado anteriormente. Durante el primer año de evaluaciones hubo 38 kg ha⁻¹ año⁻¹ de COS en TM y más de 80 kg ha⁻¹ año⁻¹ en RC. En 2005 la pérdida de COS fue alrededor de 65% menor en TM, Or y Tr, respecto al año anterior; mientras que en TC y RO fue 13 y 19% menor.

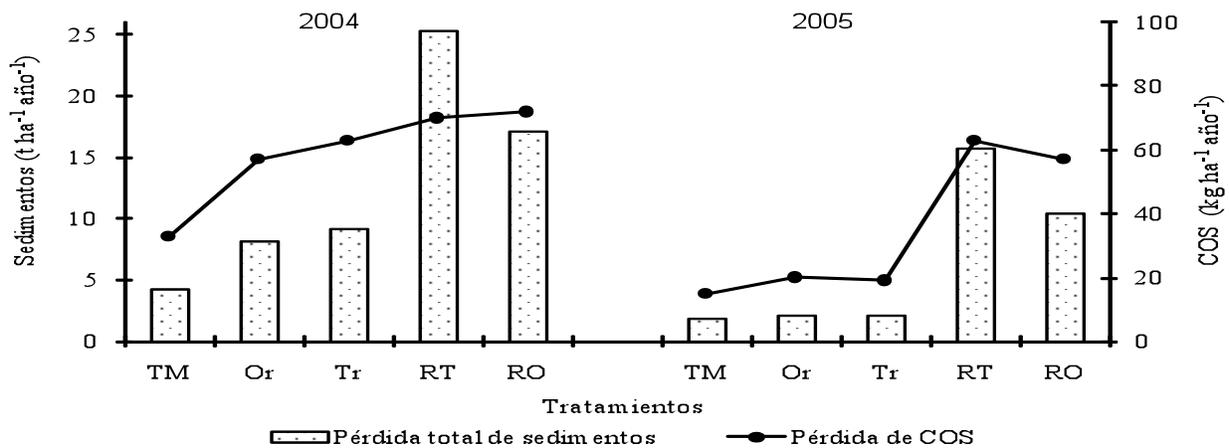


Figura 2.8. Pérdida total de sedimentos (masa de sedimentos arrastrados + sedimentos en suspensión) y COS por efecto de la erosión hídrica en parcelas experimentales de Tlalpan, Tlaxcala.

El COS transportado por la erosión hídrica se distribuyó mayormente en la masa de sedimentos y en los sedimentos en suspensión. El C que se encontraba disuelto en el agua de escurrimiento contribuyó solamente de 10 a 15% del total (Figura 2.9).

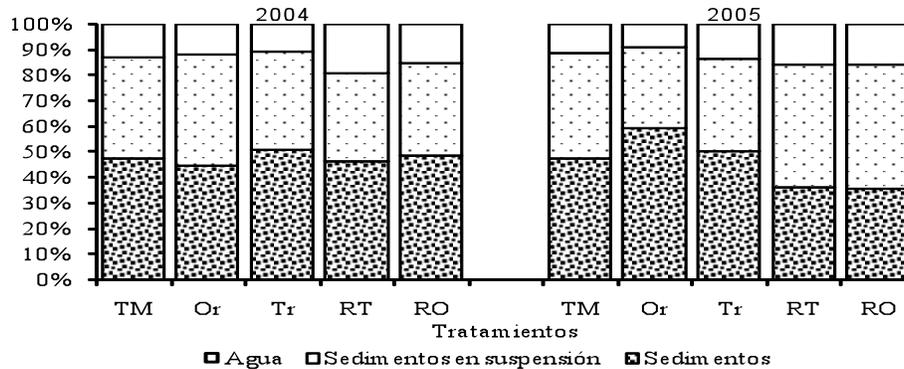


Figura 2.9. Distribución del COS en sedimentos, sedimentos en suspensión y el agua de escurrimiento en parcelas experimentales de Tlalpan, Tlaxcala.

El COS asociado a los sedimentos en suspensión fue elevado debido al volumen del escurrimiento, con el cual se relacionó estrechamente ($R^2=0.93$). Fue evidente que los tratamientos recientemente roturados (RT y RO) fueron más sensibles a la erosión hídrica que aquellos que contaban con 16 años de cultivo al iniciar este experimento. En RO y RT el volumen de escurrimiento alcanzó los 150 y 200 mm ha⁻¹ año⁻¹ respectivamente, lo cual fue de dos a seis veces mayor que lo registrado en los demás tratamientos. Estos resultados sugieren que el coeficiente de infiltración en dichos tratamientos fue bajo (aproximadamente 50%), por lo cual la pérdida de sedimentos y el COS asociados a estos, fue más elevado. Prat *et al.* (1997) y Fechter-Escamilla *et al.* (1997) reportaron coeficientes de escurrimiento mayores a 50% en tepetates cultivados recientemente roturados, señalando que en dicho fenómeno había una mayor influencia por la intensidad de las lluvias, que por el volumen de las mismas. Esto se debe también a que el tepetate recién roturado no proporciona condiciones adecuadas para la infiltración de agua de lluvia ni para la necesaria aireación de las raíces de los cultivos, debido a formación de costras en la superficie con las primeras lluvias erosivas. En ciertos casos estas costras pueden limitar o impedir la germinación de semillas como las de cebada y trigo; sin embargo, se ha observado que semillas como las de haba (*Vicia faba*), maíz (*Zea mays*), ayocote (*Phaseolus coccineus*) y veza (*Vicia sativa*) logran romperlas y emerger, aunque con dificultad. Las costras afecta el desarrollo de las plantas a lo largo del ciclo de cultivo, así como la intensidad de los escurrimientos y el arrastre de sedimentos (Báez, *et al.*, 2007).

Es importante señalar que la concentración promedio de COS asociado a los sedimentos arrastrados fue de 3.3 a 5.2 veces mayor que el COS contenido en el suelo. Este resultado sugiere que el contenido de COS en el horizonte más superficial del suelo es significativamente más alto

que en el resto del perfil, debido a la mayor acumulación de COS en superficie. Sterk *et al.* (1996) mencionaron que los sedimentos del suelo arrastrados por la erosión hídrica son comúnmente enriquecidos con COS de baja densidad y su concentración puede ser de 5 a 32 veces mayor que el promedio global del suelo y que la mayoría de los sedimentos transportados contienen la fracción lábil del COS, la cual, es fácilmente mineralizable.

2.4. CONCLUSIONES

La TEC aumentó a medida que aumentó la humedad volumétrica en el suelo y disminuyó a medida que ésta disminuyó. La TEC más alta se presentó en Pn, con alrededor de $2 \text{ g cm}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ durante el mes más húmedo y $0.5 \text{ g cm}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ durante los meses más secos. En los tepetates cultivados ésta fluctuó de 0.5 a $1 \text{ g cm}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ durante los meses más húmedos y disminuyó hasta alrededor de $0.1 \text{ g cm}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ durante los meses más secos (diciembre a abril). La TEC aumentó con los años de cultivo y fue mayor en los sistemas agrícolas donde se adicionó composta. Esta variable se relacionó positivamente con la HV ("r" que van de 0.67 a 0.86). Mayor contenido de COS en el suelo implicó mayor potencial de mineralización de este elemento. Es necesario implementar prácticas agrícolas que disminuyan la TEC, buscando que la tasa de acumulación de C sea mayor que la tasa de emisión.

La pérdida de C por efecto de la erosión hídrica fue distinta de un año a otro. Esta dependió del volumen del escurrimiento y de la masa de sedimentos erosionados. En TM, que fue el tratamiento que tuvo la erosión más baja, se perdieron 38 y $17 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de C en 2004 y 2005, respectivamente. En RT, que fue el tratamiento con la erosión más alta, la pérdida de COS fue de 87 y $75 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de un año a otro.

El C contenido en las aguas de escurrimiento fluctuó: de 10 a $15 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, mientras que el C contenido en la masa de sedimentos y en los sedimentos en suspensión es mayor de $40 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). La pérdida de COS se relacionó de manera exponencial con la pérdida de sedimentos y el volumen de escurrimiento. Estos resultados sugieren que la erosión hídrica es un factor importante en la pérdida de COS en los sistemas agrícolas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al proyecto REVOLSO (contrato europeo no. ICA4-CT-2001-10052) y a CONACYT por el financiamiento otorgado para realizar esta investigación.

2.5. LITERATURA CITADA

- Báez, A., E. Ascencio-Zapata, C. Prat y A. Márquez, 1997. Análisis del comportamiento de cultivos en tepetate t3 incorporado a la agricultura de temporal, Texcoco, México. *In: III Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. Zebrowski, C., P. Quantin y G. Trujillo (eds.). ORSTOM. Quito, Ecuador, pp: 296-310.
- Báez, A., J. D. Etchevers, C. Prat, A. Márquez y E. Ascencio-Zapata. 2007. Manejo agronómico de los suelos endurecidos (tepetates) del eje neovolcánico de México. *In: La captura de carbono en ecosistemas terrestres Iberoamericanos*. Gallardo-Lancho, J. (ed.). Sociedad Iberoamericana de Física y Química Ambiental. Salamanca, España, pp: 69-84.
- Báez, A., J. Etchevers, C. Hidalgo, C. Prat, V. Ordaz and R. Núñez. 2002. C orgánico en tepetates cultivados de México. *Agrociencia* 36:643-653.
- Fechter-Escamilla, E.U., F. Tehózol y P. Muñoz. 1997a. Maíz bajo labranza reducida en un suelo volcánico endurecido (tepetate t3) rehabilitado en Tlaxcala, México. *In: III Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. Zebrowski, C., Quantin, P y Trujillo, G. (eds.). ORSTOM. Quito, Ecuador, pp: 217-323.
- Covaleda, S., S. Pajares, M. Haulon, A. Báez, J. F. Gallardo, J. D. Etchevers, G. Werner, y S. Marinari. 2007. Secuestro de C en tepetates habilitados para la agricultura en el estado de Tlaxcala (México). *In: La captura de carbono en ecosistemas terrestres Iberoamericanos*. Gallardo-Lancho, J. (ed.). Sociedad Iberoamericana de Física y Química Ambiental. Salamanca, España, pp: 123-147.
- Fechter-Escamilla, E.U., A. Vereá y G. Werner. 1997. Erosión hídrica en un suelo volcánico endurecido (tepetate t3) en bloque de Tlaxcala, México. *In: III Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. Zebrowski, C., Quantin, P y Trujillo, G. (eds.). ORSTOM. Quito, Ecuador, pp: 351-358.
- Haulon, M., G. Werner¹, G. Flores-García, A. Vera-Reyes, and P. Felix-Henningsen. 2007. Assessment of erosion rates during rehabilitation of hardened volcanic soils (tepetates) in Tlaxcala. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 24:498-509.

- Hidalgo M., C. 1995. Étude d'e horizons indurés à comportement de fragipan, appelés tepetates, dans les sols volcaniques de la vallée de México. Tesis doctoral. Paris, Francia.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304:1624-1627.
- Lauffer, M., Y. Leroux, C. Prat y J. L. Janeau. 1997. Organización superficial de los tepetates cultivados, Texcoco (México). *In: III simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. Zebrowski, C., P. Quantin y G. Trujillo (*eds.*). ORSTOM. Quito, Ecuador, pp: 443-456.
- Miehlich, G. 1992. Formation and properties of tepetate in the central highlands of Mexico. *Terra* 10 (Número especial): 136-144.
- Navarro, H. y D. Flores S. 1997. Manejo agronómico diferencial de la asociación maíz-haba en tepetate de quinto año de uso agrícola. *In: III Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. Zebrowski, C., P. Quantin, y G. Trujillo (*eds.*). ORSTOM. Quito, Ecuador, pp: 287-295.
- Prat, C., A. Báez y A. Márquez. 1997. Erosión y escurrimiento en parcelas de tepetate t3en Texcoco, México. *In: III Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. Zebrowski, C., P. Quantin, y G. Trujillo, (*eds.*). ORSTOM. Quito, Ecuador, pp: 371-383.
- Prat, C. 1997. Análisis de las características de las precipitaciones de 1992 a 1995 en San Miguel Tlaixpan, Texcoco, México. *In: III Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. Zebrowski, C., P. Quantin, y G. Trujillo, (*eds.*). ORSTOM. Quito, Ecuador, pp: 359-370.
- Quantin, P., C. Zebrowski, M. Delaune y C. Hidalgo 1992. El material original de los tepetates t2 y t3 de la región de Texcoco (México): ¿loess o cinerita?. *Terra* 10 (Número especial) 378-382.
- Quantin, P., H. Arias, J. Etchevest, R. Ferrera-Cerrato, K. Olechko, H. Navarro, G. Werner y C. Zebrowski, 1993. Tepetates de México: Caracterización y Habilitación para la Agricultura. *Terra* 11 (Número especial):1-25.
- Sterk, G., L. Herrmann, and A. Bationo. 1996. Wind-blown nutrient transport and soil productivity changes in southwest Niger. *Land Degradation and Development* 7-325:335.
- Werner, G. 1992. Suelos volcánicos endurecidos (tepetates) en el estado de Tlaxcala: Distribución, rehabilitación, manejo y conservación. *Terra* 10 (Número especial): 318-331.

Zebrowski, C. 1992. Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina. Terra 10 (Número especial): 15-23.

CAPITULO III. FRACCIONAMIENTO FÍSICO DE TRES SUELOS VOLCÁNICOS DE MÉXICO Y SU RELACIÓN CON EL CARBONO

RESUMEN

La estabilización del C orgánico en el suelo (COS) es función de la protección física que proporcionan los agregados del suelo, la formación de complejos orgánicos minerales y la estabilización química que deriva en la formación de sustancias húmicas. Los suelos volcánicos deteriorados como los tepetates (tobas volcánicas endurecidas) y los acrisoles y andosoles de la cuenca de Cointzio, Michoacán presentan características físico-químicas contrastantes. El COS es un elemento común que incide directamente en su fertilidad, sin embargo, la capacidad de la matriz del suelo para retenerlo está determinada por su mineralogía, por la proporción de limo y arcilla, y por el aporte y calidad de los residuos orgánicos. En los estudios dirigidos a definir la influencia de dichos factores sobre la retención de carbono por el suelo, es necesario efectuar la separación de agregados y de éstos en sus diferentes fracciones granulométricas. Sin embargo la cantidad de energía requerida para su separación es crítica. Las partículas consideradas como microagregados (<250 μm) están constituidas por arena fina, limo y arcilla, siendo las últimas las más reactivas en el suelo. La composición química, su localización en la matriz del suelo y su grado de asociación con otras partículas influyen en la estabilidad de agregados y en el secuestro de carbono. El objetivo de este trabajo fue definir la cantidad de energía requerida con ultrasonido para dispersar tres tipos de suelos volcánicos en sus componentes principales: arena, limo y arcilla. Así como para evaluar el efecto de la energía aplicada sobre la dispersión del suelo y la cantidad de carbono asociado a cada fracción. Se seleccionaron tres tipos de suelos volcánicos del eje neovolcánico transversal: un tepetate cultivado de Tlalpan, Tlaxcala; un acrisol de la cuenca de Átecuaro, Michoacán; y un andosol de la misma zona. En cada suelo se examinaron dos tipos de manejos: (1) tradicional, como lo hace el agricultor, con monocultivo de gramíneas y bajos insumos de fertilizantes químicos y orgánicos; (2) con adición regular de abonos químicos orgánicos y empleo de leguminosas. El suelo se separó primero en dos fracciones: >250 μm y <250 μm . La fracción <250 μm a su vez se fraccionó en partículas elementales. Se utilizó una sonda ultrasónica para aplicar 0, 228, 455, 910 y 1365 J ml^{-1} , haciendo funcionar la sonda por 0, 10, 20, 40 y 60 minutos, respectivamente, y se midió el COS en las distintas fracciones. La proporción de arena limo y arcilla también se evaluó mediante el método la pipeta debido a que este es el método de referencia usado en la determinación de la

distribución de tamaño de partícula. De manera general, la proporción de arcilla aumentó logarítmicamente en función de la energía aplicada; en tanto que la proporción de limo y arena fina, disminuyó de manera inversa. El COS se asoció principalmente a la fracción arcilla (1.3%) en el tepetate y al limo (2.9%) en el acrisol; en tanto que en el andosol la cantidad de carbono fue semejante (5.8%) en las fracciones limo y arcilla. El COS mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) por tipo de manejo solo en el tepetate. Lo que sugiere que la materia orgánica adicionada puede ser retenida en este último. En tanto que en el acrisol y el andosol, al no haberse dado un efecto significativo con el tratamiento orgánico, permite suponer un grado de saturación de COS en estos suelos.

Palabras clave: Captura de carbono, suelos volcánicos endurecidos, tepetates

3.1. INTRODUCCIÓN

Los suelos de origen volcánico en México se ubican en las laderas y los piedemontes de las sierras donde ha habido actividad volcánica en el pasado. Los andosoles y suelos volcánicos endurecidos son abundantes. Se estima que los primeros ocupan 1.2% del territorio nacional (FAO-UNESCO-ISRIC, 1998), mientras que los segundos, llamados localmente tepetates, abarcan 11.4% (Guerrero *et al.*, 1992). Si bien existen distintos tipos de tepetates, definidos en función de la naturaleza del material que los constituyen y de los procesos que intervinieron en su formación, el que se utilizó para este estudio fue del tipo fragipán, denominado así por la similitud que presenta con estos materiales. Los tepetates son tobas volcánicas con distintos grados de intemperización, formadas por procesos geológicos y pedológicos (Hidalgo, 1995; Miehlich, 1992; Quantin *et al.*, 1992; Quantin *et al.*, 1993). Estos materiales en muchas ocasiones se han roturado con el objeto de utilizarlos para la producción agrícola, como se ha explicado en capítulos anteriores. Los acrisoles de la cuenca de Cointzio, Michoacán, cubre 223 km² y representa 33% de su superficie (Medina-Orozco, 2006), mientras que en el país éstos cubren cerca de 10 000 km² (INEGI, 2004). Los acrisoles mencionados son suelos volcánicos que presentan frecuentemente la pérdida del horizonte A. El horizonte B presenta restricciones físicas y químicas para el desarrollo de cultivos, debido a la cantidad de arcilla (más de 60%) y al pH ácido que presentan. La implementación de prácticas agronómicas como: encalado, adición de materia orgánica y uso de leguminosas pueden contribuir a mejorar dichas limitaciones. En la

misma cuenca, la deforestación y el cambio de uso de suelo ocasionan una drástica modificación en las propiedades físico-químicas de los andosoles. La característica principal de estos suelos es la presencia de alofanos como mineral abundante de la fracción arcillosa, que les confiere una consistencia muy particular conocida como "tixotropía" (Shoji *et al.*, 1996). Por lo anterior, estos suelos presentan una estructura muy porosa, con una densidad aparente muy baja, entre 0.5 y 0.8 kg dm⁻³, y una elevada permeabilidad. Sin embargo, la desecación de este tipo de suelos provoca una retracción irreversible de los agregados. En estas condiciones su capacidad de retención de humedad puede reducirse hasta en 60 % de la inicial y el suelo se convierte en una masa polvorienta e hidrófoba, con la pérdida de sus mejores características físicas.

La capacidad de los suelos para secuestrar C depende de la interacción de factores físicos, químicos y biológicos (Lal, 2004). Varios autores postulan que la textura de los suelos, principalmente la proporción de limo y arcilla, determinan la máxima capacidad de adsorción de C de un suelo (Hassink, 1994; Matus *et al.*, 2008; Van Veen y Kuikman, 1990). Six *et al.* 2002 señalaron que el COS puede ser estabilizado por tres mecanismos: por protección física, por la interacción órgano-mineral (protección química) y por la transformación bioquímica de la materia orgánica del suelo (MOS) a formas recalcitrantes. De estos tres mecanismos, tal vez el primero de ellos, la protección física, ha sido el más difundido. Esta propuesta se basa en que el COS secuestrado en los suelos forma microagregados, dentro de los cuales la MOS es protegida contra la degradación ocasionada por los microorganismos del suelo (Elliott y Coleman, 1998; Golchin *et al.*, 1994; Van Veen y Kuikman, 1990). Este efecto protector resulta del recubrimiento de la MOS por la fracción mineral o por la adsorción del COS que ocurre en la superficie del limo y la arcilla (Tisdall y Oades, 1982). Sin embargo, dicha protección es finita y la estabilización de nuevos aportes de COS varía con respecto al grado de saturación de los suelos (Hassink y Whitmore, 1997). Six *et al.* 2002 postularon que las características físico-químicas inherentes de cada suelo en particular determinan la máxima capacidad de protección y acumulación de carbono.

Con objeto de estudiar el efecto protector de la MOS en sus distintos grados de asociación con la fracción mineral del suelo, se requiere evaluar la cantidad de COS asociado a cada tamaño de agregado y a cada fracción granulométrica. En este trabajo se estudió solamente el segundo caso.

Con objeto de efectuar una separación física completa del suelo en sus diferentes fracciones granulométricas se empleó energía aplicada con una sonda ultrasónica calibrada. Se ha demostrado que la cantidad de energía empleada para dicha separación es crítica (Matus y Maire, 2000). El objetivo de este trabajo fue definir la cantidad de energía con ultrasonido requerida para dispersar tres tipos de suelos volcánicos, en sus componentes principales: arena, limo y arcilla, y evaluar se efecto sobre la dispersión del suelo y la cantidad de COS asociado a cada fracción.

3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1. Sitios de estudio

Se seleccionaron tres suelos de origen volcánico de eje neovolcánico transversal de México (Figura 3.1): (a) Un tepetate cultivado que se colectó en Tlalpan, Tlaxcala, en una parcela con 16 años de cultivo, presentó: textura franca, pH neutro y arcillas con bajo grado de cristalización, (b) Un acrisol que se colectó en Átecuaro, Michoacán, con textura arcillosa, pH ácido, arcillas del tipo caolinita y con abundancia de óxidos de hierro. (c) Un andosol cultivado (perturbado) con pH ácido, textura franco limoso y con arcillas del tipo alófano. El primer sitio fue descrito en el capítulo anterior y el segundo sitio se describe con detalle en el capítulo cinco.

3.2.2. Muestreo de los suelos

Se colectó una muestra de compuesta por 22 submuestras en cada tipo de suelo de 0-20 cm de profundidad con un barreno de acero inoxidable. Cada suelo tenía dos modalidades de manejo agronómico: tradicional (TT) y orgánico (TO). El primero de estos correspondió a parcelas cultivadas como lo hacen comúnmente los agricultores de la zona donde de colectaron los suelos. Con monocultivos de gramíneas, retiro de los rastrojos y una dosis complementaria de fertilizantes químicos nitrogenados. El segundo correspondió a parcelas experimentales donde los últimos tres años (2003 a 2005) se ha practicado la rotación o asociación de cultivos (gramínea-leguminosa), se han adicionado más de tres toneladas de composta por año y se han aplicado una dosis complementaria de fertilizantes químicos nitrogenados y fosfatados.

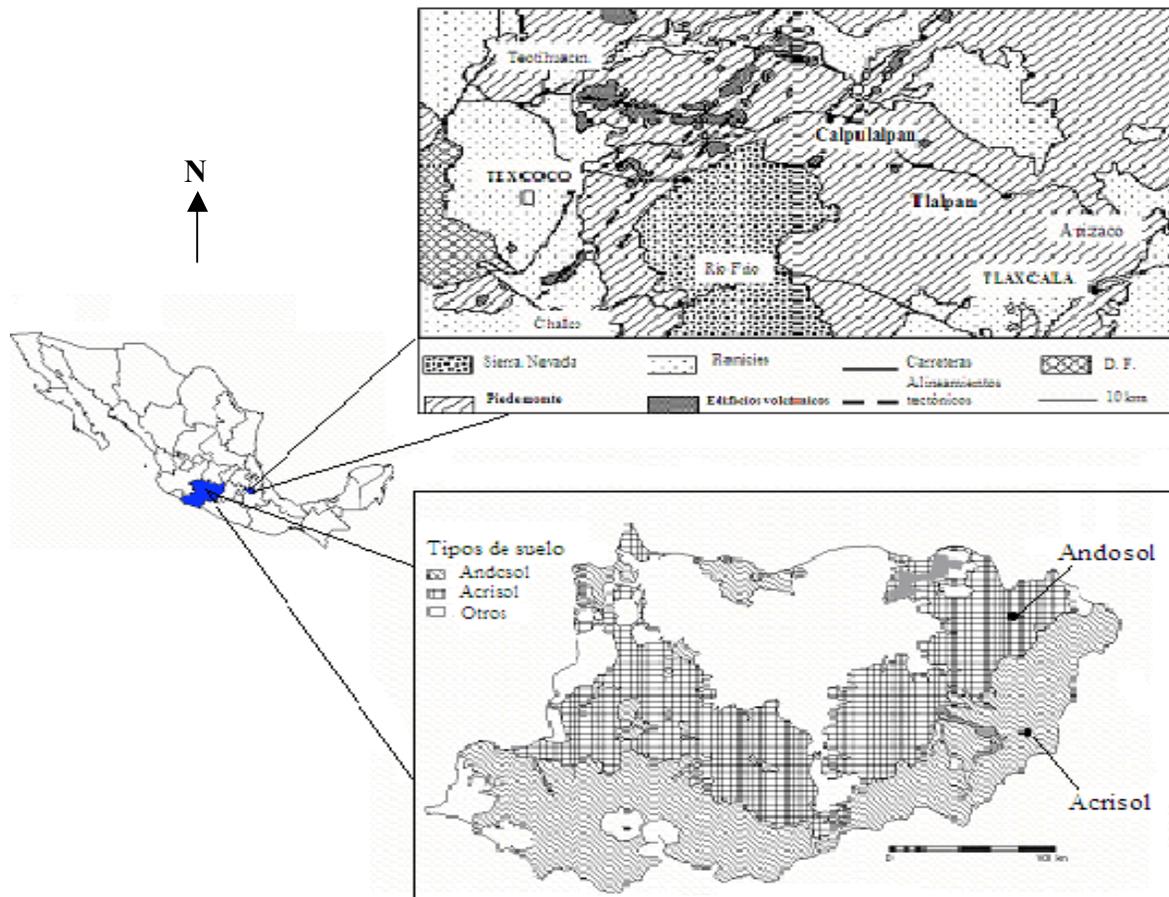


Figura 3.1. Localización de los suelos colectados en el eje neovolcánico de México. (a) Tlalpan, Tlaxcala y (b) Cuenca de Coahuila, Michoacán.

3.2.3 Fraccionamiento de los suelos

El suelo se separó en dos fracciones: $>250 \mu\text{m}$ y $250 \mu\text{m}$. La primera estuvo constituida por la materia orgánica particulada (MOP) y por la arena gruesa (AG). La segunda por arena fina (AF), limo (L) y arcilla (AR). Se colocaron 50 g de suelo seco al aire y tamizado en malla de 2 mm en vasos de acero inoxidable de 500 ml, se les agregó 180 ml de agua destilada y se dejaron reposar durante 24 horas a temperatura ambiente. A cada vaso se adicionaron 10 esferas de vidrio de 5 mm de diámetro y se colocaron en un agitador de vaivén de acción recíproca que se reguló a 60 ciclos minuto^{-1} por 16 horas. La separación se hizo por tamizado en húmedo a través de una malla de $250 \mu\text{m}$. Las fracciones se secaron en vasos de vidrio de 600 ml en estufa a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ de 7 a 10 días. La fracción $<250 \mu\text{m}$ se disgregó en un mortero de ágata, se tomó una muestra de 10 g y se colocó a un vaso de precipitado de 250 mL. Se adicionaron 100 mL de agua destilada y se dejó saturar la muestra por 12 horas a temperatura ambiente. La suspensión en agua fue sometida a cinco niveles de energía con una sonda de ultrasonido: 0, 228, 455, 910 y 1365 J ml^{-1} energías

que se lograron haciéndola funcionar por 0, 10, 20, 40 y 60 minutos, respectivamente. Las muestras sonicadas fueron colocadas en columnas de vidrios y se separaron, de acuerdo con la Ley de Stokes, las partículas correspondientes al tamaño de la AF (250 a 50 μm), del L (50 a 2 μm) y de AR (<2 μm). Las fracciones se secaron en una estufa a 60 °C. La concentración de C en cada fracción de tamaño se determinó con un analizador automatizado para carbono total TOC-5050A Shimadzu. Como referencias para definir la máxima dispersión del suelo se usaron muestras de los mismos suelos que fueron sometidas a análisis de partículas elementales por el método de la pipeta (Van-Reeuwijk 1999).

3.2.4. Análisis estadístico

Se evaluaron un tepetate cultivado, un acrisol y un andosol, cada uno con manejo tradicional y orgánico. Se obtuvo un total de seis tratamientos con tres repeticiones. Se relacionó la proporción de AF, L y AR, de cada tratamiento, con la energía de sonicación y con la concentración de carbono medido para cada fracción separada. Se efectuó un análisis estadístico completamente al azar para evaluar el efecto de la energía aplicada entre tratamientos. Se efectuó la comparación de medias mediante el método de Tukey con $\alpha=0.05$.

3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.3.1. Fraccionamiento físico

En el cuadro 3.1 se presentan el resultado del fraccionamiento físico de las partículas >250 μm y <250 μm en los suelos evaluados. La fracción liviana de la materia orgánica o materia orgánica particulada (MOP) fue menor al 0.5 % en el tepetate y en el acrisol para ambos tipos de manejo (tradicional y orgánico). El contenido mayor de esta fracción se obtuvo en el andosol sobre todo bajo manejo tradicional (1.1-1.4 %).

En el tepetate y el andosol al aplicar 445 J ml^{-1} de energía con ultrasonido, permitió dispersar los suelos, de manera similar o cercana a la dispersión obtenida para determinar la cantidad de las fracciones evaluadas por el método de la pipeta (Cuadro 3.2). En el acrisol, sin embargo, se requirió de mayor energía. En los tepetates las arcillas presentes son de bajo grado de cristalización y además poseen una baja concentración de MOS (Etchevers *et al.*, 1992). Aparentemente la situación anterior influye en la formación de agregados y microagregados con

baja estabilidad. Cabe señalar que cuando los tepetates se roturan, se genera un sustrato constituido de fragmentos, los cuales tienen una dureza y estabilidad mayor que los agregados, pero disminuyen de forma logarítmica con los años de cultivo, y aumenta de la misma forma la producción de agregados, aunque no necesariamente estables (Báez *et al.*, 2007). En el andosol abunda el limo, sin embargo, el porcentaje de arcilla es bajo, entre 16 y 18% en promedio. Este suelo fue deforestado para establecer cultivos, por lo cual, se encuentra muy perturbado y es probable que haya perdido parte de su fracción fina por erosión. Además ha sido expuesto a desecación, situación que no ocurre en forma natural cuando se encuentra con una cubierta vegetal boscosa. En época de sequía, cuando no hay cultivos, el suelo se encuentra bastante suelto. En el acrisol, la abundancia de partículas inferiores a 2 μm y de óxidos de hierro (que atribuyen el color rojo intenso) probablemente contribuyan a una mayor cohesión de las partículas que en los casos anteriores, por lo cual, se requirió de más energía ($>1365 \text{ J mL}^{-1}$) para dispersarlos.

Cuadro 3.1. Recuperación de masa del fraccionamiento de los suelos volcánicos evaluados (promedio tres repeticiones).

Manejo Tradicional							Manejo orgánico						
MOP	Arena gruesa	Energía	Arena Fina	Limo	Arcilla	Total	MOP	Arena gruesa	Energía	Arena Fina	Limo	Arcilla	Total
-----%-----		J mL ⁻¹	-----%-----				-----%-----		J mL ⁻¹	-----%-----			
Tepetate													
0.2	10	0	38a	45a	6d	99	0.5	10	0	40a	43a	3e	97
0.2	9	228	30b	33b	25c	98	0.5	10	228	35b	32b	20d	97
0.2	9	455	29b	31cb	29b	98	0.4	10	455	35b	29c	24c	98
0.2	9	910	28b	29c	32ba	98	0.5	10	910	34b	28cd	26b	97
0.1	10	1365	27b	28c	32a	97	0.4	10	1365	33b	26d	28a	98
Andosol													
1.4	14	0	19a	57a	4e	96	0.9	13	0	19a	58a	5e	97
1.1	14	228	11b	59a	13d	98	0.8	13	228	10a	58a	15d	96
1.4	15	455	10cb	55b	18c	99	0.8	12	455	9b	56b	19c	96
1.3	14	910	9cd	51c	23b	99	0.7	12	910	8cb	51c	24b	96
1.2	14	1365	8d	48d	27a	99	0.6	11	1365	7c	49d	29a	96
Acrisol													
0.3	2	0	22a	58a	16e	98	0.4	3	0	22a	61a	12e	98
0.5	3	228	8b	41b	43d	95	0.4	3	228	10b	48b	37d	98
0.5	2	455	8b	38cb	51c	100	0.4	3	455	8cb	40c	47c	98
0.5	2	910	8b	34cb	54b	99	0.5	3	910	8cb	36d	52b	98
0.6	3	1365	8b	32c	56a	100	0.5	2	1365	6c	32e	54a	96

MOP: materia orgánica particulada. Letras semejantes son estadísticamente iguales en la aplicación de energía de cada fracción. ($\alpha=0.05$).

Los resultados del fraccionamiento de microagregados en partículas elementales, mostraron de manera global, que la proporción de arcilla aumentó de forma logarítmica en función de la energía aplicada; en tanto, la proporción de limo y arena fina disminuyeron de manera inversa (Figura 3.2). En el andosol y el tepetate, la proporción de la fracción arcilla aumentó significativamente ($p \leq 0.05$) al aumentar la energía aplicada con ultrasonido, simultáneamente disminuyeron inversamente los porcentajes de las fracciones de mayor tamaño (Figura 3.2). La tendencia de la curva correspondiente al acrisol (Figura 3.2) sugiere el mismo comportamiento para la fracción arcilla.

Se observó que las fracciones limo y arcilla incrementaron a costa de una disminución de la fracción arena fina después de aplicar los diferentes niveles de energía. El TO del tepetate presentó 6% más de arena fina que el TT y 5% menos arcilla que este último, sin embargo esta diferencia se debe a la misma naturaleza de la muestra, como se explicó al inicio de esta sección. Por lo anterior, no se puede atribuir alguna diferencia en el fraccionamiento de este suelo, por efecto a la adición del tratamiento orgánico. El acrisol y el andosol presentaron una tendencia semejante de la distribución de las partículas elementales después de aplicar energía ultrasónica. El TO en estos suelos se proporcionó a partir de los últimos de 3 y 2 años de cultivo, respectivamente. Estos resultados sugieren que dicho tiempo fue insuficiente para mostrar algún efecto en la estructura o cohesión de estos materiales.

Los resultados del fraccionamiento físico evaluado con el método de la pipeta se presentan en el Cuadro 3.2. Los porcentajes de arena, limo y arcilla determinados con este método de referencia para definir la dispersión máxima del suelo, fueron semejantes ($p < 0.05$) a los obtenidos por sonicación, tanto para el tepetate como para el acrisol. Sin embargo, en el andosol éstos fueron diferentes, obteniéndose aproximadamente 10% más arcilla con el método de sonicación. Esto puede explicarse porque las propiedades físicas de este último están condicionadas por su mineralogía (Shoji *et al.*, 1993). Los autores mencionaron que su contenido de arcilla y arena son generalmente inferiores a 25% y que la estructura está formada por agregados muy finos, de tamaño limo y arena fina, como consecuencia de la formación de los complejos orgánico-metálicos que son el origen de este grupo de suelos. Estos complejos presentan alto grado de dificultad para romperse con un análisis granulométrico convencional.

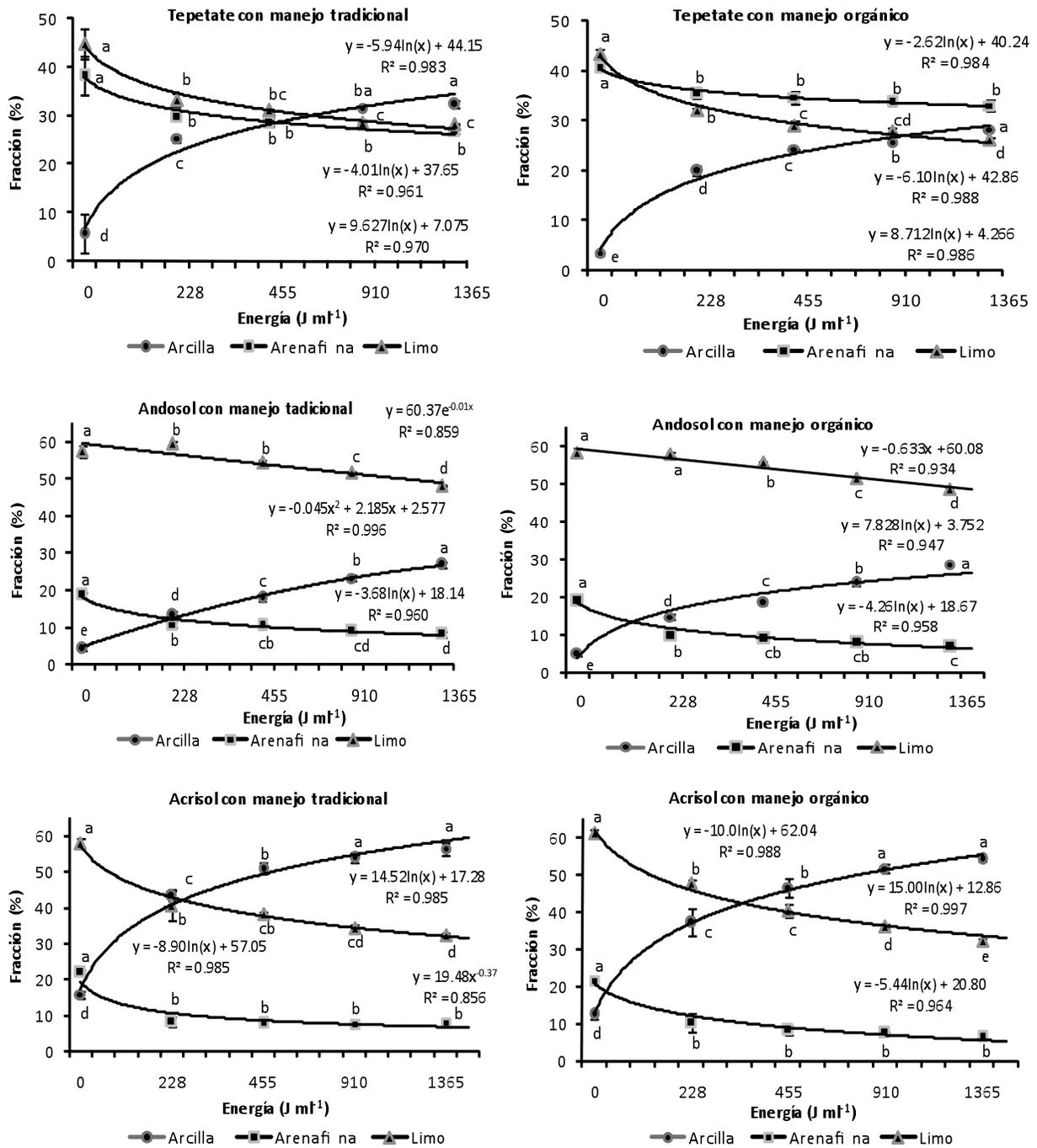


Figura 3.2. Fraccionamiento de microagregados (<250 μm) de tres suelos del eje neovolcánico de México bajo dos manejos agronómicos distintos (promedio de tres repeticiones). Letras semejantes son estadísticamente iguales en la aplicación de energía para cada fracción ($p \leq 0.05$).

En el tepetate con manejo tradicional hubo 8% más arena y 5% menos arcilla respecto al tratamiento con manejo orgánico. El acrisol fue semejante entre ambos tratamientos mostrando una textura arcillosa. En el andosol el tratamiento orgánico (TO) tuvo 10% más limo y 10% menos arena que el tratamiento tradicional (TT). Su clase textural fue franco limosa en ambos casos. Estas diferencias pueden atribuirse a la heterogeneidad natural del suelo.

Cuadro 3.2. Fraccionamiento de tres suelos del Eje Neovolcánico Transversal (ENT), México, mediante dos métodos (promedio de tres repeticiones).

Suelo	Método de la pipeta*						Ultrasonido (1365 J ml ⁻¹)					
	Tradicional			Orgánico			Tradicional			Orgánico		
	Arena	Limo	Arcilla	Arena	Limo	Arcilla	Arena	Limo	Arcilla	Arena	Limo	Arcilla
Tepetate	36	36	28	44	33	23	39±0.6	29±0.1	32±1.2	46±1.1	26±0.5	28±0.0
Acrisol	10	37	53	7	37	56	12±0.4	32±0.6	56±1.8	15±0.1	32±0.1	53±1.0
Andosol	33	51	16	21	61	18	24±0.7	49±0.3	27±0.7	16±0.5	50±0.5	29±0.5

*: No se cuenta con repeticiones

Los resultados del fraccionamiento evaluado mediante el método de la pipeta, como referente, y aplicando energía con ultrasonido, mostraron algunas diferencias. Al relacionar los porcentajes de de las partículas elementales correspondientes a cada suelo, se tuvo que en el caso tepetate, el coeficiente de correlación entre ambos métodos fue $r=0.73$; si bien la proporción de arena fue semejante entre ambos, el limo y la arcilla difirieron 5%. Contrario al caso anterior, fue el del acrisol, que presentó un coeficiente de correlación muy estrecho ($r=0.96$), a pesar de que el porcentaje de arena de TO fue 8% menor cuando fue determinado por el método de la pipeta. El andosol tuvo una correlación intermedia entre ambos ($r= 0.87$).

3.3.2. El carbono asociado a las fracciones

En el Cuadro 3.3 se presentan los resultados del COS contenido en cada uno de los suelos evaluados y el COS asociado a las fracciones $>250 \mu\text{m}$ y $<250 \mu\text{m}$. La concentración de COS contenido en el en el andosol (en el suelo entero) presentó 14 veces más COS que el tepetate y 2.5 más que el acrisol. El COS de la MOP del andosol fue 10 veces mayor que en el tepetate y cuatro veces mayor que en el acrisol.

Al igual que las fracciones limo y arcilla incrementaron a costa de una disminución de la fracción arena fina después de aplicar los diferentes niveles de energía, el COS también lo hizo, por lo que

se deduce que este elemento debe estar asociado a estas fracciones. Si bien, el efecto de la energía aplicada para la recuperación de fracciones tuvo un comportamiento que se ajustó a modelos logarítmicos en todos los casos (Figura 3.3 y Cuadro 3.3), cuando se evalúa el COS asociado a las fracciones separadas por ultrasonido, los modelos no fueron logarítmicos en todos los casos. En el tepetate y el andosol, el COS del limo no mostró cambio ($p \leq 0.05$) por efecto de la aplicación de energía con ultrasonido, sin embargo, el COS de la arcilla si mostró una ligera disminución al aumentar la cantidad de energía. Este comportamiento del COS en la fracción arcilla ha sido descrito por Christensen (1992). Hassink y Whitmore (1997) explicaron que esta situación ocurre principalmente en suelos arcillosos, donde los microagregados presentan una estructura masiva y el área por unidad de peso de la arcilla es menor, por lo cual, el C se adsorbe menos en estas fracción. El caso del tepetate no es un sustrato arcilloso, pero presentó un comportamiento semejante.

Cuadro 3.3. C orgánico asociado a las fracciones >250 μm y <250 μm en los suelos evaluados (promedio de tres repeticiones).

Suelo entero	Manejo tradicional							Manejo orgánico							
	MOP	Arena gruesa	Energía J ml^{-1}	Arena fina	Limo	Arcilla	Total	Suelo entero	MOP	Arena gruesa	Energía J ml^{-1}	Arena fina	Limo	Arcilla	Total
	g kg^{-1}								g kg^{-1}						
Tepetate															
3.3	0.4	0.1	0	0.7a	2.3a	0.7a	4.1	4.3	0.9	0.1	0	0.6a	2.8b	0.4a	4.9
3.3	0.4	0.0	228	0.1b	1.8a	1.8b	4.0	4.3	1.1	0.1	228	0.1cb	2.4a	1.6b	5.2
3.3	0.4	0.0	455	0.0b	1.6a	2.1b	4.1	4.3	1.0	0.1	455	0.2b	2.1a	2.0b	5.4
3.3	0.5	0.0	910	0.0b	1.5a	2.2b	4.3	4.3	1.2	0.1	910	0.0c	2.0a	2.6b	5.9
3.3	0.3	0.0	1365	0.0b	1.5a	2.2b	4.0	4.3	1.1	0.0	1365	0.0c	1.7b	2.9b	5.8
Andosol															
46.7	3.7	2.0	0	5.6a	32.4b	2.7a	46.3	48.5	3.0	2.2	0	6.0a	32.7a	2.9a	46.8
46.7	3.8	2.0	228	1.6b	33.6a	7.1b	48.2	48.5	3.0	2.1	228	1.4b	32.5a	8.2b	47.2
46.7	4.5	2.0	455	1.3c	31.2a	9.5c	48.4	48.5	2.9	1.9	455	1.1c	31.2a	10.2b	47.3
46.7	4.4	1.7	910	1.0c	29.5a	12.2c	48.8	48.5	2.5	1.9	910	0.8c	29.2a	12.9b	47.3
46.7	4.5	2.0	1365	0.8d	27.9a	13.7c	49.0	48.5	2.0	2.0	1365	0.6d	27.6a	15.5b	47.7
Acrisol															
19.9	1.1	0.1	0	3.1a	12.6a	3.1a	20.0	18.8	1.2	0.3	0	2.9a	13.6c	2.6a	20.6
19.9	1.4	0.3	228	0.5b	10.3a	8.2a	20.8	18.8	1.2	0.2	228	0.8b	12.0b	7.2ba	21.4
19.9	1.4	0.2	455	0.4cb	10.4a	9.5a	21.9	18.8	1.1	0.2	455	0.5cb	10.3ba	9.1ba	21.2
19.9	1.3	0.2	910	0.3c	9.4a	10.4a	21.7	18.8	0.9	0.2	910	0.4cb	9.7ba	10.1b	21.3
19.9	1.5	0.2	1365	0.4c	9.2a	10.8a	22.1	18.8	0.7	0.2	1365	0.2c	8.5a	9.0c	18.6

MOP: materia orgánica particulada. Letras semejantes son estadísticamente iguales en la aplicación de energía de cada fracción. ($p \leq 0.05$).

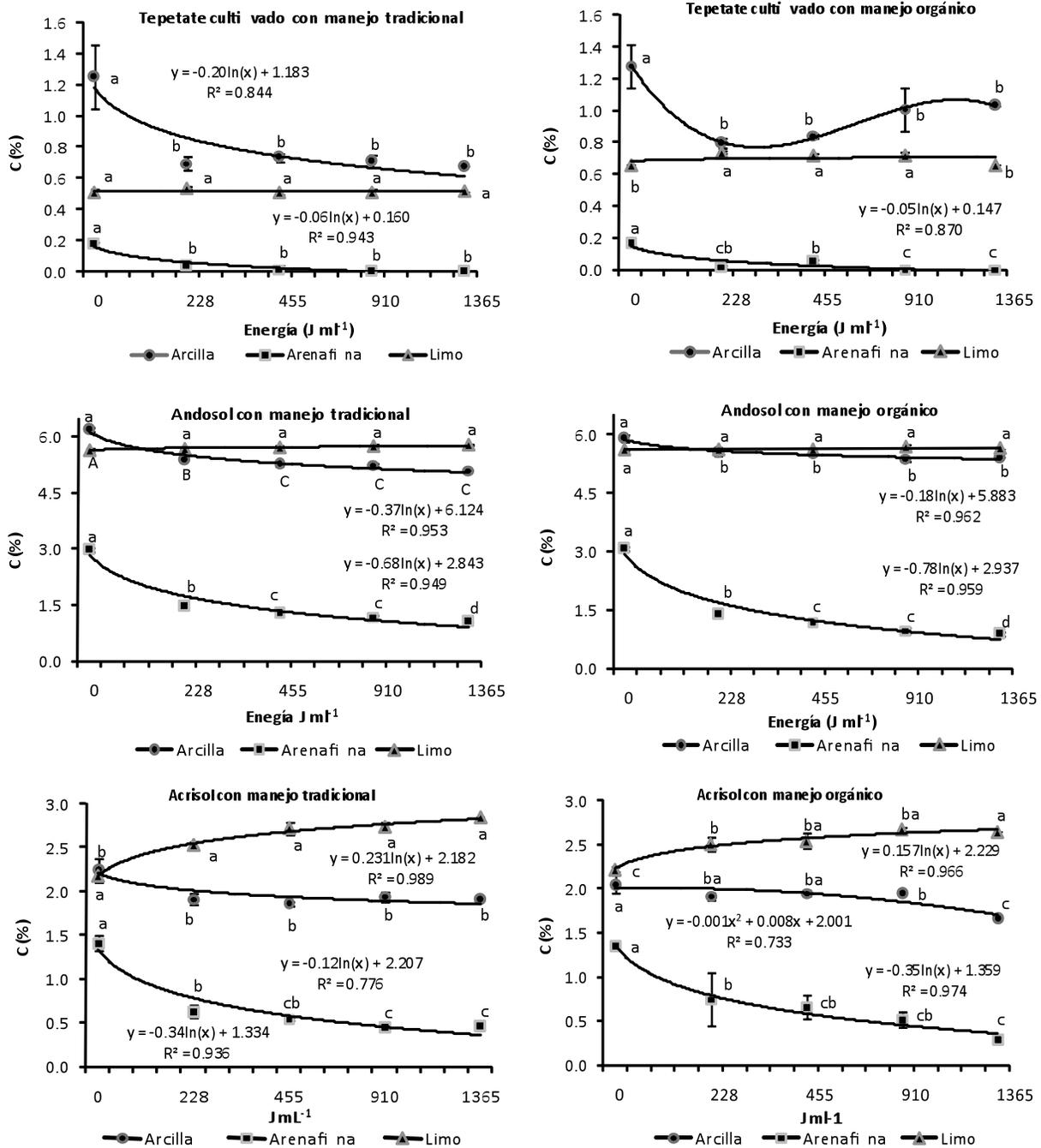


Figura 3.3. C orgánico en arena fina, limo y arcilla de tres suelos del eje neovolcánico de México bajo dos manejos agronómicos distintos (promedio de tres repeticiones). Letras semejantes son estadísticamente iguales en la aplicación de energía para cada fracción ($p \leq 0.05$).

El COS del tepetate se acumuló mayormente en la fracción arcilla. El COS asociado al limo en TO fue 0.2% más (en términos absolutos) que en TT. La arena fina, por su parte, no presentó COS después de que se aplicaron más de 445 $J ml^{-1}$. Con la aplicación de energías inferiores a

ésta persistieron agregados del tamaño arena que contienen C. Estos están conformados probablemente por arcilla y limo, lo cual explicaría la presencia de COS en esta fracción a esas energías.

El acrisol mostró una distribución semejante del COS de las partículas elementales tanto para el TO como en el TT. No hubo efecto de la adición de MO. La mayor cantidad de C se encontró en la fracción limosa (2.9 % COS). Después de aplicar el máximo nivel de energía la arcilla tuvo una concentración de 2% de COS, mientras que en la arena fina ésta fue de alrededor de 0.5 % carbono. En el andosol se encontró que había una concentración alta de COS ($\approx 6\%$ COS), semejante en la fracción limo y arcilla. Sin embargo, dado el bajo porcentaje de arcilla que tuvieron estos suelos, la cantidad de COS asociada al limo resultó ser mayor. La arena fina acumuló cerca de 1% de carbono.

Si se presentan los resultados indicando la cantidad de C acumulado en las distintas fracciones por cada kilogramo de suelo (Cuadro 3.3 y Figura 3.4) se observa que si bien, en el tepetate, la proporción de limo y arcilla son semejantes, esta última presentó más COS que el limo. La arena fina prácticamente no presentó COS en este sustrato volcánico. En el andosol la cantidad de COS fue de alrededor de 6% tanto para el limo como para la arcilla (Figura 3.3), sin embargo al realizar el balance de su contenido en el suelo, el limo fluctuó de 28 a 39 g kg⁻¹ de suelo y la arcilla de 14 a 29% g kg⁻¹. Esta diferencia se explica por una mayor proporción del limo (50%) respecto a la arcilla (30%), lo que ocasionó que el aporte de COS de esta última fuera hasta tres veces mayor que el limo. Las arenas presentes en este tipo de suelo tuvieron una baja concentración de carbono después de aplicar 1365 J mL⁻¹, alrededor de 0.7 g kg⁻¹ de suelo, tanto para el manejo orgánico, como para el manejo tradicional.

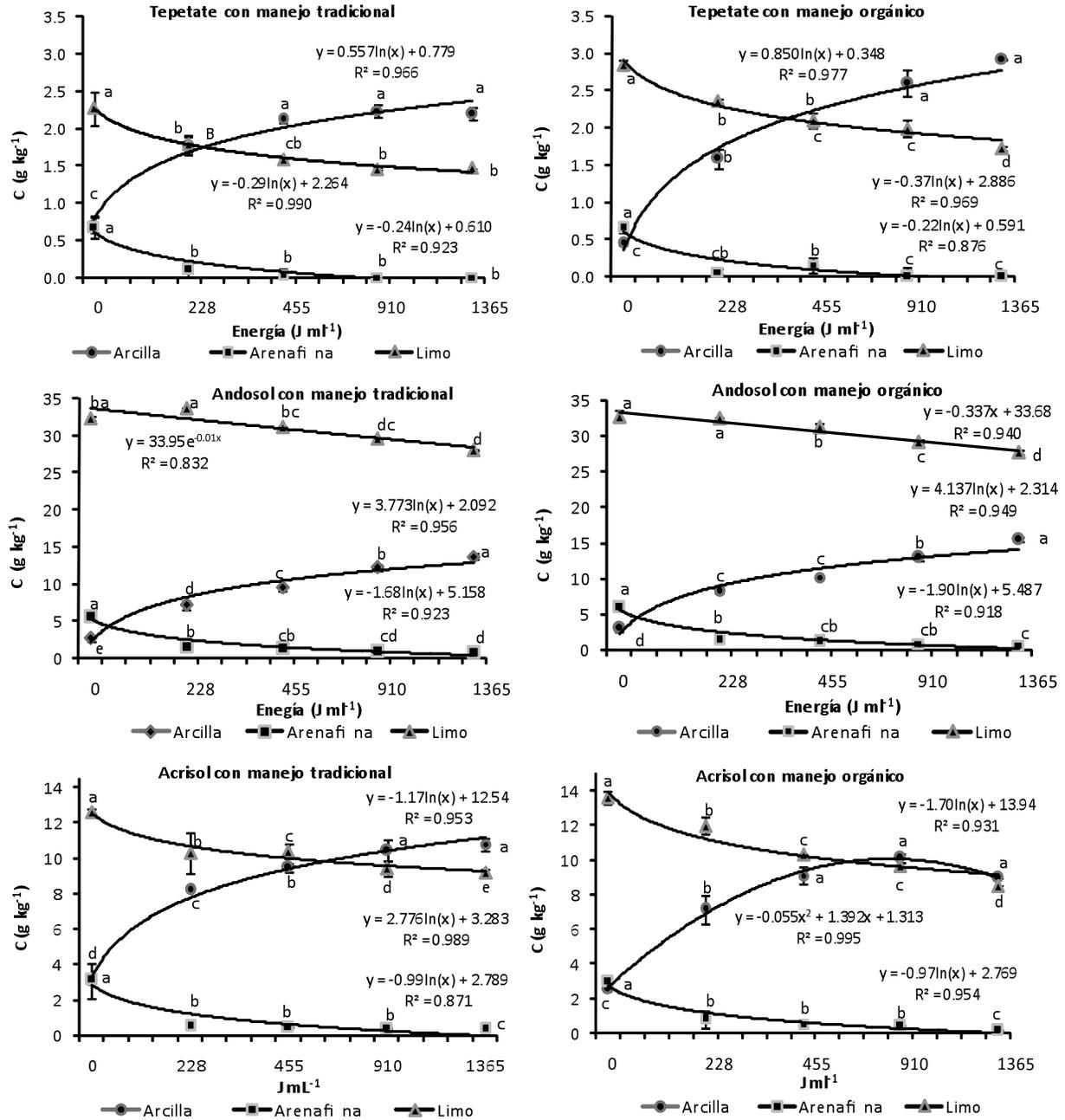


Figura 3.4. Balance de C orgánico en tres suelos del eje neovolcánico de México bajo dos manejos agronómicos distintos (promedio de tres repeticiones). Letras semejantes son estadísticamente iguales en la aplicación de energía para cada fracción ($p \leq 0.05$).

Antes de aplicar energía con el ultrasonido, el acrisol mostró una concentración de COS semejante entre el limo y la arcilla, para ambos tipos de manejo (2.2%). Aparentemente el C asociado a la arcilla se fue transfiriendo al limo a medida que se aplicaba energía con el ultrasonido. De tal modo que esta última fracción adsorbió 20% más C que la fracción arcillosa

(Figura 3.3). Este comportamiento fue contrario a lo observado en el tepetate. Sin embargo, la proporción de arcilla en el acrisol representó más de 60% del total, por lo tanto al efectuar el balance del contenido total de COS en el suelo, el limo y la arcilla aportaron una cantidad semejante de COS por cada kilogramo de suelo. Las arenas finas en el acrisol retuvieron poco COS después de aplicar 910 J mL^{-1} con el ultrasonido.

3.4. CONCLUSIONES

La energía aplicada a una suspensión de suelo para separarlo en fracciones de arena fina (50-250 μm), limo (2-50 μm) y arcilla (<2 μm) fue diferente en cada tipo de suelo. Esta dependió en parte a la proporción limo y arcilla y a la naturaleza misma de los minerales.

El COS se acumuló mayormente en la fracción arcillosa del tepetate, en la fracción limosa del acrisol y en el andosol fue semejante en ambas fracciones.

La acumulación de COS en cada tipo de suelo dependió de capacidad de adsorción del limo y arcilla y de la proporción relativa de dichas fracciones. En el tepetate el COS se asoció mayormente en la fracción arcilla (1.3%), en el Acrisol al limo (2.9%) y en el andosol fue semejante en ambas fracciones (5.8%).

La transferencia arcilla desde las fracciones arena fina y limo después de aplicar diferentes niveles de energía, fue muy evidente, y junto con estas también la transferencia de carbono. La proporción de arcilla aumentó logarítmicamente en el tepetate y acrisol en función de la energía aplicada; en tanto, la proporción de limo y arena fina disminuyó de manera inversa. En el andosol este comportamiento fue lineal. El COS mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) por tipo de manejo solamente en el tepetate. Esto sugiere que el tepetate puede almacenar más COS con mayor adición de materia orgánica. En el acrisol y andosol mostraron una acumulación de COS semejante en ambos tipos de manejo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al proyecto REVOLSO (contrato europeo no. ICA4-CT-2001-10052) y a CONACYT por el financiamiento otorgado para realizar esta investigación.

3.5. LITERATURA CITADA

- 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, and C. Hidalgo. 2007. Formation of aggregates and carbon sequestration in ameliorated tepetates in the Rio Texcoco basin, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 24:487-497.
- Christensen, B. T. 1992. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Advance of Soil Science* 20:1-89.
- Elliott, E.T., and D.C. Coleman. 1988. Let the soil work for us. *Ecological Bulletins* 39:23-32.
- Etchevers, J.D., R.M. López, C. Zebrowski y D. Peña. 1992. Fertilidad de los tepetates de la vertiente occidental de la sierra nevada (México). *Terra* 10 (Número especial): 379-384.
- Etchevers, J.D., C. Hidalgo, C. Prat y P. Quantin. 2006. Tepetates of Mexico. *In: Encyclopedia of soil science*. Lal, R. (Ed.). Marcel Dekker, Nueva York, pp: 1745-1748.
- FAO-UNESCO-ISRIC. 1998. Mapa de suelos dominantes, escala 1: 4 000 000, primera aproximación. SEMARNAP/CP/INEGI. México, D. F.
- Guerrero-Eufracio, E.L., J.L. Luna y E.C. Ochoa. 1992. Distribución de los tepetates de la República Mexicana. Escala 1:4000, 000. *Terra* 10 (Número especial): 131-136.
- Golchin, A., J.M. Oades, J.O. Skjemstad., and P. Clarke. 1994. Soil structure and carbon cycling. *Australian Journal of Soil Research* 32:1043-1068.
- Hassink, J. 1994. Effects of soil texture and grassland management on soil organic C and N and rates of C and N mineralization. *Soil biology and biochemistry* 26:1221-1231.
- Hassink, J., and A.P. Whitmore. 1997. A model of the physical protection of soil organic matter in soils. *Soil Science Society of America Journal* 61:131-139.
- Hidalgo M., C. 1995. Étude d'e horizons indurés à comportement de fragipan, appelés tepetates, dans les sols volcaniques de la vallée de México. Tesis doctoral. Paris, Francia.
- INEGI. 2004. Conjunto de datos vectoriales de la carta fisiográfica, escala 1:1000,000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México. Aguascalientes, Ags., México.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304:1624-1627.
- Matus, F. J. y C. R. Maire. 2000. Relación entre la materia orgánica y textura del suelo y tasa de mineralización de carbono y nitrógeno. *Agricultura técnica de Chile* 60:112-126.

- Matus, F., C. Lusk, and C.R. Maire, 2008. Effects of soil texture, C input rates and litter quality on free organic matter and N mineralization in Chilean rain forest and agricultural soils. *Communications in Soil Science and Plant and Soil Analysis* 39:187-2001.
- Miehlich, G. 1992. Formation and properties of tepetate in the central highlands of Mexico. *Terra* 10 (Número especial): 136-144.
- Ortiz V., B., y C. Ortiz A. 1991. Edafología. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, Estado de México, pp: 135-138.
- Peña, H.D., M.E. Miranda, C. Zebrowski, y H. Arias, 1992. Resistencia de tepetates de la vertiente occidental de la sierra nevada. *Terra* 10 (Número especial): 194-170.
- Quantin, P., C. Zebrowski, M. Delaune y C. Hidalgo. 1992. El material original de los tepetates t2 y t3 de la región de Texcoco (México): ¿loess o cinerita?. *Terra* 10 (Número especial): 378-382.
- Quantin, P., H. Arias, J.D. Etchevest, R. Ferrera-Cerrato, K. Olechko, H. Navarro, G. Werner y C. Zebrowski, 1993. Tepetates de México: Caracterización y Habilitación para la Agricultura. *Terra* 11 (Número especial) 1-25.
- Shoji, S., M. Nanzio, and R. A. Dalhgren. 1993. Volcanic ash soils. Genesis, properties, and utilization. *Developments in Soil Science* 21. Elsevier, Amsterdam, Nertherlans. pp. 8-30.
- Shoji, S., M. Nanzio, R. A. Dalhgren, and P. Quantin. 1996. Evaluation and proposed revisions of criteria for andosols in the world reference base for soil resources. *Soil Science* 161:605-615.
- Six, J., R.T. Conant, E.A. Paul, and K. Paustian. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturations of soils. *Plant and soil* 241:155-176.
- Tisdall, J.M., and J.M. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science* 33:141-163.
- Van-Veen, J.A., and Kuikman P.J. 1990. Soil structural aspects of decomposition of organic matter by micro-organisms. *Biogeochemistry* 11:213-233.
- Van-Reeuwijk, L.P. (Ed.). 1996. Procedures for soil analysis. Fifth edition. International Soil Reference and Information Centre, Wageningen, the Netherlands.

CAPITULO IV. PROTEÍNAS DEL SUELO RELACIONADAS CON LA GLOMALINA (PSRG) Y EL SECUESTRO DE CARBONO EN TEPETATES CULTIVADOS

RESUMEN

Los tepetates habilitados para la agricultura presentan potencial para secuestrar carbono (C), pero se desconoce dónde y cómo lo secuestran. Para contribuir al entendimiento de este fenómeno se evaluó el contenido de C orgánico del suelo (COS), la PSRG y C de la ésta (C-PSRG) en estos sustratos. Los objetivos del presente estudio fueron: (1) comparar la eficiencia en la extracción de la PSRG con pirofosfato de sodio y con citrato de sodio; (2) evaluar la acumulación de COS, glomalina y C-PSRG en los tepetates cultivados en diferentes condiciones de manejo agronómico y tiempo de cultivo; (3) medir el aporte de C con que contribuye la glomalina al COS en estos materiales volcánicos. Con el propósito de contar con una base de posibles puntos de muestreo, se entrevistaron productores de la cuenca del río Texcoco, Estado de México, y se seleccionaron 87 parcelas. Se definieron diez clases de manejo agronómico: (I) tepetate recién roturado, (II) cereales sin rotación sin estiércol, (III) Cereales con rotación sin estiércol, (IV) Leguminosas con rotación y poco estiércol, (V) Cereales con rotación con estiércol, (VI) Leguminosas con rotación con estiércol, (VII) cultivos perennes sin labranza sin riego, (VIII) cama invernadero con estiércol, (IX) cultivos perennes sin labranza con riego y (X) cama invernadero con composta de madera; y dos suelos como testigos (XI) suelo Feozem con manejo convencional y (XII) suelo andosol con cultivos perennes con riego. Se recolectaron muestras de tepetate cultivado (0-20 cm de profundidad) y se analizaron para COS, PSRG y el C-PSRG. El pirofosfato de sodio extrajo tres veces más PSRG y dos veces más C-PSRG que el citrato de sodio ($p \leq 0.05$). La PSRG y el C-PSRG se correlacionaron estrechamente con el COS. El tipo de manejo agronómico de las parcelas influyó estas variables. La concentración más alta de COS en los tepetates se encontró en la clase IX con cerca de 90 Mg ha^{-1} en los primeros 20 cm de profundidad, con una aportación de 30% del C-PSRG de la glomalina cuando extraída con pirofosfato y de 15% cuando solubilizada con citrato ($p \leq 0.05$).

Palabras clave: Ácidos húmicos, hongos micorrízico arbusculares, suelos volcánicos.

4.1. INTRODUCCIÓN

Los tepetates son capas de materiales de origen volcánico (piroclastos) endurecidas por procesos geológicos o pedológicos, muchas veces cubiertas por un suelo superficial (Etchevers *et al.*, 2006). La mayoría de los piroclastos fueron depositados durante el terciario y cuaternario (Peña y Zebrowski, 1992). Los tepetates son abundantes en el eje Neovolcánico de México, cubren poco más de 37 000 km² de superficie (Zebrowski, 1992). Procesos erosivos naturales e inducidos por el hombre provocan el afloramiento de las capas subyacentes de tepetates en extensas áreas de esa región. En su condición natural los tepetates no son aptos para sostener vegetación, sin embargo, si se roturan y se hace un manejo agronómico adecuado pueden habilitarse para la producción agrícola y forestal (Báez *et al.*, 1997; Navarro *et al.*, 2003). Una condición fundamental para tener éxito en la habilitación de los tepetates es ayudar a que se genere un proceso de agregación, ya que en su condición natural ésta es prácticamente inexistente. Las características físicas, químicas y biológicas de los tepetates fueron descritas por Etchevers *et al.* (1992a) y Peña *et al.* (1992). Este sustrato presenta bajos contenidos de C, N y P, elementos esenciales para la fertilidad de los suelos y la nutrición de los cultivos, por lo cual, la materia orgánica es imprescindible para generar fertilidad en el sustrato roturado, mientras que el C húmico es necesario para mejorar sus propiedades físicas (Oades, 1988). La escasa materia orgánica y carbono soluble de los tepetates (Etchevers *et al.* 1992b) explica la baja población de microorganismos en aquellos no roturados (2.3×10^4 bacterias, 11.8×10^3 actinomicetos y 6.57×10^1 hongos) (Álvarez, 1992). La actividad metabólica de estos microorganismos sirve para transformar la materia orgánica que se adiciona a los tepetates en humus (Álvarez *et al.*, 2000; Ferrera-Cerrato, 1992). El humus es una sustancia carbonácea condensada de larga residencia en el suelo y, adicionalmente, un material asociado al llamado secuestro de carbono. De especial interés son los hongos micorrízico arbusculares (HMA) que contribuyen a la formación y estabilidad de agregados del suelo; el micelio de estos organismos y las sustancias que secretan aglutinan las partículas elementales del suelo (González *et al.*, 2004; Wright y Upadhyaya, 1996). Recientemente se ha identificado en la rizosfera una glicoproteína derivada de la actividad de las hifas de los HMA, llamada glomalina, un compuesto orgánico específico de estos hongos (Wright y Upadhyaya, 1998). La glomalina almacena C en las subunidades de proteína y carbohidratos, contiene de 30 a 40% de C orgánico y funciona como un cementante que aglutina fuertemente partículas de la fracción mineral del suelo y proporciona estabilidad a los agregados

(Franzuebbers *et al.*, 2000; Weller, 2002; Wright *et al.*, 1999). Esta sustancia fue aislada e identificada por Wright y Upadhyaya (1996) a partir del micelio de los HMA. Cuando se evalúa a partir del suelo se denomina proteína del suelo relacionada con la glomalina (PSRG). Un avance importante en el estudio de esta glicoproteína fue la descripción de la secuencia de su gen, trabajo que realizaron recientemente por Gadkar y Rillig, (2006). Aunque esta descripción fue de manera parcial, es una evidencia relevante para la identificación de esta glicoproteína y amplía las perspectivas en el campo de la investigación a nivel de biología molecular.

Según Wright *et al.* (2006) la glomalina es un componente importante de la fracción húmica de la materia orgánica del suelo. Además la participación de la glomalina podría ser mayor que la misma masa micelial (Lovelock *et al.*, 2004; Rillig, 2004). El C de la glomalina es aparentemente recalcitrante (Wright y Upadhyaya, 1998; Rillig *et al.* 2001), es insoluble en agua y en soluciones salinas comúnmente usadas en extracciones de compuestos del suelo (Wright y Jawson, 2000). La glomalina puede durar en los suelos 7 a 42 años, según las condiciones ambientales, el ecosistema y el manejo agrícola de los suelos (Weller, 2002), y puede usarse como un indicador de los efectos del cambio de uso de suelo (Rillig *et al.*, 2003). Sin embargo, la proliferación de HMA, y por tanto la producción de glomalina, puede ser limitada en suelos con alta disponibilidad de P para los cultivos y por prácticas de fumigación; la adición de fertilizantes fosfatados y el empleo de plaguicidas, comunes en la agricultura, podría afectar el establecimiento y funcionalidad de los HMA (Ryan y Graham, 2002).

La dinámica del C orgánico en los tepetates cultivados ha sido abordada por Báez *et al.* (2002); su concentración depende del sistema y tiempo de cultivo y su acumulación no es lineal. Sin embargo, 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 en estos sustratos roturados.

Esta investigación aborda el estudio de la PSRG, el C asociado a ésta y su relación con captura COS. Los objetivos fueron: 1) comparar la eficiencia en la extracción de la PSRG con pirofosfato de sodio y con citrato de sodio, 2) evaluar la acumulación de COS, PSRG y el C asociado a ésta en los tepetates cultivados bajo diferentes condiciones de manejo agronómico y tiempo de

cultivo; 3) medir el aporte de C con que contribuye la PSRG al COS en estos materiales volcánicos.

4.2. MATERIALES Y MÉTODOS

4.2.1. Sitio de estudio

El estudio se realizó con tepetates colectados en la cuenca del río Texcoco, Estado de México ($98^{\circ} 45'$ y $98^{\circ} 50'$ O y $19^{\circ} 27'$ y $19^{\circ} 32'$ N, entre 2300 y 2900 m de altitud, un régimen de humedad ústico a údico, con precipitación de 600 a 900 mm año⁻¹) (Figura 4.1). La actividad volcánica que ha habido en la zona es evidente por la presencia de una serie de depósitos sucesivos de materiales volcánicos mezclados con tobas, brechas, andesitas, riolitas, ceniza volcánica y depósitos clásticos que pudieron ser afectados por glaciares hace unas decenas de miles de años. El relieve existente en la zona es, en general, accidentado, se caracteriza por una gran variedad de geformas con montañas aisladas bajas, cuevas con cañadas, con mesetas y lomeríos. En las partes más altas (altitud superior a los 2900 m) se encuentran las máximas pendientes, las cuales son superiores a 30%, y en la parte baja (altitud inferior a 2400 m) las pendientes son más suaves. En los piedemonte a una altitud entre 2250 y 2900 m se encuentran situados los tepetates, sobre pendientes que van de 11- 30 % (Zebrowski, 1992).

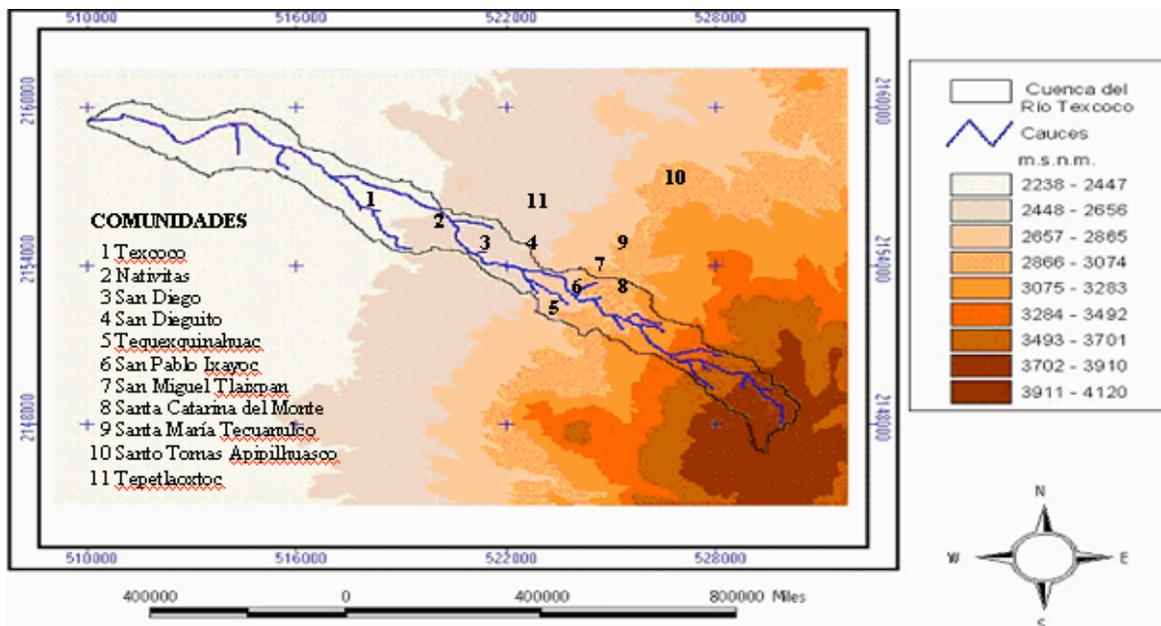


Figura 4.1. Zona de estudio y comunidades de la cuenca del río Texcoco, Estado de México.

Se tiene antecedentes orales que los productores de la zona comenzaron a roturar pequeñas parcelas de tepetate con pico y pala a fines del siglo XIX y que, a mediados del siglo XX, se utilizó maquinaria pesada para el mismo fin, pero en baja escala. Fue hasta 1970 que el gobierno federal y estatal llevaron a cabo programas de reforestación a gran escala en áreas degradadas con tepetates aflorados, para proteger de las inundaciones las ciudades y poblaciones localizadas aguas abajo (Pimentel-Bribiesca, 1992). Es gracias a esos trabajos que en la región existen parcelas con tepetate correspondiente a diversos periodos de cultivo y manejos agronómicos.

Cuadro 4.1. Clases de manejo agronómico en las que se agruparon las parcelas evaluadas de las comunidades de la cuenca del río Texcoco, Estado de México.

Clases (N)	Sistema de cultivo	FO	RC	Sustrato	Descripción
I (4)	-	-	-	Tepetate	Tepetate roturado antes de ser cultivado.
II (15)	Monocultivo de cereales sin rotación	D	E	Tepetate	Monocultivo de maíz (<i>Zea mays L.</i>), trigo (<i>Triticum vulgare L.</i>) y cebada (<i>Hordeum vulgare L.</i>).
III (19)	Monocultivo de cereales con rotación	D	E	Tepetate	Monocultivo de maíz (<i>Zea mays L.</i>), trigo (<i>Triticum vulgare L.</i>) y cebada (<i>Hordeum vulgare L.</i>) con rotación ocasional de leguminosas como frijol (<i>Phaseolus vulgare L.</i>) o haba (<i>Vicia faba L.</i>).
IV (13)	Empleo de leguminosas y poco estiércol	D	E	Tepetate	Cultivo de gramíneas y de leguminosas en parcelas o vía rotación, o monocultivo de gramíneas. Aportes irregulares de estiércol de bovino.
V (4)	Monocultivo de cereales con rotación	C	E	Tepetate	Monocultivo de maíz (<i>Zea mays L.</i>), trigo (<i>Triticum vulgare L.</i>) y cebada (<i>Hordeum vulgare L.</i>).
VI (14)	Empleo de leguminosas y rotación	C	E	Tepetate	Cultivo de gramíneas y leguminosas en rotación, o monocultivo. Aportes regulares de estiércol de bovino. Incorporación de los RC.
VII (3)	Cultivo perenne poco intensivo sin arado	D	I	Tepetate	Cultivo perenne de agapando (<i>Agapanthus africanus Hoffmans</i>), nopales (<i>Opuntia spp.</i>) y agave (<i>Agave spp.</i>). Incorporación de RC y de temporal.
VIII (8)	Cultivo (flores) bajo invernaderos	C	I	Tepetate	Cultivo bajo invernadero con riego. Aportes frecuentes de estiércol bovino y fertilizantes químicos. Uso de plaguicidas.
IX (1)	Cultivo perenne intensivo sin arado	C	I	Tepetate	Cultivo perenne de agapando (<i>Agapanthus africanus Hoffmans</i>), nopales (<i>Opuntia spp.</i>) y agave (<i>Agave spp.</i>). Incorporación de los RC y con riego
X (2)	Cultivo (flores) intensivo bajo invernaderos	C	I	Tepetate	Cultivo bajo invernadero con riego. Aportes frecuentes de estiércol bovino, composta de madera y fertilizantes químicos. Uso de plaguicidas.
XI (3)	Monocultivo tradicional con rotación	D	E	Suelo Feozem	Monocultivo de maíz (<i>Zea mays L.</i>), trigo (<i>Triticum vulgare L.</i>) y cebada (<i>Hordeum vulgare L.</i>).
XII (1)	Cultivo perenne sin arado policultivo	C	I	Suelo andosol	Zarzamora (<i>Rubus fruticosus L.</i>), frambuesa (<i>R. idaeus L.</i>), higuera (<i>Picus carica L.</i>), capulín (<i>Prunus serotina Cav.</i>), durazno (<i>P. persica L.</i>), ornamentales y medicinales

C: continúa, D: débil o ausentes, E: exportados, I: incorporados, FO: fertilización orgánica, N: número de muestras, RC: residuos de cosecha.

Se seleccionaron 87 parcelas de tepetate de una base de datos construida después de realizar una encuesta entre productores. Los sitios seleccionados mostraron amplia variación en cuanto a: tipo de cultivos, tiempo transcurrido desde su habilitación, manejo de los residuos y características generales de los sitios. Los sistemas de manejo empleados por los productores se agruparon en diez clases (Cuadro 4.1) correspondientes a tepetates cultivados. Se incluyeron dos suelos de la misma región como referencia.

4.2.2. Extracción de la PSRG

La concentración de COS, PSRG y el C de ésta (C- PSRG) se midió en muestras compuestas (0 a 20 cm, 22 submuestras por muestra) de cada sitio, que se secaron al aire a temperatura ambiente, se molieron y tamizaron (2 mm). Para medir del COS el material se molió (malla 100; 0.14 mm). Para analizar de C inorgánico se hizo una determinación en una muestra independiente, se usó un analizador automático de C total (Shimadzu, TOC-5050).

La extracción de la PSRG se hizo mediante dos métodos: 1) la olla de presión, (Wright y Jawson, 2001), que usa citrato de sodio 50 mM como extractante; 2) la olla de presión pero usando pirofosfato de sodio 100 mM como extractante (Nichols y Wright, 2005). El C-PSRG se midió en los extractos de PSRG, después de efectuar la diálisis, con el analizador ya señalado.

4.2.3. Análisis estadístico

El diseño fue completamente al azar con distinto número de repeticiones y se hizo un análisis de varianza de los datos. La comparación de medias se examinó con varianzas ponderadas por tamaño de muestra, procedimiento GLM y opción REGWQ (SAS, 1998).

4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.3.1. Cuantificación de PSRG con pirofosfato de sodio y con citrato de sodio

La cantidad de la fracción identificada como PSRG que se extrajo de los tepetates y suelos con el procedimiento propuesto por Wright *et al.* (2006), con base en pirofosfato de sodio, fue hasta tres

veces mayor ($p \leq 0.05$) que el extraído con citrato de sodio (Figura 4.2a). La correlación entre ambas variables fue $r=0.88$. La mayor cantidad de PSRG extraída con pirofosfato se debe a que éste, al ser un extractante más potente, solubiliza más PSRG que el citrato (Wright *et al.*, 2006); según estos mismos autores, el pirofosfato es mejor para extraer PSRG que el citrato.

El C- PSRG extraída con pirofosfato de sodio (1.4% C) fue significativamente ($p \leq 0.05$) mayor que el C- PSRG extraído con citrato (0.7%) (Figura 4.2b). La correlación de estas variables fue más elevada ($r=0.94$) que cuando se relacionaron las concentraciones de la PSRG ($r=0.86$). Los porcentajes del C- PSRG determinados en el presente trabajo fueron menores a los observados por Rillig *et al.* (2001) en un ultisol (3.4% de CG), mientras Borie *et al.* (2000 y 2006) encontraron 2.5 % C en un alfisol y hasta 5% C en un ultisol. Es importante remarcar que en el presente estudio el material analizado es un tepetate, sustrato pobre en materia orgánica y que por si solo es incapaz de sustentar crecimiento vegetal.

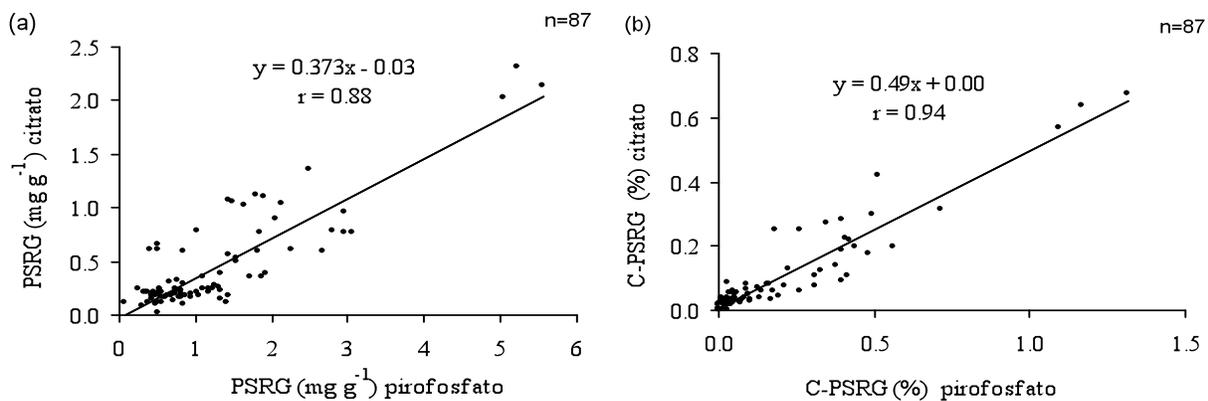


Figura 4.2. Relación entre la concentración de PSRG (a) y C-PSRG (b) obtenidas mediante dos extractantes: pirofosfato de sodio y citrato de sodio, en tepetates cultivados y suelos de referencia de la cuenca del río Texcoco.

El C-PSRG es recalcitrante, por lo que la mayor cantidad extraída con pirofosfato puede provenir de un reservorio ligeramente distinto, probablemente de las sustancias húmicas. Wright *et al.* (2006) mencionaron que la glomalina es un componente principal de la fracción de la materia orgánica del suelo. Ambas sustancias (PSRG y sustancias húmicas) tienen una concentración de C distintas, pero parecen estar íntimamente ligadas (Nichols y Wright, 2005). El pirofosfato es un extractante usado comúnmente para evaluar sustancias húmicas del suelo, y la diálisis y precipitación de la glomalina se hace de manera semejante a la empleada para obtener ácidos húmicos, pero a pH distinto. Nichols y Wright (2005) obtuvieron por separado los ácidos

húmicos y la PSRG, estableciendo las diferencias a nivel molecular de estas sustancias; los resultados de la electroforesis y los espectros de resonancia magnética nuclear de la PSRG no fueron iguales a los de los ácidos húmicos. Esto permitió verificar que la PSRG era el compuesto más abundante y mejor caracterizado, y que no había ocurrido co-extracción de otros compuestos proteicos o taninos (Nichols, 2003; Rillig *et al.* 2001). Sin embargo, para extraer la PSRG y realizar estas pruebas utilizaron citrato, por lo cual, existiría riesgo al utilizar extractantes más agresivos que este reactivo (como el pirofosfato), porque se obtendría PSRG asociada con alguna fracción adicional de sustancias húmicas. La discusión previa: (1) que las fracciones que se extrajeron con estas soluciones no son exactamente las mismas y (2) por lo tanto la composición carbonácea podría ser diferente. Estudios recientes señalan que existen algunos problemas para aislar las PSRG, se sugiere que varias fracciones proteínicas relacionadas con la glomalina se obtienen con los drásticos métodos de extracción (Rosier *et al.*, 2006; Schindler *et al.*, 2007).

Estos señalamientos fortalecen lo observado por otros autores; operacionalmente, la glomalina se cuantifica en el micelio y en suelo por el mismo procedimiento de extracción (Wright y Upadhyaya, 1998). Se ha sugerido que la proteína producida directamente en las hifas de los HMA (glomalina *sensu stricto*) difiere de éstas cuando se cuantifican en el suelo; esto es, que varias fracciones proteínicas relacionadas con la glomalina se obtienen con los drásticos métodos de extracción (Rillig, 2004; Wright y Upadhyaya, 1996). Más recientemente Bolliger *et al.* (2008) evaluaron la pureza de las PSRG y reportaron que aunque existen trazas de proteínas de diferente origen a los HMA, predominante dominan aquellas de origen de una sola proteína glicosilada reactiva a la glomalina definida como: MAb32B11.

La PSRG extraída de los tepetates cultivados y suelos de referencia, con pirofosfato y con citrato, se relacionó con el COS (Figura 4.3a). La relación entre ambas variables fue lineal y estrecha ($r=0.91$ en citrato y $r=0.93$ en pirofosfato), pero los coeficientes de la regresión fueron diferentes para cada extractante: 1.51 para citrato y 0.67 para pirofosfato, lo cual confirma la mayor agresividad del pirofosfato para extraer PSRG. El pirofosfato extrajo significativamente mayor cantidad de C-PSRG que el citrato ($p\leq 0.05$); esta fracción en ambos casos mostró una alta correlación con el COS ($r=0.92$ y $r=0.94$), independientemente de la cantidad extraída (Figura 4.3b), lo cual indicó que la proporción de C en las fracciones extraídas fue prácticamente la misma. Finalmente, la PSRG se relacionó estrechamente con la concentración de COS ($r=0.92$ en

pirofosfato; $r=0.94$ en citrato) (Figura 4.3c). Altas correlaciones, similares a las encontradas en el presente trabajo, se reportaron por Rillig *et al.* (2004), quienes sugirieron que la PSRG puede considerarse una fuente de C del suelo útil para medir los cambios de C en el suelo.

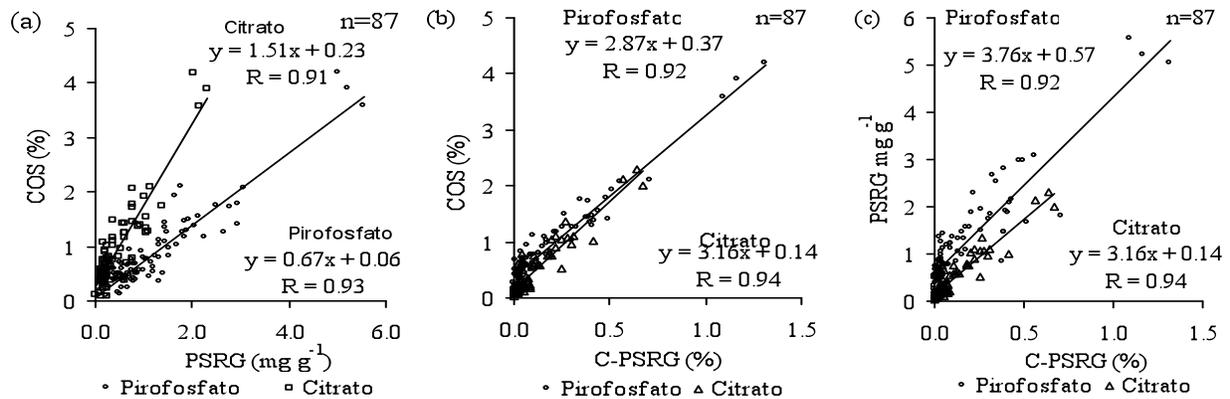


Figura 4.3. PSRG, C-PSRG obtenidos mediante dos extractantes: pirofosfato de sodio y citrato de sodio, y su relación con el COS en tepetates cultivados y suelos de referencias de este estudio. a) Relación COS y PSRG; b) Relación entre COS y C-PSRG; c) Relación entre PSRG y C-PSRG.

4.3.2. COS, PSRG y C-PSRG en los tepetates cultivados

En la Figura 4.4 se muestra la relación entre las clases de manejo agronómico y la concentración promedio de COS en tepetates y suelos de referencia, y el contenido de PSRG extraída con citrato y pirofosfato.

El nivel más bajo de PSRG, considerada un indicador del cambio de uso del suelo (Rillig *et al.*, 2003), se encontró en el tepetate roturado que no había sido cultivado (clase I). Este valor puede usarse como punto de referencia de la condición casi natural de estos materiales, cuando sólo tienen trazas de carbono en su estructura. Con base en esa referencia es posible medir el nivel de acumulación de COS y PSRG a medida que transcurre el tiempo de cultivo, con diferentes manejos agronómicos. Tal situación representa una ventaja para el estudio de C en los tepetates cultivados, porque se puede predecir con cierta precisión, cómo evoluciona el COS en distintas condiciones de manejo agrícola, y de manera paralela cómo evolucionan las características químicas, físicas y biológicas del suelo que se comienza a formar a partir del sustrato inicial que llamamos tepetates.

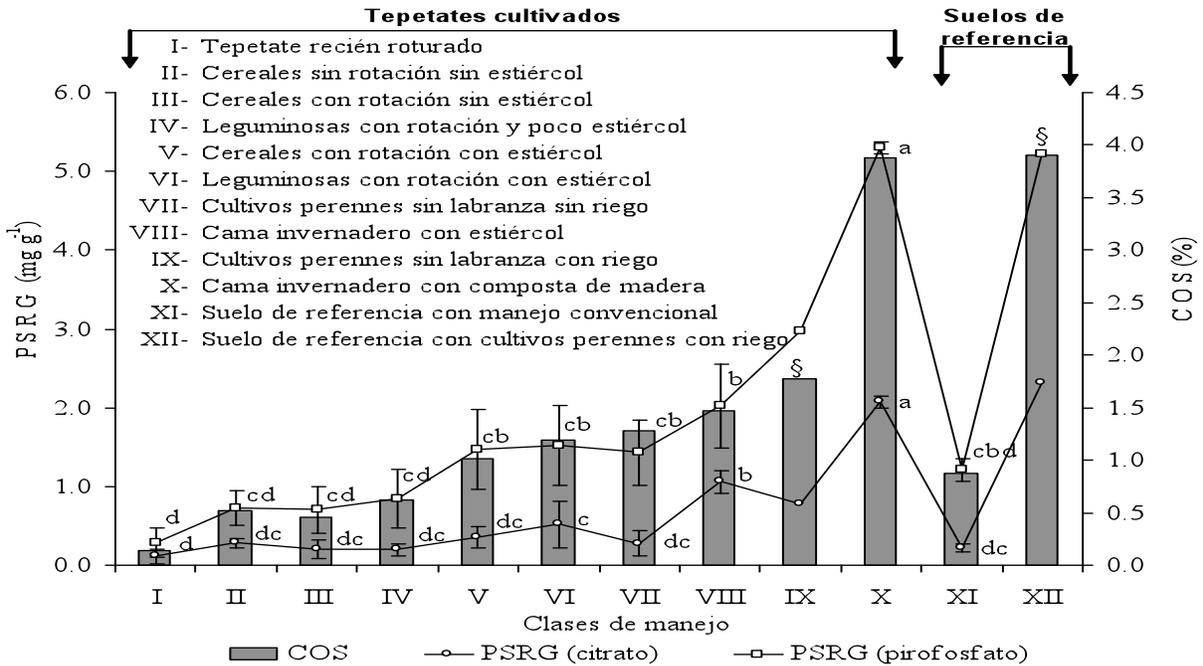


Figura 4.4. Clases de manejo agronómico de los tepetates cultivados y suelos de referencia, y su concentración media de COS y PSRG (cittrato y pirofosfato). Valores con letras diferentes en cada línea son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$). (§) $n=1$, no entra en el análisis estadístico.

Los tepetates cultivados sin y con rotación de cultivo (clases II y III) mostraron un comportamiento parecido en cuanto a su concentración de COS y PSRG extraída tanto con citrato, como con pirofosfato. El COS en estas clases alcanzó en promedio 0.5 % (en contraste con aproximadamente 0.2% COS del tepetate de la clase I) y la PSRG se ubicaron en un intervalo de 0.3 y 0.7 mg g⁻¹ de suelo vs 0.3 y 0.1 mg g⁻¹ de la clase I, siendo mayor el valor extraído con pirofosfato, que con citrato. En estos sistemas agrícolas (clase II y III), los residuos de cosecha regularmente se retiran del campo para alimentar al ganado y la incorporación de abono orgánico es prácticamente nula, por lo que el ingreso de C al sistema, así como la proliferación de HMA y, en consecuencia, la producción de PSRG en estas clases de manejo, es limitada. Es evidente que la calidad agrícola de los tepetates no se puede elevar con este tipo de manejo.

La utilización frecuente de leguminosas en asociación con las gramíneas o por rotación de cultivos (clase IV) incrementa ligeramente la concentración de COS y de PSRG. Sin embargo, esta diferencia no es significativa ($p \leq 0.05$) después de 25 años de cultivo (Figura 4.4). Si al

manejo de la clase anterior se le incorporan abonos orgánicos con relativa frecuencia (clases V y VI), el COS y PSRG aumentan. West *et al.* (2005) mencionaron que con enmiendas orgánicas, al mejorar la retención de agua del suelo, pueden favorecer la actividad micelial de los HMA y la producción de PSRG. En este último caso la PSRG extraída es cercana al doble con respecto a las clases II y III cuando se extrae con pirofosfato, pero sólo leve cuando la extracción se hace con citrato. Este resultado sugiere que el pirofosfato extraería una PSRG más antigua, pero que su composición de C es semejante a la extraída con citrato, como se señaló más arriba. La interacción entre la naturaleza del extractante de la PSRG y el tipo de manejo es evidente.

Los resultados anteriores resaltan la importancia que tiene el uso de leguminosas para aumentar el COS y la PSRG de los tepetates. Se ha documentado que su empleo aumenta el rendimiento de los cultivos establecidos en este sustrato (Báez *et al.*, 1997; Navarro y Flores 1997; Navarro *et al.*, 2003). Las leguminosas tienen afinidad para asociarse exitosamente en doble simbiosis con bacterias fijadoras de nitrógeno y HMA, con lo cuál, además de contribuir con una aportación regular de nitrógeno y fósforo disponible para las plantas (Sánchez-Colín *et al.*, 2000; Ferrera-Cerrato *et al.*, 1997), se favorecería la producción de PSRG por parte de los HMA (González-Chávez *et al.*, 2004).

Los sistemas con cultivos perennes de temporal, donde no se practica labranza y se acumulan los residuos (clase VII), muestran una concentración promedio de COS y glomalina semejante a lo encontrado en las clases V y VI.

En las clases VIII y IX (esta última tiene un manejo agronómico semejante a la clase VII, pero además cuenta con riego), el aumento de COS fue significativo ($p \leq 0.05$), alrededor de 30% mayor con respecto a la clase VII. El C-PSRG extraída con pirofosfato y citrato también aumentó significativamente ($p \leq 0.05$), dos y tres veces, respectivamente, comparado con la clase VII.

Las clases donde no se practicó la labranza tuvieron mayor capacidad para acumular COS y producir PSRG, Lo que se debe a que en los sistemas agrícolas con labranza convencional (barbecho, rastreo, surcado y aporque) se favorece la oxidación de C y las pérdidas de éste en forma de CO_2 , mientras que en labranza reducida la materia orgánica que queda en la superficie

del suelo disminuye la evaporación, la temperatura y el intercambio de gases que interviene en la oxidación biológica de ésta (Reicosky y Lindstrom, 1993). Los HMA también son más abundantes donde no se practica la labranza, 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; Wright *et al.*, 1999), los cuales participan en la protección física del C lábil del suelo y con efecto en el secuestro de C (Six *et al.* 2006).

La acumulación de COS y PSRG extraída en la clase VIII, que corresponde a tepetates que se usan como camas de invernadero, con riego, fertilización química y orgánica y uso de plaguicidas, fueron aproximadamente 1.5% y de 1 a 2 mg g⁻¹ de suelo respectivamente. En la clase X, que también corresponde a camas de invernadero, pero con adición de composta de madera, el C orgánico y PSRG fue más del doble que en la clase VIII, lo cual representa el máximo nivel de estos elementos en los tepetates cultivados. Al comparar las concentraciones de COS y de PSRG de estas últimas dos clases con los suelos agrícolas de la misma región, sometidos a un manejo agronómico convencional (clase XI), se evidencia que los tepetates tienen potencial para acumular estas sustancias. Los resultados observados soportan reportes sobre la implementación de prácticas agronómicas como la cero labranza, rotación de cultivos y uso de leguminosas. A diferencia de las prácticas empleadas en la agricultura convencional (monocultivos, labranza), éstas promueven la actividad fúngica en el suelo (Oehl *et al.*, 2003; Kurle y Pflieger, 1994), la cual se puede expresar también por mayor producción de PSRG (Purin *et al.* 2006; Roldan *et al.* 2006). Estas prácticas agrícolas favorecen una comunidad dominada por hongos tendiendo a incrementar la materia orgánica del suelo y en consecuencia el COS (Six *et al.*, 2006); sin embargo, no se conocen bien los mecanismos. El presente trabajo muestra que los HMA, los hongos más abundantes del suelo, pueden estar participando en estos procesos a través de la PSRG.

La concentración de COS y PSRG de la clase XII que corresponde a un suelo fértil, con cultivos perennes, sin labranza y con riego, fue semejante a los de la clase X. Esto resalta el potencial que tienen los tepetates para la captura de carbono, que según el caso más alto, es de aproximadamente 90 t ha⁻¹, cuando se someten a un manejo tendiente a conservar la materia orgánica (Báez *et al.*, 2002).

4.3.3. Contribución del C-PSRG al COS en los tepetates

En la Figura 4.5 se presenta el COS en los tepetates y suelos de referencia y el C-PSRG extraído con citrato y pirofosfato. En las clases I, II, III y IV la PSRG no aportó una cantidad importante de C recalitrante al COS de los tepetates. En la clase V, VI y VII el aporte fue 6-11% (cuando extraído con citrato) y 16-24% (cuando extraído con pirofosfato). En las clases VIII, IX y X la contribución del C-PSRG fue 10-18% con citrato y 27-31% con pirofosfato. En los suelos de referencia (clases XI y XII) de 5-16% y 15-30%, respectivamente. Estas diferencias fueron significativas ($p \leq 0.05$).

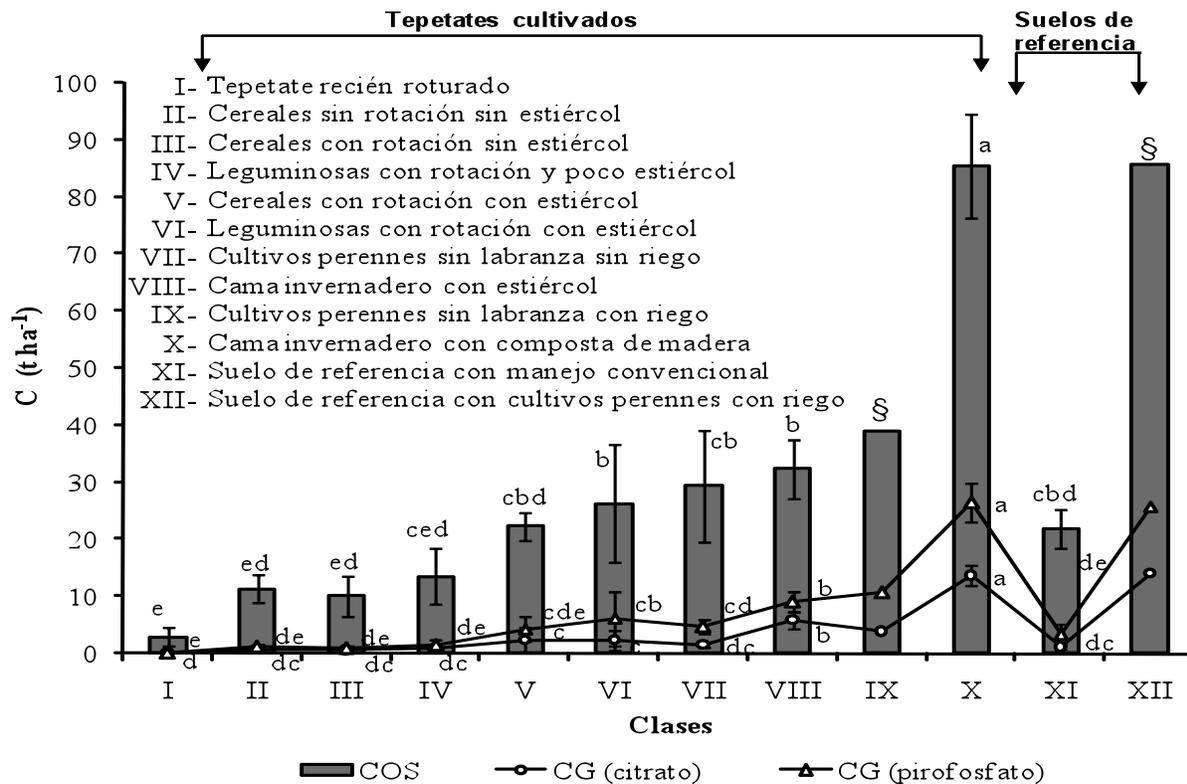


Figura 4.5. COS, C-PSRG (citrato y pirofosfato) en 12 clases de manejo agronómico en tepetates y suelos de referencia. Valores con letras diferentes en cada línea son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$). (§) $n=1$, no entra en el análisis estadístico.

Según Weller (2002) la PSRG medida con citrato puede aportar hasta 27% del COS al suelo. En el presente estudio esta cifra sólo se alcanzó en el tepetate con manejo intensivo (cama de invernadero, clase X) y en el suelo de referencia (clase XII). Es evidente (Figura 4.5) que el C-PSRG aumenta proporcionalmente conforme aumenta el COS. Rillig *et al.* (2003) mencionaron

que esta glicoproteína se correlaciona fuertemente con el COS, el cual, está determinado por el tipo de manejo agronómico.

4.3.4. COS, C-PSRG y tiempo de cultivo

Si se analiza la tasa de acumulación del COS y el C-PSRG en función de los años de cultivo del tepetate; se observa una tendencia general de carácter logarítmico. El nivel de acumulación del C dependió principalmente del manejo agronómico (Figura 4.6). La dispersión que presentan los datos se explica por la irregularidad con que los productores emplean varios tipos de cultivos. Se sabe que ocasionalmente usan leguminosas en asociación o rotación con los cereales, y ocasionalmente agregan estiércol, pero se desconoce la frecuencia exacta. Regularmente, ellos no llevan registro o bitácora del manejo agrícola de sus parcelas. Sin embargo, se infiere que el uso ocasional de leguminosas no produce algún cambio significativo ($P \leq 0.05$) en la acumulación de C, con respecto al monocultivo de cereales sin rotación.

El monocultivo de cereales sin incorporación de abonos orgánicos (clase II) tuvo la menor tasa de acumulación de COS y C-PSRG independientemente del extractante empleado ($R^2=0.58$, 0.41 y 0.46 respectivamente). En este sistema de manejo el COS y el de C-PSRG se estabilizó después de poco tiempo de cultivo (4 a 5 años) en alrededor de 0.5 y de 0.05% , respectivamente (Figura 4.6). Los aportes de C en este tipo de manejo están limitados al escaso rastrojo y raíces que quedan en las parcelas después de las cosechas, ya que todos los esquilmos son exportados. En esas circunstancias es difícil aumentar la concentración de COS y de C-PSRG. Los HMA responsables de producir la glomalina son escasos cuando se aplica este tipo de manejo (Borie *et al.* 2006; González *et al.*, 2004; Wright y Upadhyaya, 1996), y los agregados que se forman carecen de estabilidad (Báez *et al.*, 2007).

La clase VI con uso frecuente de leguminosas e incorporación de estiércoles, fue donde se encontraron las parcelas más antiguas, hasta 100 años de cultivo. La máxima de acumulación de COS en esta clase fue 40 t ha^{-1} y la acumulación de C-PSRG de 1.5 y menos de 1% para aquella extraída con pirofosfato y citrato. El efecto de las leguminosas en la producción de PSRG en los tepetates cuando empleadas con frecuencia, fue notable, ya que esa clase produjo uno de los valores más altos de C recalcitrante. Bird *et al.* (2002) han mostrado que la presencia de

leguminosas es importante para el secuestro de C en el suelo, por su efecto benéfico sobre los HMA.

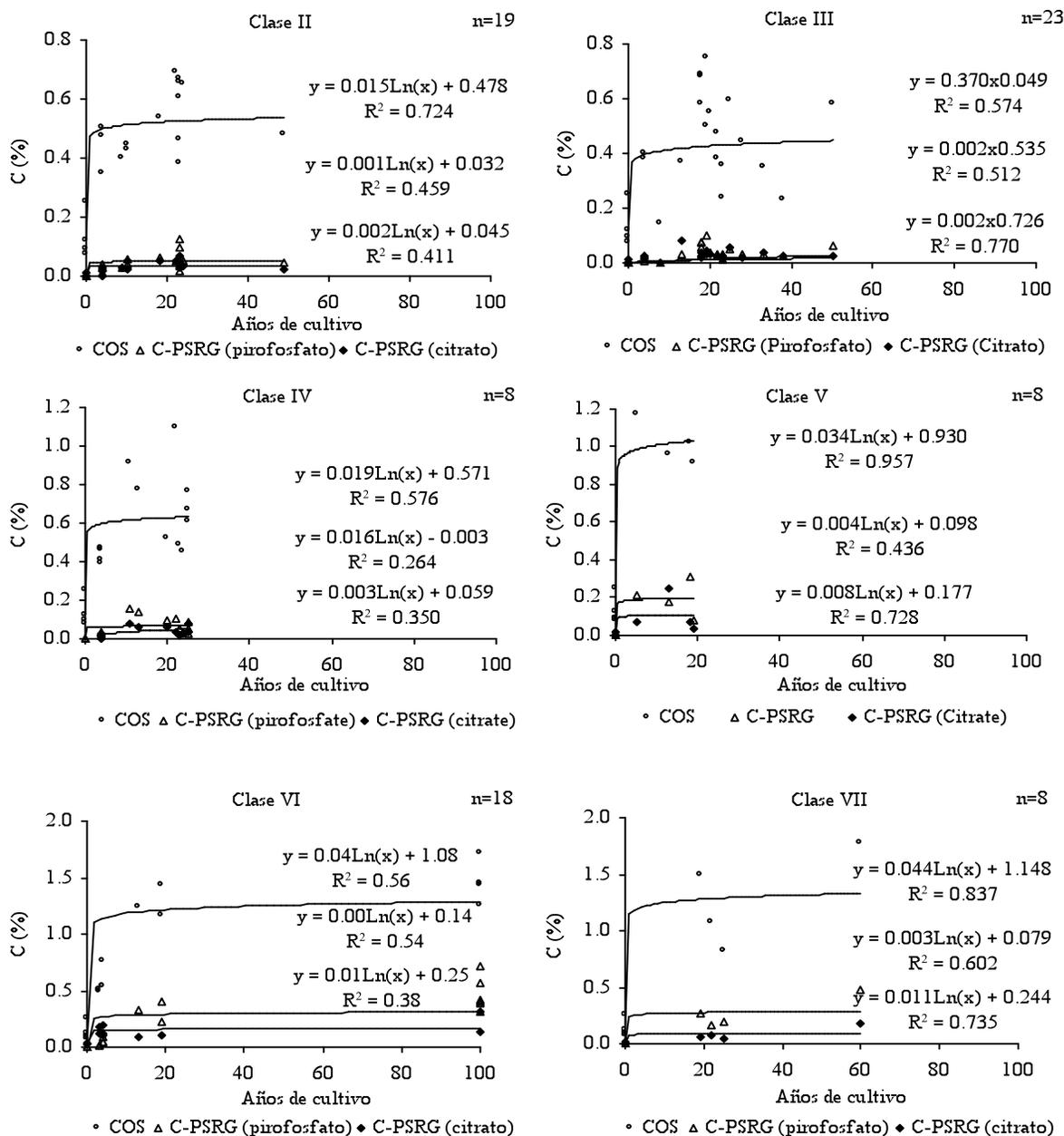


Figura 4.6. Acumulación del COS y C-PSRG según el tipo de manejo y los años de cultivo desde que fueron habilitados para la producción agrícola.

La tasa de acumulación de COS y C-PSRG en las clases III, IV, V y VII correspondió al mismo intervalo de las clases II y VI, explicado anteriormente. La tendencia a la acumulación es

consecuencia del balance entre el C incorporado al sustrato roturado como residuos y el que se pierde en forma de CO₂ por oxidación. La diferencia entre ambos se hace más estrecha con el tiempo y por tanto la acumulación de COS también. En apariencia la capacidad para acumular C en los tepetates sería dependiente de la tasa de formación de nuevos agregados (Báez *et al.*, 2007) y disminución de los sitios de reacción del C en la superficie de los minerales arcillosos (Matus y Maire, 2000; Hassink, 1997). Para que ocurra una tasa de incremento mayor, se requiere que la cantidad de C adicionado sea mayor que las pérdidas por oxidación (Follett, 2001), pero también que haya sitios de reacción disponible para la estabilización del carbono. La acumulación del C de la PSRG, que es recalcitrante, tuvo una tendencia de acumulación en el tiempo semejante a la del COS, sin embargo, fue de 5 a 14 veces menor que este último, según el tipo de manejo y extractante utilizado.

4.4. CONCLUSIONES

El pirofosfato de sodio extrajo hasta tres veces más PSRG que el citrato de sodio. El C-PSRG fue aproximadamente dos veces mayor cuando se usó pirofosfato como extractante en lugar del citrato. Estas diferencias fueron significativas ($P \leq 0.05$). El primero es un reactivo con mayor poder para extraer la glicoproteína y podría disolver también alguna fracción de sustancias húmicas asociadas con la materia orgánica. El COS en los tepetates cultivados se ubicó en el intervalo de trazas hasta 3.9%. La concentración de glomalina obtenida con pirofosfato en los tepetates cultivados varió de trazas a 5.3 mg g⁻¹ y en los suelos de referencia de 3.9 a 5.1 mg g⁻¹. La acumulación de COS en los tepetates cultivados puede ser semejante al de los suelos agrícolas de la misma región. De acuerdo con el máximo valor de COS determinado en los tepetates, éstos pueden almacenar más de 90 Mg ha⁻¹, en los primeros 20 cm de profundidad, con una aportación de 30 % del C por parte de la PSRG extraída con pirofosfato y 15% de C cuando ésta se extrae con citrato. Esta diferencia fue significativa ($P \leq 0.05$). La tasa de acumulación de COS y C-PSRG a medida que incrementan los años de cultivo, muestra una tasa de acumulación generalmente de tipo logarítmico.

AGRADECIMIENTOS

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

4.5. LITERATURA CITADA

- Álvarez-Solís, D., R. Ferrera-Cerrato y C. Zebrowski. 1992. Análisis de la microflora asociada al manejo agroecológico en la recuperación de tepetates. *Terra* 10 (Número especial): 419-424.
- 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., E. Ascencio-Zapata, C. Prat y A. Márquez. 1997. Análisis del comportamiento de cultivos en tepetate t3 incorporado a la agricultura de temporal, Texcoco, México. *In: Zebrowski, C., P. Quantin, y G. Trujillo (eds.). III Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos. ORSTOM. Quito, Ecuador, pp: 296-310.*
- 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, and C. Hidalgo. 2007. Formation of aggregates and carbon sequestration in ameliorated tepetates in the Rio Texcoco basin, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 24:487-497.
- 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. *Environmental Pollution* 116: 445–455.
- Bolliger, A., A. Nalla, J. Magid, A. Neergaard, A.D. Nalla, and T.C. Bøg-Hansen. 2008. Re-examining the glomalin-purity of glomalin-related soil protein fractions through immunochemical, lectin-affinity and soil labelling experiments. *Soil Biology and Biochemistry* 40:887-893.
- Borie, F., R. Rubio, A. Morales y C. Castillo. 2000. Relación entre densidad de hifas de hongos micorrizógenos arbusculares y producción de glomalina con las características físicas y químicas de suelos bajo cero labranza. *Revista Chilena de Historia Natural* 73:749-756.
- 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 and Tillage Research* 88: 253–261.
- Etchevers, J.D., R.M. López, C. Zebrowski, y D. Peña. 1992a. Características químicas del tepetate de referencia de los estados de México y Tlaxcala, México. *Terra* 10 (Número especial): 171-177.
- Etchevers, J.D., R. M. López, C. Zebrowski, y D. Peña. 1992b. Fertilidad de los tepetates de la vertiente occidental de la sierra nevada (México). *Terra* 10 (Número especial): 379-384

- 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.
- Ferrera-Cerrato, R. 1992. Papel de los microorganismos en la recuperación de suelos marginales. *Terra* 10 (Número especial): 408-414.
- Ferrera-Cerrato, R. 1997. Uso de la materia orgánica en la recuperación de tepetates y su influencia en los microorganismos. *In: Zebrowski, C., P. Quantin, y G. Trujillo (eds). III Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. ORSTOM. Quito, Ecuador, pp: 225-237.
- Follett, R.F. 2001. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soil. *Soil and Tillage Research* 61:77-92.
- Franzluebbers, A.J., S.F. Wright, and J.A. Stuedemann. 2000. Soil aggregation and glomalin under pastures in the Southern Piedmont USA. *Soil Science Society of America Journal* 64:1018-1026.
- Gadkar, V., and M. C. Rillig. 2006. The arbuscular mycorrhizal fungal protein glomalin is a putative homolog of heat shock protein 60. *FEMS Microbiology Letter* 263:93–101
- González-Chávez, M.C.A., M.C. Gutiérrez, y S. Wright. 2004. Hongos micorrízico arbusculares en la agregación del suelo y su estabilidad. *Terra* 22: 507-214.
- Hassink, J. 1997. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and Soil* 191:77-87.
- Kurle, J.E., and F.L. Pflieger. 1994. The effects of cultural practices and pesticides on VAM fungi. *In: Pflieger F. L., and R. G. Linderman (eds.). Mycorrhizae and Plant Health*. APS Press. St. Paul, Minnesota, pp: 101-132.
- Lovelock, C., S.F. Wright, D.A. Clark, and R. W. Ruess. 2004. Soil stocks of glomalin produced by arbuscular mycorrhizal fungi across a tropical rain forest landscape. *Journal of Ecology* 92:278- 287.
- Matus, J. F., y C. R. Marie. 2000 Relación entre materia orgánica y textura del suelo y tasa de mineralización de carbono y nitrógeno. *Agricultura Técnica (Chile)* 60:112-126.
- Navarro, H., y D. Flores. 1997. Manejo agronómico diferencial de la asociación maíz-haba en tepetate de quinto año de uso agrícola. *In: Zebrowski, C., P. Quantin, y G. Trujillo (eds). III Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. ORSTOM. Quito, Ecuador, pp: 287-295.

- Navarro, H., A. Pérez, y D. Flores. 2003. Productividad de los tepetates con sistemas rotacionales Terra 22:71-79.
- Nichols, K. 2003. Characterization of glomalin, a glycoprotein produced by arbuscular mycorrhizal fungi. PhD Dissertation, University of Maryland, College Park, Maryland. USA.
- Nichols, K. A., and S. F. Wright. 2005. Comparison of glomalin and humic acid in eight native U.S. soils. Soil Science 170:985-987.
- 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. Applied and Environmental Microbiology 69: 2816-2824.
- Peña, D., M. E. Miranda, C. Zebrowski, y H. Arias. 1992. Resistencia de tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. Terra 10 (Número especial): 164:182.
- Peña, D., y C. Zebrowski. 1992. Los suelos y tepetates de la vertiente occidental de la sierra nevada. Terra 10 (Número especial): 151-155.
- Pimentel-Bribiesca, L., 1992. Como hacer productivos los tepetates en México: Terra, 10 (Número especial):15-23.
- Purin, S., O.F. Klauberg, and S.L. Stürmer. 2006. Mycorrhizae activity and diversity in conventional and organic apple orchards from Brazil. Soil Biology and Biochemistry 38:1831-1839.
- Reicosky, D., and M. Lindstrom. 1993. Effect of fall tillage on short term carbon dioxide flux from soil. Agronomy Journal 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 and 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 and 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 and Soil 253:293-299.
- Rillig, M. C. 2004. Arbuscular mycorrhizae and terrestrial ecosystem processes. Ecology Letters 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 and Tillage Research* 93:273-782.
- Rosier, C.L., A.T. Hoye, and M.C. Rillig. 2006. Glomalin-related soil protein: Assessment of current detection and quantification tools. *Soil Biology and Biochemistry* 38:2205-2211.
- Ryan, M.G., and J.H. Graham. 2002. Is there a rol for arbuscular mycorrhizal fungi in production agriculture? *Plant and Soil* 244:263-271.
- Sánchez-Colín, M.J., P.J. Ramírez y N. Torrescano. 2000. Micorriza arbuscular y *Rhizobium* presentes en leguminosas establecidas en un suelo andosol. *In: Alarcón, A., y R. Ferrera-Cerrato (eds.). Ecología, fisiología de la Micorriza Arbuscular.* Editorial Mundi-Prensa, México, pp: 46-55.
- SAS Institute. 1998. SAS/SAT User's Guide. Version 6.09. SAS Inst., Cary. NC, pp: 100-120.
- Schindler, F.V., E.J. Mercer, and J.A. Rice. 2007. Chemical characteristics of glomalin-related soil protein (GRSP) extracted from soils of varying organic matter content. *Soil Biology and Biochemistry* 39:320–329.
- Six, J., S.D. Frey, R.K. Thiet, and K.M. Batten. 2006. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal* 70:555-569.
- Weller, K. 2002. Glomalin: hiding place for a third the world's stored soil carbon. *Agricultural Research* 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 and Tillage Research* 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.F., and A. Upadhyaya. 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil* 198:97-107.
- Wright, S.F., J.L. Starr, and I. C. Paltineanu. 1999. Changes in aggregates stability and concentration of glomalin during tillage management transition. *Soil Science Society of America Journal* 63:1825-1829.

- Wright, S.F., and L. Jawson. 2001. A pressure cooker method to extract glomalin from soils. *Soil Science Society of America Journal* 65:1734-1735.
- Wright, S.F., K.N. Nichols, and W.F. Schmidt. 2006. Comparison of efficacy of three extractants to solubilize glomalin on hyphae and in soil. *Chemosphere* 64: 1219-1224.
- Zebrowski, C. 1992. Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina. *Terra* 10 (Número especial): 15-23.

CAPITULO V. LOS EFECTOS DE LA INOCULACIÓN CON HMA, TIPO DE CULTIVO Y ABONO SOBRE LA ACUMULACIÓN DEL CARBONO Y PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA EN DOS SUELOS VOLCÁNICOS

RESUMEN

Los tepetates y algunos suelos deteriorados del eje neovolcánico, como los acrisoles, presentan algunas restricciones para la producción de cultivos. La carencia de C, P y N ponen de manifiesto algunas limitaciones en cuanto a su fertilidad física, química y biológica. Los microorganismos del suelo son de relevante importancia, porque intervienen directamente en la transformación de la materia orgánica del suelo. Los hongos micorrízico arbusculares (HMA) son de especial interés porque producen glomalina, una glicoproteína que funciona como cementante orgánico y almacena carbono. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la acumulación de COS y la producción de materia seca (MS) bajo condiciones de invernadero. Se abordaron cuatro factores de estudio con dos distintos niveles: (a) suelo, un tepetate recién roturado y un suelo acrisol; (b) micorriza, inoculación y no inoculación del HMA *Glomus mosseae* BEG-25; (c) tipo de cultivo, una gramínea (*Lolium perenne*) y una leguminosa (*Trifolium repens*); (d) presencia de vermicomposta: adición y no adición de vermicomposta 9:1 (v/v). Se empleó un diseño factorial 2⁴ con arreglo en bloques al azar. La combinación de factores proporcionó 16 tratamientos y se efectuaron cinco repeticiones. Los tratamientos 6, 8 y 14, 16 correspondieron a los testigos que no tuvieron inoculación y adición de vermicomposta. Se efectuaron cuatro muestreos para evaluar la acumulación de COS en los sustratos (0-18 cm de profundidad) a los 0, 130, 270 y 650 días de la siembra y cinco evaluaciones de producción de materia seca (MS) a los 120, 240, 360, 450 y 650 días de la siembra. La acumulación de COS y la producción de MS mostraron diferencias significativas por efecto de tipo de suelo, tipo de cultivo y adición de vermicomposta. La inoculación del HMA no pudo verificarse porque no se efectuó la evaluación de colonización en los tratamientos correspondientes. La acumulación de COS fue significativa ($p < 0.05$) solamente en aquellos tratamientos donde no se incorporó vermicomposta, independientemente del tipo de suelo o sustrato, el tipo de cultivo y de la inoculación. La mayor producción de MS total fue de cerca de 300 g maceta⁻¹ y se obtuvo en el tratamiento 9 (tepetate, pasto, inoculación y vermicomposta). La menor producción de MS (100 g maceta⁻¹) se obtuvo en el tratamiento 16 (tepetate con trébol sin inoculación sin vermicomposta).

Palabras clave: acrisoles, suelos volcánicos endurecidos, tepetates

5.1. INTRODUCCIÓN

La acumulación de C orgánico del suelo (COS) está influenciada por la interacción de factores climáticos, físicos, químicos y biológicos (Lal, 2004). En estos últimos, los microorganismos del suelo son de relevante importancia, porque intervienen directamente en la transformación de la materia orgánica del suelo. Los HMA son de especial interés porque contribuyen a la estabilidad de agregados del suelo (González-Chávez *et al.*, 2004). Estos microorganismos producen glomalina, una glicoproteína que funciona como cementante orgánico (Wright y Upadhyaya, 1996). Al interactuar con la fracción inorgánica del suelo proporciona estabilidad a los agregados del suelo y el C que acumula es recalcitrante (Wright y Upadhyaya 1998; Rillig *et al.*, 2002). La glomalina es abundante en el suelo y está implicada en importantes propiedades físicas y bioquímicas de éste (Ogunseitan, 2006). La glomalina fue identificada por Wright y Upadhyaya (1996). Los autores mencionaron que su molécula es muy estable y contiene entre 30 y 40% de carbono recalcitrante. La glomalina es sensible a los cambios de uso de suelo y puede usarse como un indicador de dichos cambios (Rillig *et al.*, 2002). Todas estas cualidades ponen de manifiesto que el empleo de los HMA en suelos deteriorados podría ser una opción para mejorar su fertilidad. En el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de los HMA en la acumulación de COS de dos sustratos volcánicos deteriorados: un tepetate y un suelo acrisol. Los tepetates son capas de materiales de origen volcánico endurecidas por procesos geológicos o pedológicos, (Etchevers *et al.*, 2006). Estos materiales son abundantes en el eje neovolcánico de México, donde se estima que cubren más de 37 000 km² de superficie (Zebrowski, 1992). El afloramiento de tepetates ocurre después de erosionarse el suelo que los cubría. En su condición natural, éstos no son aptos para sostener vegetación. Sin embargo, si se roturan y se hace un manejo agronómico adecuado pueden habilitarse para la producción agrícola y forestal (Báez *et al.*, 1997; Navarro *et al.*, 2003). Los tepetates carecen de materia orgánica (MO) y COS (Etchevers *et al.*, 1992), indispensables para los procesos biológicos del suelo y la producción de humus. Después de roturar los tepetates, el sustrato artificial está constituido por fragmentos de tepetate de diversos tamaños y carece de agregados (Báez *et al.*, 2007). La dinámica del C orgánico en los tepetates cultivados ha sido abordada por Báez *et al.* (2002). Se sabe que su concentración depende del manejo agronómico y el tiempo de cultivo y que su acumulación no es lineal. Sin embargo, el COS no se ha relacionado con la actividad microbiana, en especial con los HMA, con lo cual, podría estar estrechamente ligada.

Los acrisoles cubren cerca de 10 000 km² en el país (INEGI, 2004). Estos suelos son ácidos y contienen alta proporción de arcilla, óxidos de hierro y baja saturación en bases. El término Acrisol proviene del latín "*acris*" que significa muy ácido. Esta característica química ocasiona restricciones para la nutrición de los cultivos por la baja disponibilidad P y algunos micronutrientes. Estos suelos son poco productivos, salvo para especies tolerantes a la acidez. En la cuenca de Cointzio, Michoacán, los acrisoles cubren 223 km², que representan el 33% de su superficie (Medina-Orozco, 2006). Este autor mencionó que en esta región los agricultores practican un sistema tradicional de agricultura que denominan "año y vez", que consiste en cultivar las parcelas durante un año y usarlas como agostadero durante dos o tres años.

El empleo de HMA para aumentar la producción de diversos cultivos en tepetate ha sido documentada por Matías-Crisóstomo (1993), Campos-Mota *et al.* (2004), García-Cruz *et al.* (2007). El propósito de presente estudio fue evaluar la actividad de los HMA en la acumulación de COS en estos suelos deteriorados. Se sabe que el establecimiento de estos microorganismos es limitado cuando los suelos presentan alta disponibilidad de fósforo, adición de fertilizantes fosfatados y por prácticas de fumigación (Ryan y Graham, 2002). Tanto el tepetate que se emplea en el presente estudio, como el suelo acrisol, presentan deficiencias de fósforo (2 y 15 ppm respectivamente), por cual son aptos para el establecimiento de las micorrizas.

5.2. MATERIALES Y MÉTODOS

5.2.1. Sitios de estudio

El tepetate que se utilizó en el presente experimento fue colectado en la comunidad de Tequexquahuac, localizada a 10 km al oriente de Texcoco, Estado de México. Ésta pertenece a la cuenca del río Texcoco que fue descrita en el capítulo anterior. El suelo acrisol se colectó en la microcuenca de Cointzio en Atécuaro, Michoacán. Se localiza 15 km al sur de la ciudad de Morelia (Figura 5.1). La cuenca se ubica entre los 19° 33' 5" y 19° 37' 8" de LN y 101° 9' y 101° 15' de LO". La base geológica sobre la que se encuentra está constituida por rocas ígneas, tobas volcánicas y brechas. Son abundantes las rocas riodacíticas de color gris a rojizo, muy duras, con alto contenido de cuarzo. Se estima que cubren 63% de la cuenca. Otros materiales volcánicos como derrames de lava, brechas y conglomerados se caracterizan por presentar baja dureza, ser

altamente permeables y fácilmente erosionables. Estos materiales volcánicos se encuentran principalmente en los lomeríos y dan origen a suelos color rojizo. Se estima que ocupan 21% del área. También se han identificado tobas púmicas de color blanco a beige. Se ha estimado que cubren 5% del área. Los tipos de suelos que se encuentran en la cuenca, principalmente son: andosoles, acrisoles, luvisoles y litosoles. En menor orden de importancia se encuentran cambisoles y regosoles. La vegetación que se encuentra en la zona sur de la microcuenca son bosques de pino, pino-encino y encino. Las especies dominantes de pino son: *Pinus leiophylla* S. C., *P. pseudoestrobis* L., *P. michoacana* M., *P. lawsoni* R., y *P. teocote* S. C. Las especies dominantes de encino son *Quercus crassifolia* H. y B. y *Q. obtusa* H y B.

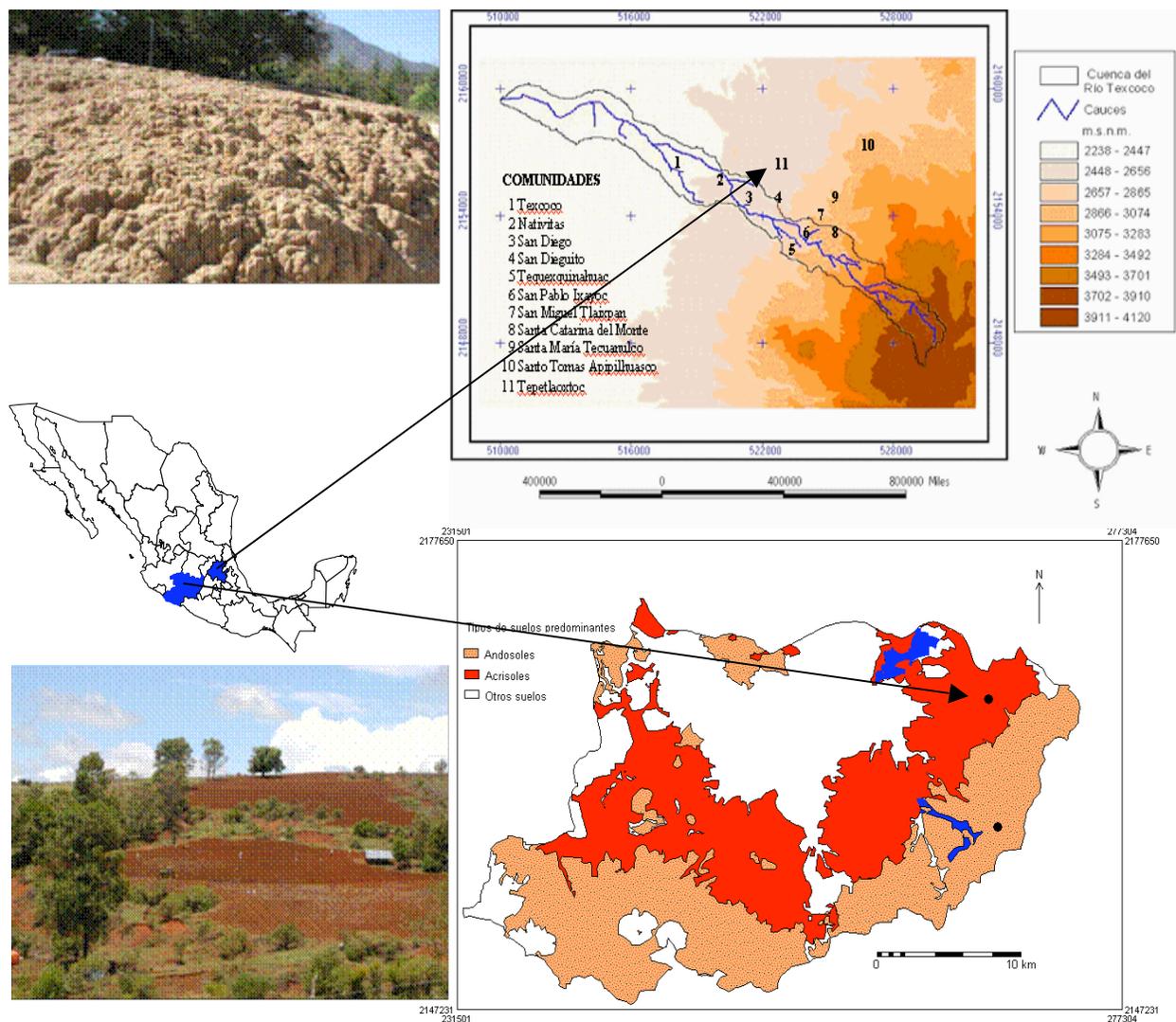


Figura 5.1. Sitios de estudio (a) Cuenca del río, Texcoco y (b) Cuenca de Cointzio, Michoacán.

En la parte norte se encuentra vegetación arbustiva, áreas dedicadas al pastoreo y al uso agrícola. De acuerdo a la clasificación de Köppen modificada por García (1984), el clima de la región corresponde a templado subhúmedo con lluvias en verano Cb(w2)(w)(i')g. La temperatura media anual es de 13.8 °C. La precipitación media anual es de 1002 mm, de la cual más del 90% se distribuye de mayo a agosto.

5.2.2. Recolección de los suelos

El tepetate que se empleó en la presente investigación correspondió al descrito por Quantin *et al.* (1993) como: t3 sin carbonato de calcio. Se recogió con pala en una parcela que había sido roturada con fines agrícolas. El tepetate se colectó, antes de que ésta fuera cultivada por vez primera. Se reunió una muestra compuesta por 20 submuestras tomadas al zar de 0 a 20 cm de profundidad de la roturación. La parcela había sido conformada en una terraza de aproximadamente 4000 m² y presentaba una pendiente suave, de menos de 10%. El suelo acrisol se colectó de una parcela experimental que fue abierta al cultivo en Atécuaro, Michoacán. El procedimiento fue semejante a lo explicado anteriormente. La parcela también fue conformada en una terraza de aproximadamente 1000 m², con pendiente suave de menos de 10%.

5.2.3. El experimento

El experimento se estableció en condiciones de invernadero. Se probó el efecto de cuatro factores de estudio con dos distintos niveles: (1) un tepetate recientemente roturado y un suelo acrisol; (2) la inoculación y no inoculación del HMA *Glomus mosseae* BEG-25; (3) dos especies de cultivo: *Lolium perenne* y *Trifolium repens* (gramínea-leguminosa); (4) la incorporación y no incorporación de vermicomposta (9:1 v/v). Se efectuó una caracterización físico-química de la vermicomposta, del tepetate y del suelo acrisol. Se evaluó el pH en agua 1:2, la conductividad eléctrica, la textura por el método Boyoucos, materia orgánica, COS, N-Kj, P-Olsen y K. Los sustratos fueron previamente tamizados en malla de 4.76 mm, con el propósito de favorecer la infiltración del agua y la aireación. Quantin *et al.*, (1993) señalaron que el tamaño ideal de fragmentos de tepetate comprendidos entre 3 y 4 mm son los más adecuados para mantener una porosidad total óptima. Una parte de los sustratos se mezclaron con vermicomposta en proporción de 9:1 (v/v). Se emplearon macetas con capacidad de cinco kg de suelo y la inoculación se efectuó al momento de llenarlas. Se colocaron 18 g del inoculo por maceta *Glomus mosseae* BEG-25 en una delgada capa (Figura 5.2c), la cual, se cubrió con cinco cm del

sustrato correspondiente. El HMA fue previamente cultivado en cebolla (*Allium cepa* L.) y sorgo (*Sorgum bicolor* (L) Moench, y se usó arena como sustrato (Figura 5.2a). El inoculo se evaluó en el laboratorio y se estimó que contenía más de 350 esporas por gramo de sustrato (Figura 5.2b). Posteriormente se colocó un gramo de semilla de *Trifolium repens* y dos gramos de semilla de *Lolium perenne* según los tratamientos correspondientes. Después de dos meses de establecer el experimento se adiciono semanalmente 1 g por maceta de NH_4NO_3 , hasta finalizar el experimento, para sufragar las deficiencias de nitrógeno, principalmente para el cultivo de pasto.



Figura 5.2. (a) Inoculo del HMA *Glomus mosseae* BEG-25. (b) Conteo de esporas. (c) Inoculación.

5.2.4. Los tratamientos

La combinación de los distintos factores de estudio proporcionó 16 tratamientos diferentes, se efectuaron 5 repeticiones por tratamiento y se establecieron un total de 80 unidades experimentales (cuadro 5.1.). Los tratamientos 6, 8, 14 y 16 correspondieron a los testigos propuestos para tipo de suelo y tipo de cultivo. En éstos no se inoculó ni se adicionó vermicomposta.

5.2.5. Evaluaciones de C orgánico

El experimento se condujo durante 18 meses. Se efectuó una evaluación de COS al inicio del experimento y tres más a los 130, 270 y 650 días del establecimiento del experimento. Para este propósito se colectaron 3 submuestras de suelo por maceta (15 a 18 g cada una). Las muestras se secaron a la sombra y a temperatura ambiente y posteriormente se tamizaron en malla de 2 mm. Se extrajo una submuestra homogénea y se molió para malla de 0.5 mm. Se midió el COS directamente en un TOC-5050A Shimatzu.

Cuadro 5.1. Combinación de tratamientos del experimento factorial 2⁴.

Tratamiento	Factores de estudio			
	Suelo	Inoculación	Cultivo	Abono
1	Acrisol	<i>Glomus mosseae</i> BEG-25	<i>Lolium perenne</i>	Vermicomposta
2	"	"	"	Sin vermicomposta
3	"	"	<i>Trifolium repens</i>	Vermicomposta
4	"	"	"	Sin vermicomposta
5	"	No inoculado	<i>Lolium perenne</i>	Vermicomposta
6	"	"	"	Sin vermicomposta
7	"	"	<i>Trifolium repens</i>	Vermicomposta
8	"	"	"	Sin vermicomposta
9	Tepetate	<i>Glomus mosseae</i> BEG-25	<i>Lolium perenne</i>	Vermicomposta
10	"	"	"	Sin vermicomposta
11	"	"	<i>Trifolium repens</i>	Vermicomposta
12	"	"	"	Sin vermicomposta
13	"	No inoculado	<i>Lolium perenne</i>	Vermicomposta
14	"	"	"	Sin vermicomposta
15	"	"	<i>Trifolium repens</i>	Vermicomposta
16	"	"	"	Sin vermicomposta

5.2.6. Evaluaciones de materia seca

Se efectuaron cinco cortes para evaluar la producción de materia seca (MS) a los 120, 240, 360, 450 y 650 días de la siembra. Cada corte se hizo aproximadamente a cuatro centímetros de la base de las plantas. El material vegetal se secó en una estufa a 70 °C durante 72 horas.

5.2.7. Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental factorial 2⁴ con un arreglo en bloques al azar. El modelo estadístico se presenta a continuación:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_1 + \alpha_j + \tau_k + \alpha\tau_{jk} + e_{ijk}$$

Donde: Y_{ijk} es la ijk -ésima observación en el i -ésimo bloque que contiene el j -ésimo nivel del factor A y el k -ésimo nivel del factor B; μ es la media general; β_1 es el efecto i -ésimo bloque; α_j es el efecto j -ésimo nivel del factor A y τ_k es el k -ésimo nivel del factor B; $\alpha\tau_{jk}$ es el la interacción del j -ésimo nivel del factor A con el k -ésimo nivel del factor B; y e_{ijk} es el error aleatorio normal e independiente $(0, \sigma^2)$.

Para la comparación de medias se utilizó la prueba de Tukey con un nivel de significancia al 0.05. El análisis estadístico se efectuó mediante el programa Statistical Analysis System.

5.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.3.1. Características físico-químicas de los sustratos volcánicos

Los resultados de los análisis físico-químicos de los sustratos volcánicos empleados en el presente experimento se muestran en el Cuadro 5.2. El tepetate tuvo una clase textural franco arcillosa, un pH ligeramente alcalino y bajos contenidos de materia orgánica (MO), carbono, nitrógeno y P-Olsen. El suelo acrisol tuvo un pH ácido y su conductividad eléctrica mostró una baja saturación de bases. El contenido de MO, carbono y nitrógeno fueron regulares (pero muy parecido a la media de los suelos agrícolas de México). La disponibilidad de potasio y P-Olsen fueron bajas. Cabe resaltar su alto porcentaje de arcilla y su color rojizo, esto último indica una abundante cantidad de óxidos de hierro.

Cuadro 5.2. Características físico-químicas de los sustratos volcánicos.

Sustrato	pH	CE	Arena	Limo	Arcilla	P-Olsen	K	CIC	MO	C	N(kj)
	agua 1:2	dS m ⁻¹	-----%-----			ppm	Cmoles kg ⁻¹	-----%-----			
Tepetate	7.34	0.19	40	25	35	2	1.2	16.5	0.3	0.19	0.02
Acrisol	5.00	0.06	16	17	67	15	0.2	20.0	2.0	1.26	0.10
Vermicomposta	8.80	-	-	-	-	600	-	-	-	-	-

5.3.2. Acumulación de carbono

Los resultados de las cuatro evaluaciones de COS se presentan en el Cuadro 5.3. En la primera de éstas (cero días) solamente se aprecian diferencias por efecto de la incorporación de vermicomposta en los tratamientos 1, 3, 5, 7, correspondientes al acrisol y 9, 11, 13 y 15 correspondientes al tepetate. El COS aumentó 30% y 84% respectivamente, comparado con los tratamientos donde no se incorporó este abono. En la segunda evaluación (130 días) no hubo diferencias significativas ($p \geq 0.05$) respecto a la evaluación anterior. En la tercera y cuarta evaluación efectuadas a los 270 y 650 días de la siembra, la acumulación de COS fue altamente significativa ($p \geq 0.05$) solamente en aquellos tratamientos donde no se incorporó vermicomposta (2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 y 16) independientemente del tipo de suelo, el tipo de cultivo y de la inoculación. Hassink (1997) y Matus y Maire (2000) señalaron que la acumulación de COS varia

respecto al grado de saturación de las partículas del suelo, que la protección físico-química que los agregados del suelo pueden proporcionar es finita y que ésta se relaciona directamente con el contenido partículas finas (limo y arcilla). Esto fue explicado en el Capítulo cinco. Lo que se intenta destacar en este apartado es que los sustratos de los tratamientos donde no se incorporó materia orgánica, disponían de sitios donde el COS pudo acumularse. Lal (2004) mencionó que para que este proceso ocurra, la tasa de acopio de este elemento debe ser mayor que la tasa de emisión de CO₂. Mayor concentración de COS implica necesariamente mayor emisión de C al ambiente y viceversa (Báez, 2006). En el presente estudio no se incorporaron residuos orgánicos durante el desarrollo del experimento, por lo cual, en los sustratos donde se adicionó vermicomposta al inicio no pudo acumularse mas carbono.

Cuadro 5.3. Evaluaciones de C orgánico en cuatro muestreos en los tratamientos evaluados.

Tratamiento	Factores de estudio				Días a la siembra				Acumulación
	Suelo	Inoculo	Cultivo	Abono	0	130	270	650	
					----- C (%) -----				
1	Acrisol	I	G	V	1.79±0.03	1.69±0.05	1.76±0.02	1.86±0.03	0.07ns
2	"	I	G	SV	1.26±0.01	1.39±0.09	1.56±0.05	1.72±0.06	0.46**
3	"	I	L	V	1.79±0.03	1.64±0.06	1.73±0.06	1.75±0.04	-0.04 ns
4	"	I	L	SV	1.26±0.01	1.22±0.07	1.38±0.03	1.47±0.08	0.20**
5	"	NI	G	V	1.79±0.03	1.73±0.05	1.86±0.07	1.84±0.04	0.05 ns
6	"	NI	G	SV	1.26±0.01	1.36±0.06	1.47±0.08	1.58±0.09	0.32**
7	"	NI	L	V	1.79±0.03	1.69±0.02	1.78±0.04	1.82±0.04	0.03 ns
8	"	NI	L	SV	1.26±0.01	1.36±0.12	1.45±0.08	1.52±0.011	0.26**
9	Tepetate	I	G	V	1.19±0.03	0.97±0.04	1.08±0.04	1.05±0.04	-0.02 ns
10	"	I	G	SV	0.19±0.01	0.26±0.02	0.33±0.03	0.47±0.08	0.27**
11	"	I	L	V	1.07±0.03	0.90±0.04	0.97±0.04	0.98±0.03	-0.09 ns
12	"	I	L	SV	0.19±0.01	0.22±0.01	0.29±0.02	0.37±0.04	0.17**
13	"	NI	G	V	1.07±0.03	1.09±0.06	1.10±0.09	1.17±0.04	0.10 ns
14	"	NI	G	SV	0.19±0.01	0.19±0.04	0.27±0.01	0.35±0.07	0.16**
15	"	NI	L	V	1.07±0.03	0.98±0.04	1.03±0.04	1.04±0.05	-0.03 ns
16	"	NI	L	SV	0.19±0.01	0.16±0.02	0.22±0.02	0.30±0.01	0.11**

I: inoculado, ns: no significativo, SI: no inoculado, G: gramínea, L: leguminosa, V: con vermicomposta, SV: sin vermicomposta, **: diferencia altamente significativa ($p \geq 0.05$).

El análisis estadístico global mostró diferencias significativas ($p \geq 0.05$) en la acumulación de COS por efecto del sustrato, el tipo de cultivo y la adición de vermicomposta. El suelo acrisol acumuló en promedio 2.4 veces más COS que el tepetate, el cultivo de pasto acumuló 5.2% más COS que el trébol y la vermicomposta produjo casi el doble de COS respecto a los tratamientos donde no se adicionó este abono. No hubo diferencias significativas en la acumulación de COS ($p \geq 0.05$) por efecto de la inoculación del HMA *Glomus mosseae* BEG-25. Cabe aclarar que no se

verificó el porcentaje de colonización, por lo cual queda la incertidumbre en cuanto al efecto de la inoculación. En las interacciones de segundo orden hubo diferencias significativas ($p \geq 0.05$) en vermicomposta \times inoculación, cultivo \times inoculación, sustrato \times vermicomposta. No hubo efecto en suelo \times inoculación, sustrato \times cultivo y sustrato \times composta. En las interacciones con inoculación las diferencias son mínimas. En un experimento semejante, García-Cruz *et al.* (2007) evaluaron en tepetate el efecto de los HMA como un mejorador biológico del sustrato, sus resultados no mostraron efecto de las micorrizas en la acumulación de carbono después de 12 meses de evaluaciones.

5.3.3. Producción de materia seca

Los resultados de la producción de materia seca (MS) se presentan en el Cuadro 5.4. El análisis estadístico global mostró diferencias significativas ($p \geq 0.05$) en la acumulación de COS por efecto de la inoculación, el tipo de sustrato, el tipo de cultivo y la adición de vermicomposta. En los tratamientos donde se inoculó el HMA *Glomus mosseae* BEG-25, la producción de MS fue 8% mayor que donde no se inoculó. El suelo acrisol produjo 11% más MS que el tepetate; el cultivo de pasto produjo 45% más MS que el trébol y la incorporación de vermicomposta produjo 35% más MS que en aquellos tratamientos donde no se incorporó este abono.

Cuadro 5.4. Producción de materia seca de cinco cortes en los tratamientos evaluados.

Trat.	Factores de estudio				Cortes (días de la siembra)					
	Suelo	Inóculo	Cultivo	Abono	120	240	360	450	650	total
					materia seca (g maceta ⁻¹)					
1	Acrisol	I	G	V	54.1±1.7	49.2±4.2	48.9±4.4	47.4±5.7	65.1±3.4	264.6
2	"	I	G	SV	47.3±2.2	41.7±5.6	40.9±4.5	44.5±3.7	60.7±6.1	235.2
3	"	I	L	V	32.1±3.2	41.2±6.4	33.1±4.2	25.4±4.0	50.5±9.3	182.3
4	"	I	L	SV	21.5±2.7	33.5±3.8	25.9±5.6	17.0±3.7	41.3±9.6	139.3
5	"	NI	G	V	53.7±3.6	37.5±4.2	46.8±3.8	47.0±5.7	60.4±5.5	245.5
6	"	NI	G	SV	38.3±4.6	31.6±4.5	36.0±6.3	40.0±7.0	56.6±5.6	202.5
7	"	NI	L	V	31.2±4.4	37.9±5.4	36.6±6.3	32.0±11.4	48.9±10.4	186.7
8	"	NI	L	SV	23.0±2.7	26.8±7.4	21.3±6.8	16.5±3.0	43.0±10.1	130.7
9	Tepetate	I	G	V	51.0±11.4	45.6±7.7	58.6±3.4	58.6±7.3	71.9±12.2	285.5
10	"	I	G	SV	47.5±2.5	39.7±2.2	38.3±1.4	24.2±5.9	32.4±23.8	182.0
11	"	I	L	V	19.5±4.2	37.3±5.3	38.0±9.4	27.2±3.7	42.3±3.36	164.3
12	"	I	L	SV	18.0±3.0	35.9±4.6	30.2±4.9	11.3±3.0	15.1±2.46	110.4
13	"	NI	G	V	59.9±2.7	45.6±7.2	62.9±5.1	61.3±8.2	80.7±5.48	310.4
14	"	NI	G	SV	28.2±0.9	21.1±3.3	23.8±2.3	24.1±4.0	15.0±0.1	112.1
15	"	NI	L	V	27.9±6.8	41.7±3.1	35.5±9.9	22.6±4.6	51.7±14.0	179.3
16	"	NI	L	SV	13.5±2.3	22.1±2.5	17.4±2.7	9.0±2.4	11.1±2.18	73.0

I: inoculado, NI: no inoculado, G: gramínea, L: leguminosa, V: con vermicomposta, SV: sin vermicomposta.

En las interacciones de segundo orden hubo diferencias significativas ($p \geq 0.05$) en vermicomposta \times inoculación, cultivo \times inoculación, suelo \times vermicomposta y cultivo \times vermicomposta. No hubo efecto en sustrato \times inoculación, suelo \times cultivo y suelo \times composta.

La mayor producción de MS total se observó en el sustrato tepetate en los tratamientos 9 y 13, donde se cultivó pasto y se adicionó vermicomposta (Figura 5.3). El efecto del abono ($p \geq 0.05$) fue evidente en esta variable.

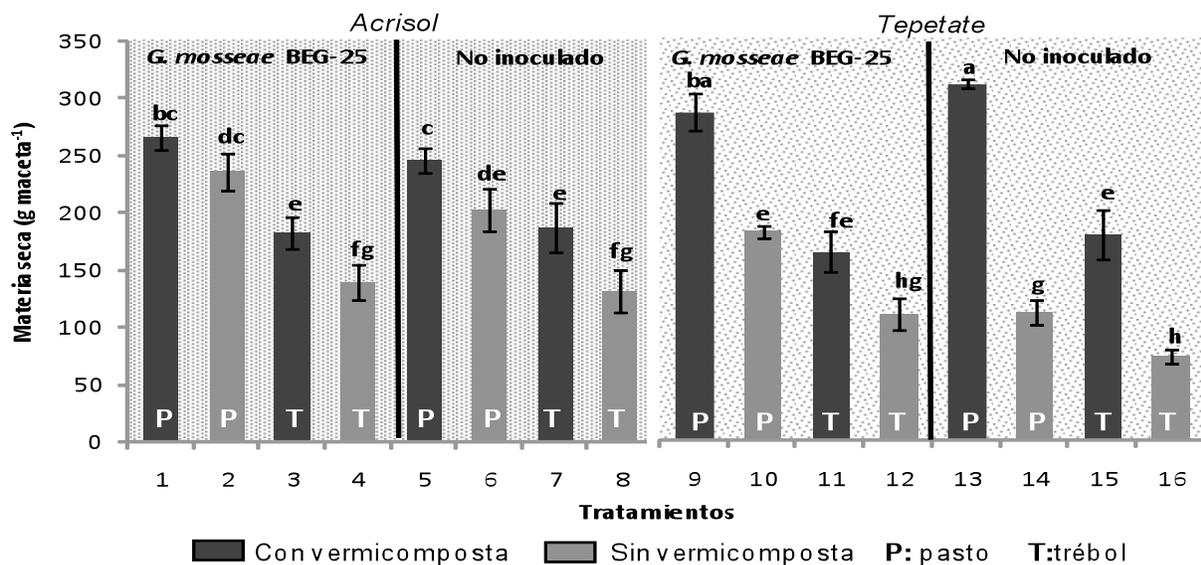


Figura 5.3. Producción de materia seca total del experimento factorial 2⁴. Letras semejantes son estadísticamente iguales ($p \leq 0.05$).

5.4. CONCLUSIONES

La acumulación de COS en el tepetate cultivado y en el acrisol mostraron respuesta en los tratamientos 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 y 16 que fueron aquéllos donde no se incorporó vermicomposta, independientemente del tipo de suelo, el tipo de cultivo y de la inoculación. De manera global los factores de estudio: tipo sustrato, tipo de cultivo y la adición de vermicomposta presentaron diferencias significativas en la evaluación de estos parámetros. El HMA *Glomus mosseae* BEG-25 no mostró efecto significativo en esta variables. No se efectuó la estimación del porcentaje de colonización en las raíces de las plantas, por lo cual queda cierta incertidumbre en cuanto al efecto del inoculo.

La producción de materia seca mostró efecto significativo por el tipo de suelo, adición de vermicomposta y tipo de cultivo. La mayor producción de MS total fue de alrededor de 300 g

maceta⁻¹ y se obtuvo en el tratamiento 9 (tepetate, pasto, inoculación y vermicomposta). La menor producción de MS (100 g maceta⁻¹) se obtuvo en el tratamiento 16 (tepetate con trébol sin inoculación sin vermicomposta).

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT y la Unión Europea (REVOLSO Proyecto ICA4-CT-2001-0052) por el financiamiento otorgado para la realización de esta investigación.

5.5. LITERATURA CITADA

- Báez, A., E. Asencio-Zapata, C. Prat y A. Márquez. 1997. Análisis del comportamiento de cultivos en tepetate t3 incorporado a la agricultura de temporal, Texcoco, México. *In: III Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. Zebrowski, C., Quantin, P y Trujillo, G. (eds.). ORSTOM. Quito, Ecuador, pp: 296-310.
- Báez, A., J. 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, M. Haulon, G. Flores y C. Hidalgo. 2006. Pérdida de C por erosión hídrica y emisión de CO2 en tepetates (suelos volcánicos endurecidos) habilitados para la agricultura en Tlaxcala, México. *In: Summaries of the IV International Symposium on Deteriorated Volcanic Soils*, Universidad Michoacana, Morelia, Michoacán, pp: 12.
- Campos-Mota, L., G.A. Baca-Castillo, D. Jaén-Contreras, A. Muratalla-Lúa y R. Acosta-Hernández. 2004. Fertirriego en micorriza en frambuesa roja cultivada en tepetate. *Agrociencia* 38:75-83.
- Etchevers, J. D., R. M. López, C. Zebrowsky y D. Peña. 1992. Fertilidad de los tepetates de la vertiente occidental de la sierra nevada (México). *Terra* 10 (Número especial): 379-384
- Etchevers, J. D., C. Hidalgo, C. Prat y P. Quantin. 2006. Tepetates of Mexico. *In: Encyclopedia of soil science*. Lal, R. (Ed.). Marcel Dekker, Nueva York, pp: 1745-1748.
- García, E. 1984. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen. Universidad Nacional Autónoma de México. México, pp: 16-21.
- García-Cruz, A., D. Flores-Román, N. E. García-Calderón, R. Ferrera-Cerrato y A. S. Velázquez-Rodríguez. 2007. Habilitación de un tepetate por efecto de mejoradores biológicos. *Agrociencia* 14:723-731.

- González-Chávez, M.C.A., M.C. Gutiérrez y S. Wright. 2004. Hongos micorrízico arbusculares en la agregación del suelo y su estabilidad. *Terra* 22: 507-214.
- Cruz, C., C. Balbontin, F. Paz, J. Etchevers y P. Krasilnikov. 2007. Variabilidad morfogénica de los suelos en México y su relación con el modelo fisiográfico nacional
- INEGI. 2004. Conjunto de Datos Vectoriales de la Carta Fisiográfica, Escala 1:1000,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI. 2007. Conjunto de datos vectoriales de la carta edafológica, Escala 1:250,000, Serie II. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304:1624-1627.
- Matías-Crisóstomo, J.S. y R. Ferrera-Cerrato. 1993. Efecto de microorganismos y adición de materia orgánica en la colonización micorrízica en la recuperación de tepetates. *In: Avances de investigación*. Pérez-Moreno, J. y R. Ferrera-Cerrato (eds.). Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, pp: 53- 61.
- Medina-Orozco, L. E. 2006. Perdidas de suelo, agua y nutrimentos en parcelas experimentales con sistemas agrícolas de año y vez y alternativos en un acrisol de Michoacán. Tesis de Maestría de Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México.
- Navarro, G. H., A. Pérez O. y D. Flores. 2003. Productividad de los tepetates con sistemas rotacionales. *Terra* 22:71-79.
- Ogunseitan, O. A. 2006. Soil proteomics: extraction and analysis of proteins from soil. *In: Nucleic acids and proteins in soil*. Nannipieri, K, ans K. Smalla (Eds.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Germany, pp: 105-108
- Peña, D. y C. Zebrowski, 1992. Los suelos y tepetates de la vertiente occidental de la sierra nevada. *Terra* 10 (Número especial): 151-155.
- Quantin, P., H. Arias, J. D. Etchevers, R. Ferrera, K. Olechko, H. Navarro, G. Wernern y C. Zebrowski. 1993. Tepetates de México: Caracterización y habilitación para la agricultura: *Terra* 11:33-34.

- 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 and Soil* 238:325-333.
- Ryan, M.G., and J.H. Graham. 2002. Is there a rol for arbuscular mycorrhizal fungi in production agriculture?. *Plant and Soil* 244:263-271.
- Wright, S.F., J.L., and Upadhyaya. 1996. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Science* 198:97-107.
- Wright, S.F., and A. Upadhyaya. 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil* 198:97-107.
- Zebrowski, C. 1992. Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina. *Terra* 10 (Número especial): 15-23.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

De los suelos volcánicos deteriorados evaluados en el presente estudio, los tepetates presentaron un mejoramiento sustancial de sus características físico químicas por efecto de la acumulación de COS.

En el primer experimento se concluye que la formación y estabilidad de agregados estuvo en función de la acumulación de COS. Sin embargo, esta última estuvo fuertemente influenciada por el manejo agronómico y tiempo de cultivo. Es recomendable para el estudio de la estructura física de los tepetates cultivados diferenciar entre agregados y fragmentos. El COS se acumuló de una a tres veces más en los primeros que en los segundos. La prueba de estabilidad de agregados fue afectada por la presencia de fragmentos de tepetate que tuvieron una dureza de una a tres veces mayor que los agregados. Lo anterior sobreestima la presencia de agregados estables, dado que la prueba no discriminó entre agregados y fragmentos. Las prácticas de labranza ocasionan un continuo rompimiento de los agregados y limitan la acumulación de carbono.

La pérdida de C por efecto de la emisión de CO₂ en los tepetates cultivados en el segundo experimento, estuvo en función de la humedad volumétrica, la cual fue determinada por la época de lluvias y por la cantidad de materia orgánica potencialmente mineralizable. En la época seca, la emisión de este gas fluctuó de trazas, en el tepetate expuesto, hasta 0.5 g m⁻² hr⁻¹ en los ecosistemas naturales Pn y Mn. En la época de lluvias, las emisiones de CO₂ fluctuaron de trazas a 2.5 g m⁻² hr⁻¹, respectivamente. Es recomendable implementar prácticas agrícolas que disminuyan la oxidación de la materia orgánica del suelo, buscando que la tasa de acumulación de COS sea mayor que la tasa de mineralización. La reducción de la labranza puede ofrecer una alternativa.

La pérdida de COS por efecto de la erosión hídrica en los tepetates cultivados estuvo en función de intensidad de las lluvias, las cuales determinaron la carga de sedimentos arrastrados, al volumen de escurrimiento y a la carga de sedimentos en suspensión. Estas diferencias fueron más evidentes en RO y RT respecto de Or, TM y Tr, es decir, en los tepetates más recientemente roturados que contaban con dos años de cultivo, comparado con las parcelas que tenían más de 16 años de cultivo.

La pérdida de COS asociada a la erosión hídrica durante 2004 fue alrededor de 86 kg ha⁻¹ año⁻¹ en los primeros y de 38 a 65 kg ha⁻¹ año⁻¹ en los segundos y durante 2005 de 68 a 75 kg ha⁻¹ año⁻¹ en los primeros y de 17 a 22 kg ha⁻¹ año⁻¹ en los segundos.

El COS se perdió aproximadamente en igual proporción entre la carga de sedimentos arrastrados y los que se encuentran en suspensión (40%) y 20% disuelto en el agua. Mayor contenido de C en los tepetates cultivados implicó también mayor pérdida de C por efecto de la erosión hídrica y mineralización. Es recomendable la implementación de obras de conservación de suelo y el empleo de cultivos de amplia cobertura vegetal que reduzcan la erosión hídrica al mínimo. TM (tradicional mejorado) fue el tratamiento que presentó el menor índice de erosión y pérdida de carbono.

La acumulación de COS en los suelos evaluados no sólo estuvo en función de la proporción de arcilla presente en los mismos, también por la naturaleza misma los minerales arcillosos y la cantidad de limo.

De manera general la fracción <2 µm aumentó de forma logarítmica a la aplicación de energía, mientras que las fracciones entre 50-250 µm y 2-50 µm disminuyeron de manera inversa. Durante el proceso de transferencia de arcilla desde las fracciones más gruesas también se transfirió carbono. En el tepetate este elemento se adsorbió mayormente en la fracción arcillosa, en el acrisol en la fracción limosa y en el andosol esta fue semejante en ambas.

La fracción arenosa del tepetate y el andosol no retuvieron C después de aplicar 445 J mL⁻¹ y en el acrisol después de aplicar 1365 J mL⁻¹. El tepetate con manejo orgánico acumuló 20% más C que el manejo tradicional. En el caso del andosol y acrisol no hubo diferencias al respecto.

La concentración de COS, PSRG y C-PSRG en los tepetates cultivados evaluados en el cuarto experimento, estuvo en función del tipo de manejo agronómico. Fue mayor en aquéllas que acumularon mayor cantidad de C como: manejo en invernadero (VIII y X), labranza cero (XII) y regular incorporación de abonos orgánicos (VI). Sin embargo, las PSRG y el C-PSRG variaron

según el extractante empleado. El pirofosfato de sodio extrajo de dos a tres veces más PSRG y C-PRGS que el citrato de sodio. Estos resultados sugieren que las fracciones que se extrajeron con estas soluciones no son exactamente las mismas, por lo tanto la composición carbonácea podría ser diferente. La mayor cantidad extraída con pirofosfato podría corresponder a las sustancias húmicas. De acuerdo a los máximos niveles de C encontrados en los tepetates cultivados, estos últimos pueden secuestrar hasta 30 t ha^{-1} de carbono recalcitrante.

En el quinto y último experimento la hipótesis no pudo ser comprobada porque no se efectuó la estimación del porcentaje de colonización en las raíces de las plantas, por lo cual queda cierta incertidumbre en cuanto al efecto del inoculo *Glomus mosseae* BEG-25. La acumulación de COS en el tepetate cultivado y en el acrisol mostraron diferencias significativas ($p > 0.05$) sólo en aquéllos los tratamientos donde no se incorporó vermicomposta, independientemente del tipo de suelo, el tipo de cultivo y la inoculación.

La producción de materia seca mostró efecto significativo ($p < 0.05$) por el tipo de suelo, adición de vermicomposta y tipo de cultivo. La producción más alta de MS total fue de alrededor de $300 \text{ g maceta}^{-1}$ en el tratamiento 9 (tepetate, pasto, inoculación y vermicomposta). La menor producción de MS ($100 \text{ g maceta}^{-1}$) se obtuvo en el tratamiento 16 (tepetate con trébol sin inoculación sin vermicomposta). No hubo relación entre producción de materia seca y acumulación de carbono.

RESUMEN GENERAL

El impacto que las actividades humanas han ejercido sobre los recursos naturales del eje neovolcánico transversal de México (ENT) ha ocasionado un severo deterioro del suelo, principalmente por efecto de la erosión hídrica. En muchas ocasiones es evidente la pérdida del horizonte A y en los casos más graves la exposición del subsuelo en extensas áreas, dando lugar a materiales volcánicos endurecidos. Entre los más abundantes se encuentran los tepetates, los cuales, son capas de toba volcánica con diverso grado de endurecimiento. Esta característica física limita la infiltración de agua y la penetración de raíces de las plantas. Debido a lo anterior, los tepetates son improductivos y estériles, y su afloramiento indica un grave problema ambiental y deterioro del entorno ecológico. Sin embargo, es posible cultivarlos después de roturarlos mecánicamente. El sustrato resultante no es un suelo, porque no contiene agregados, está constituido por fragmentos de tepetate y es casi inerte, porque la actividad biológica es limitada por carecer de C orgánico (COS), P y N. Sin embargo, con el tiempo de cultivo y la constante adición de residuos orgánicos es posible convertir este material en suelo, después de producirse los agregados, unidades donde se almacena COS. Los acrisoles de la cuenca de Cointzio, Michoacán, son suelos volcánicos que presentan frecuentemente la pérdida del horizonte A. El horizonte B tiene restricciones físicas y químicas para el desarrollo de cultivos, debido a la cantidad de arcilla (más de 60%) y al pH ácido. La implementación de prácticas agronómicas como: encalado, adición de materia orgánica y uso de leguminosas pueden contribuir a mejorar dichas limitaciones. En la misma cuenca, la deforestación y el cambio de uso de suelo ocasionan una drástica modificación en las propiedades físico-químicas de los andosoles, suelos ubicados en la parte superior de la cuenca. Al desecarse, su estructura física se deteriora, porque ocurre una retracción irreversible de los agregados. En estas condiciones su capacidad de retención de humedad puede reducirse hasta en 60 % de la inicial y el suelo se convierte en una masa polvorienta e hidrófoba, con la pérdida de sus mejores características físicas. La presente investigación tuvo como tema central estudiar el COS en los tepetates habilitados para la producción agrícola y en los suelos volcánicos deteriorados arriba mencionados, para generar conocimiento que permita entender los mecanismos de acumulación de este elemento y su interacción con los agentes físicos, químicos y biológicos que influyen en la fertilidad de los suelos. La dinámica del COS está regida por diversos factores que interaccionan intrínsecamente entre sí. El clima, el relieve, la vegetación, el material parental, las propiedades químicas, físicas

y microbiológicas, el grado de perturbación del suelo o el manejo agronómico del mismo, influyen en el grado de acumulación y emisión de este elemento. Con base en lo anterior se efectuaron cinco experimentos donde se abordaron temas específicos sobre física, química, microbiología y fertilidad de suelos. El primero (E1) tuvo como objetivo evaluar la formación y estabilidad de agregados en tepetates cultivados de la cuenca del río Texcoco. Se planteó la siguiente hipótesis: la formación y estabilidad de agregados es función de la acumulación de COS. Se efectuó un análisis de información proveniente de estudios preliminares en tepetates cultivados de la cuenca del río Texcoco, para evaluar la formación de agregados en tepetates recién roturados y cultivados durante 1 y 100 años; para ello se determinó su distribución y estabilidad de agregados en seco y en húmedo y se midió el contenido de COS en agregados y fragmentos en función de su tamaño. En un segundo experimento (E2) tuvo como objetivo evaluar las pérdidas de COS por efecto de la mineralización y erosión hídrica en tepetates sometidos a distintas condiciones de manejo agronómico. Se planteó la hipótesis que la mayor pérdida de COS ocurriría en los tratamientos con manejo tradicional. Se evaluaron durante dos años (2004 y 2005) en parcelas experimentales de tepetate cultivado (de 230 a 1450 m²), la pérdida de COS provocadas por erosión hídrica y la mineralización. Los tratamientos comprendieron tres tipos de manejo agronómico: tradicional (Tr), como lo practica el agricultor; tradicional mejorado (TM), con una dosis suplementaria de N y P; y orgánico (Or), con incorporación de composta. Los ensayos se efectuaron en parcelas habilitadas con dos y 18 años de cultivo respectivamente. Solamente una parcela por tratamiento se equipó con tanques para medir los escurrimientos. Se evaluó en laboratorio el C asociado a muestras sedimentos y agua de escurrimiento, que se colectaron después de cada evento de lluvia. También se monitoreó la emisión de CO₂ en 15 puntos tomados al azar en las parcelas de experimentales mediante un sensor de emisión de CO₂ EGM4 PP-system. Estas mediciones se efectuaron una vez por mes durante la época seca (noviembre a abril) y de 2 a 4 veces durante la época húmeda (mayo a octubre). Para esta evaluación se consideraron tres tratamientos adicionales como referencia: un lecho de tepetate desnudo (TE), un pastizal natural (Pn) y un matorral natural (Mn) que se encontraban aledaños al sitio de estudio. Simultáneamente se efectuaron mediciones de humedad volumétrica (HV) de 0 a 15 cm de profundidad mediante un TDR que fue previamente calibrado. El tercer experimento (E3) se realizó en laboratorio y tuvo como propósito evaluar la acumulación de COS a nivel de partículas primarias en tres suelos volcánicos deteriorados. Se

planteó la siguiente hipótesis: la acumulación de COS en los suelos evaluados es función de la proporción de arcilla contenida en los mismos. Se evaluaron: un tepetate cultivado, un acrisol (horizonte B) y un andosol deteriorado, cada uno con manejo tradicional y orgánico respectivamente. Se evaluaron un total de seis tratamientos con tres repeticiones. Se separaron con un tamiz de 250 μm muestras de 50 g de suelo que fueron previamente saturadas con 180 ml de agua y agitadas durante 18 horas a 65 opm. Se separó la materia orgánica ligera, la fracción $>250 \mu\text{m}$ y la fracción $<250 \mu\text{m}$. Después de secar las fracciones a 60°C , en la $<250 \mu\text{m}$ se empleó energía ultrasónica (0, 228, 455, 910, 1365 J ml^{-1}) y se separaron en columnas de vidrio, mediante la ley de Stokes, la arena fina (50-250 μm), el limo (2-50 μm) y la arcilla ($<2 \mu\text{m}$). El cuarto experimento (E4) tuvo como objetivo evaluar el contenido de COS, las proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (PSRG) y la proporción de C que ésta aporta al COS (C-PSRG) en tepetates cultivados con diferente manejo agronómico y tiempo de cultivo. La glomalina es una glicoproteína producida por la actividad natural de los hongos micorrizico arbusculares (HMA). Numerosas investigaciones mencionan que esta sustancia influye positivamente en la estabilidad de agregados del suelo. Se planteó la siguiente hipótesis: la concentración de COS, PSRG y C-PSRG en tepetates cultivados son función de la frecuente incorporación de abonos orgánicos y del tiempo de cultivo. Se colectaron muestras de tepetate (0-20 cm de profundidad) en 84 parcelas de tepetate con diverso tiempo de cultivo y manejo agronómico y se agruparon 10 clases arbitrarias, que comprendieron desde el tepetate recién roturado hasta aquéllos cultivados bajo condiciones de invernadero. Dos clases más correspondieron a suelos de referencia de la región. Para el análisis estadístico se empleó un diseño completamente al azar con distinto número de repeticiones. La comparación de medias se examinó con varianzas ponderadas por tamaño de muestra. El quinto y último experimento (E5) se llevó a cabo en invernadero. Tuvo como objetivo evaluar la influencia de los HMA en la acumulación de COS en dos suelos volcánicos. Se planteó la siguiente hipótesis: la acumulación de COS es función de HMA *Glomus mosseae* BEG-25 y la adición de vermicomposta. Se establecieron un total de 16 tratamientos con cinco repeticiones. Se evaluó la acumulación de COS abordando simultáneamente cuatro factores de estudio con dos distintos niveles: (a) un tepetate recién roturado y un suelo acrisol (horizonte B), (b) inoculación y no inoculación del HMA *Glomus mosseae* BEG-25, (c) una gramínea (*Lolium perenne*) y una leguminosa (*Trifolium repens*), y (d) adición y no adición de vermicomposta. Los tratamientos 6, 8 y 14, 16 correspondieron a los testigos que no tuvieron inoculación y adición de

vermicomposta. Se efectuaron cuatro muestreos para evaluar la acumulación de COS en los sustratos (0-18 cm de profundidad) a los 0, 130, 270 y 650 días de la siembra y cinco evaluaciones de producción de materia seca (MS) a los 120, 240, 360, 450 y 650 días de la siembra. Se empleó un diseño factorial 2^4 con arreglo en bloques al azar. Los resultados del E1 mostraron que la prueba de estabilidad de agregados sobreestimó la presencia de agregados estables, dado que no discriminó entre agregados y fragmentos; la dureza de estos últimos fue una a tres veces superior a la de los agregados. La cantidad relativa de agregados estables se incrementó con el tiempo bajo cultivo y alcanzó 80% después de 100 años. Los tepetates recién roturados mostraron bajos contenidos de COS, mientras que los agregados estables tenían concentraciones entre 1 y 3 veces mayores. En el E2, la erosión de 2004 fue 30 a 50% mayor en los tratamientos con 2 años de cultivo respecto a los tratamientos con 16 años de cultivo y en 2005 esta diferencia fue de más del doble. La pérdida de COS por efecto de la erosión hídrica dependió del volumen del escurrimiento y la masa de sedimentos erosionados. Ésta fluctuó de 38 a 87 kg ha⁻¹ año⁻¹ en 2004 y de 17 a 75 kg ha⁻¹ año⁻¹ en 2005. La emisión de CO₂ se relacionó positivamente con la HV y ésta fue mayor en los tratamientos donde se incorporó composta. El C disuelto en el agua de escurrimiento fue de 10 a 15 kg ha⁻¹ año⁻¹, el C contenido en la masa de sedimentos y en los sedimentos en suspensión fluctuó cada uno de 40 a 50 kg ha⁻¹ año⁻¹. En el E3 el efecto de la energía aplicada para separar las fracciones de arena limo y arcilla dependió de la proporción de partículas elementales de cada suelo. El C en el tepetate se adsorbió mayormente en la arcilla, en el acrisol en el limo y en el andosol lo hizo por igual en el limo y en la arcilla. En el E4 la PRGS y el C-PRGS mostraron una estrecha relación con el COS. El pirofosfato extrajo de dos a tres veces más PRGS y C que el citrato. La mayor acumulación de COS en los tepetates cultivados (0-20 cm de profundidad) se estimó en cerca de 90 Mg ha⁻¹, del cual, 30% lo aportó la PRGS cuando se extrajo con pirofosfato y 15% cuando se extrajo con citrato. En el E5 la acumulación de COS y la producción de MS mostraron diferencias significativas por efecto de tipo de suelo o sustrato, tipo de cultivo y adición de vermicomposta. La inoculación del HMA no mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos, sin embargo, no se comprobó si las raíces estuvieron o no colonizadas por *Glomus mosseae* BEG25 al final del experimento. La acumulación de COS fue significativa ($p < 0.05$) solamente en aquellos tratamientos donde no se incorporó vermicomposta, independientemente del tipo de suelo o sustrato, el tipo de cultivo y de la inoculación. La mayor producción de MS total fue de cerca de 300 g maceta⁻¹ y se obtuvo en el

tratamiento 9 (tepetate, pasto, inoculación y vermicomposta). La menor producción de MS ($100 \text{ g maceta}^{-1}$) se obtuvo en el tratamiento 16 (tepetate con trébol sin inoculación sin vermicomposta).

APÉNDICES

Apéndice 1. Erosión hídrica y pérdida de C durante 2004 y 2005 en parcelas experimentales de tepetate cultivado en Tlalpan, Tlaxcala.

fecha de evento	Trat.	Sedimento		lluvia	Volumen escurrimiento	Kr	C			total
		masa	suspensión				suspensión	masa	agua	
		-----kg ha ⁻¹ -----					-----kg ha ⁻¹ -----			
19/05/04	TM	497	178	26.3	6.2	0.24	1.6	2.9	0.7	5.2
30/05/04	TM	21	18	6.9	0.6	0.09	0.2	0.1	0.1	0.3
02/06/04	TM	36	30	15.6	1.3	0.08	0.2	0.3	0.1	0.7
02/08/04	TM	45	53	27.0	1.6	0.06	0.2	0.2	0.2	0.6
03/08/04	TM	21	20	13.9	0.6	0.04	0.1	0.1	0.0	0.2
08/08/04	TM	262	129	22.6	3.8	0.17	0.4	2.3	0.3	3.0
21/08/04	TM	13	16	25.2	0.5	0.02	0.1	0.1	0.1	0.2
04/09/04	TM	13	15	11.6	0.4	0.04	0.2	0.1	0.0	0.3
17/09/04	TM	896	441	66.0	25.4	0.38	4.2	8.8	1.9	14.9
18/09/04	TM	137	108	20.8	4.7	0.23	0.7	0.9	0.3	1.9
20/09/04	TM	42	43	12.1	1.5	0.13	0.3	0.2	0.2	0.7
22/09/04	TM	102	73	14.8	2.7	0.18	0.6	0.9	0.3	1.7
26/09/04	TM	80	170	16.4	2.7	0.16	1.4	0.6	0.3	2.3
09/10/04	TM	42	498	28.4	3.0	0.11	3.6	0.4	0.5	4.4
15/10/04	TM	76	195	27.2	2.7	0.10	1.5	0.5	0.2	2.2
19/05/04	Or	693	223	26.3	7.50	0.29	1.95	2.48	1.00	5.4
30/05/04	Or	104	35	6.9	1.23	0.18	0.26	0.78	0.11	1.2
02/06/04	Or	96	53	15.6	2.19	0.14	0.50	0.79	0.19	1.5
03/06/04	Or	16	11	4.5	0.30	0.07	0.10	0.14	0.03	0.3
02/08/04	Or	167	89	27.0	2.90	0.11	0.29	1.11	0.25	1.7
03/08/04	Or	95	52	13.9	1.48	0.11	0.15	0.85	0.11	1.1
08/08/04	Or	401	152	22.6	4.61	0.20	0.55	3.72	0.44	4.7
21/08/04	Or	24	35	25.2	1.42	0.06	0.34	0.18	0.15	0.7
04/09/04	Or	141	51	11.6	2.20	0.19	0.35	0.95	0.16	1.5
17/09/04	Or	1089	524	66.0	25.19	0.38	3.69	7.18	1.89	12.8
18/09/04	Or	368	206	20.8	7.25	0.35	1.33	2.74	0.45	4.5
20/09/04	Or	141	77	12.1	2.53	0.21	0.50	0.82	0.20	1.5
22/09/04	Or	215	145	14.8	3.98	0.27	1.07	1.55	0.40	3.0
26/09/04	Or	212	290	16.4	4.84	0.30	1.84	1.68	0.60	4.1
08/10/04	Or	21	48	17.2	1.00	0.06	0.53	0.23	0.11	0.9
09/10/04	Or	70	858	28.4	5.57	0.20	8.43	0.81	0.86	10.1
15/10/04	Or	388	708	27.2	7.96	0.29	5.74	2.79	0.71	9.2
19/05/04	Tr	896	319	26.3	9.36	0.36	2.50	3.99	1.23	7.7
30/05/04	Tr	113	43	6.9	1.34	0.19	0.33	1.03	0.13	1.5
02/06/04	Tr	110	89	15.6	2.18	0.14	0.82	0.85	0.17	1.8
02/08/04	Tr	240	136	27.0	3.88	0.14	0.30	1.15	0.38	1.8
03/08/04	Tr	106	51	13.9	1.55	0.11	0.13	0.78	0.12	1.0
08/08/04	Tr	590	202	22.6	6.32	0.28	0.63	4.27	0.65	5.5
21/08/04	Tr	76	105	25.2	1.83	0.07	0.75	0.48	0.17	1.4
04/09/04	Tr	166	60	11.6	2.51	0.22	0.40	0.97	0.18	1.5
17/09/04	Tr	1609	753	66.0	32.14	0.49	4.87	11.82	1.79	18.5
18/09/04	Tr	421	289	20.8	9.80	0.47	1.91	3.08	0.64	5.6

Apéndice 1. Continuación ...

fecha de evento	Trat.	Sedimento		lluvia	Volumen escurrimiento	Kr	C			total
		masa	suspensión				sedimento		agua	
		-----kg ha ⁻¹ -----					-----mm-----		-----kg ha ⁻¹ -----	
20/09/04	Tr	161	99	12.1	3.13	0.26	0.60	1.08	0.22	1.9
22/09/04	Tr	263	189	14.8	4.79	0.32	1.19	1.91	0.49	3.6
26/09/04	Tr	258	323	16.4	5.56	0.34	2.24	1.83	0.58	4.7
08/10/04	Tr	11	28	17.2	0.63	0.04	0.44	0.17	0.08	0.7
09/10/04	Tr	67	399	28.4	3.92	0.14	2.93	0.63	0.40	4.0
15/10/04	Tr	505	905	27.2	9.63	0.35	6.71	2.44	0.91	10.1
19/05/04	RO	2110	533	26.3	17.29	0.66	2.66	2.46	2.14	7.3
30/05/04	RO	341	71	6.9	2.93	0.42	0.37	0.74	0.29	1.4
02/06/04	RO	451	243	15.6	6.30	0.40	0.39	2.17	0.49	3.1
03/06/04	RO	81	58	4.5	1.17	0.26	0.22	0.31	0.15	0.7
02/08/04	RO	756	306	27.0	9.59	0.36	0.44	0.76	0.97	2.2
03/08/04	RO	442	196	13.9	5.94	0.43	0.12	1.00	0.44	1.6
08/08/04	RO	1265	496	22.6	16.11	0.71	0.49	2.76	1.62	4.9
21/08/04	RO	583	341	25.2	10.00	0.40	1.45	2.12	1.10	4.7
27/08/04	RO	63	63	13.2	3.34	0.25	0.31	0.31	0.14	0.8
30/08/04	RO	22	14	5.7	0.50	0.09	0.06	0.09	0.04	0.2
04/09/04	RO	651	257	11.6	5.14	0.44	0.98	0.88	0.35	2.2
13/09/04	RO	130	138	10.4	2.77	0.27	0.53	0.49	0.19	1.2
17/09/04	RO	3480	1466	66.0	43.40	0.66	5.35	9.18	2.38	16.9
18/09/04	RO	1084	914	20.8	15.63	0.75	2.85	2.47	0.89	6.2
20/09/04	RO	753	569	12.1	9.44	0.78	1.66	2.97	0.67	5.3
22/09/04	RO	1067	633	14.8	11.31	0.76	3.01	2.54	0.99	6.5
23/09/04	RO	62	39	7.6	2.24	0.29	0.24	0.38	0.22	0.8
26/09/04	RO	955	820	16.4	14.14	0.86	2.92	2.63	1.44	7.0
27/09/04	RO	33	31	4.4	1.09	0.25	0.19	0.12	0.16	0.5
08/10/04	RO	101	166	17.2	3.45	0.20	0.81	0.49	0.27	1.6
09/10/04	RO	228	413	28.4	4.11	0.14	1.17	1.26	0.41	2.8
15/10/04	RO	1526	1436	27.2	20.83	0.77	4.13	3.59	1.44	9.2
19/05/04	RT	1239	306	26.3	10.31	0.39	2.09	3.75	1.56	7.4
30/05/04	RT	317	70	6.9	2.56	0.37	0.49	1.07	0.26	1.8
02/06/04	RT	193	93	15.6	2.56	0.16	0.51	0.98	0.31	1.8
03/06/04	RT	56	45	4.5	0.92	0.20	0.19	0.23	0.11	0.5
02/08/04	RT	405	149	27.0	4.37	0.16	0.29	0.68	0.47	1.4
03/08/04	RT	218	82	13.9	2.58	0.19	0.15	0.75	0.23	1.1
08/08/04	RT	669	305	22.6	10.27	0.45	0.79	1.66	1.05	3.5
21/08/04	RT	189	90	25.2	2.55	0.10	0.52	0.65	0.31	1.5
27/08/04	RT	17	19	13.2	0.70	0.05	0.11	0.10	0.05	0.3
04/09/04	RT	290	96	11.6	2.55	0.22	0.50	0.84	0.23	1.6
13/09/04	RT	29	29	10.4	0.76	0.07	0.15	0.15	0.07	0.4
17/09/04	RT	4137	2043	66.0	45.75	0.69	9.49	22.04	3.01	34.5
18/09/04	RT	790	730	20.8	17.29	0.83	3.62	1.55	0.98	6.1
20/09/04	RT	262	241	12.1	4.99	0.41	1.15	1.31	0.43	2.9
22/09/04	RT	322	502	14.8	6.92	0.47	1.71	0.96	0.74	3.4
23/09/04	RT	11	21	7.6	1.81	0.24	0.13	0.07	0.21	0.4
26/09/04	RT	376	504	16.4	8.13	0.50	2.58	1.37	0.83	4.8

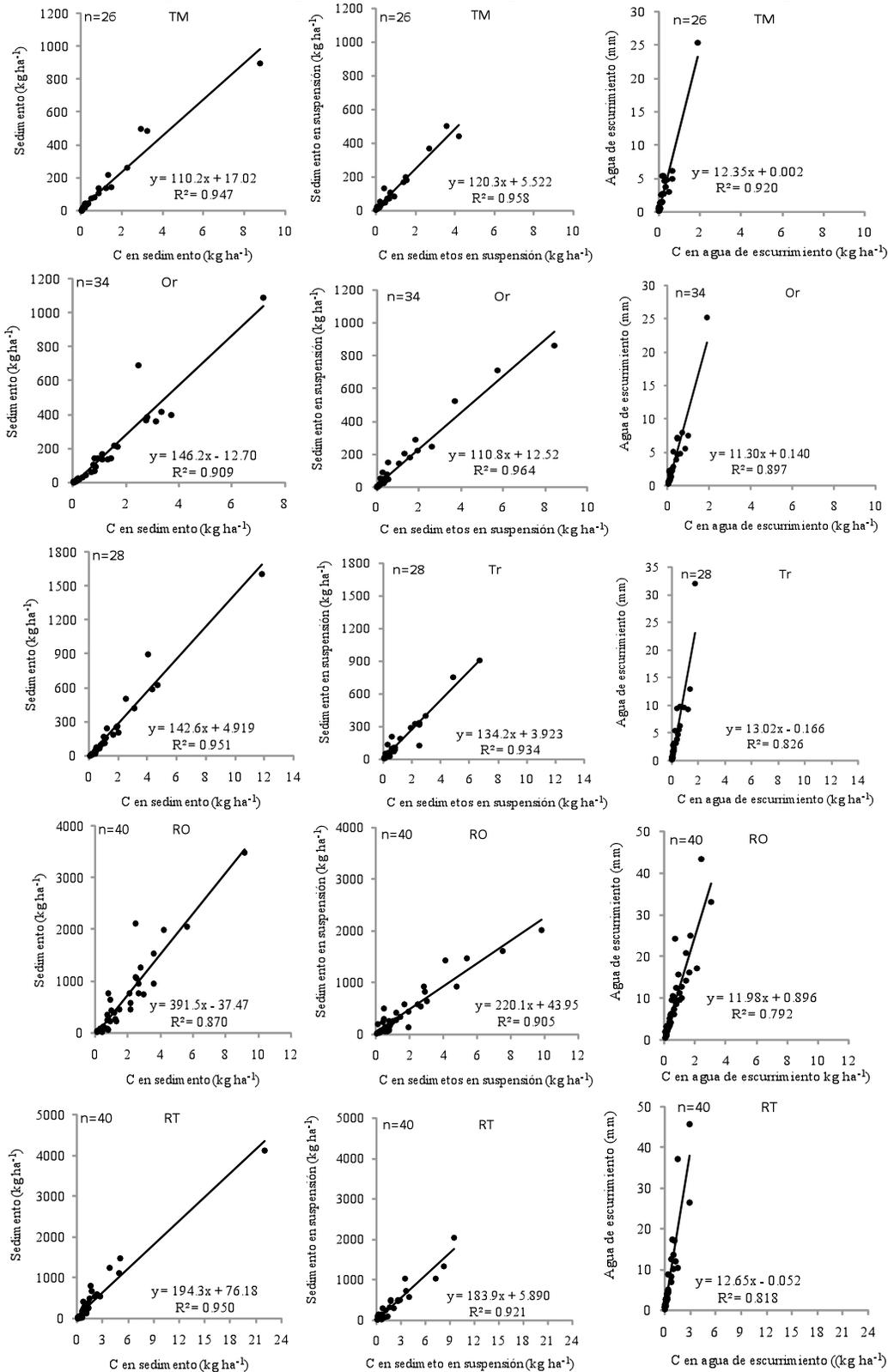
Apéndice 1. Continuación ...

fecha de evento	Trat.	Sedimento		lluvia	Volumen escurrimiento	Kr	C			total
		masa	suspensión				sedimento		agua	
		-----kg ha ⁻¹ -----					-----mm-----			
27/09/04	RT	6	8	4.4	0.26	0.06	0.06	0.03	0.04	0.1
08/10/04	RT	62	113	17.2	2.58	0.15	0.79	0.43	0.23	1.4
09/10/04	RT	139	479	28.4	4.72	0.17	1.74	0.86	0.48	3.1
15/10/04	RT	499	1035	27.2	13.52	0.50	3.47	1.43	1.04	5.9
26/07/05	TM	216	98	32.3	2.6	0.08	0.7	1.3	0.2	2.2
28/07/05	TM	488	367	17.5	4.8	0.27	2.7	3.2	0.4	6.3
07/08/05	TM	18	19	31.9	0.7	0.02	0.2	0.1	0.0	0.3
11/08/05	TM	136	71	17.6	5.5	0.31	0.6	1.2	0.2	2.1
13/08/05	TM	20	23	6.35	0.6	0.09	0.2	0.2	0.0	0.4
23/08/05	TM	40	48	25.5	1.4	0.05	0.5	0.4	0.1	0.9
31/08/05	TM	139	74	43.6	5.5	0.13	0.7	1.5	0.2	2.4
15/09/05	TM	18	8	17	0.5	0.03	0.0	0.1	0.0	0.2
06/10/05	TM	2	1	14.2	0.2	0.01	0.0	0.0	0.0	0.1
07/10/05	TM	2	2	9.2	0.2	0.02	0.0	0.0	0.0	0.1
11/10/05	TM	1	81	41	5.0	0.12	0.9	0.0	0.7	1.6
26/07/05	Or	364	246	32.3	2.2	0.07	2.6	3.1	0.1	5.8
28/07/05	Or	417	178	17.5	2.2	0.13	1.6	3.4	0.2	5.2
07/08/05	Or	136	36	31.9	2.2	0.07	0.4	1.3	0.1	1.8
11/08/05	Or	143	37	17.6	5.1	0.29	0.3	1.4	0.3	2.1
13/08/05	Or	43	47	6.35	1.6	0.25	0.5	0.5	0.1	1.1
14/08/05	Or	14	15	6.17	0.4	0.06	0.2	0.2	0.0	0.3
20/08/05	Or	2	3	11	0.3	0.03	0.0	0.0	0.0	0.1
22/08/05	Or	2	2	3.4	0.5	0.14	0.0	0.0	0.0	0.1
23/08/05	Or	61	26	25.5	2.2	0.09	0.3	0.7	0.1	1.0
31/08/05	Or	133	55	43.6	7.0	0.16	0.4	1.1	0.4	2.0
01/09/05	Or	15	15	6	0.7	0.12	0.1	0.1	0.0	0.3
08/09/05	Or	5	6	13.2	0.5	0.04	0.1	0.1	0.0	0.2
09/09/05	Or	7	7	10.2	0.6	0.06	0.1	0.1	0.1	0.2
15/09/05	Or	30	39	17	2.2	0.13	0.2	0.3	0.1	0.7
06/10/05	Or	3	3	14.2	0.5	0.04	0.0	0.0	0.0	0.1
07/10/05	Or	4	4	9.2	0.9	0.10	0.1	0.1	0.1	0.3
11/10/05	Or	17	26	41	2.2	0.05	0.3	0.2	0.2	0.7
26/07/05	Tr	50	13	32.3	0.7	0.02	0.1	0.4	0.1	0.5
28/07/05	Tr	628	332	17.5	3.3	0.19	2.5	4.7	0.3	7.5
07/08/05	Tr	9	9	31.9	0.3	0.01	0.1	0.1	0.0	0.2
11/08/05	Tr	191	52	17.6	5.5	0.31	0.4	1.6	0.3	2.3
13/08/05	Tr	44	52	6.35	1.1	0.17	0.5	0.4	0.1	0.9
23/08/05	Tr	92	34	25.5	2.9	0.11	0.3	0.8	0.1	1.2
31/08/05	Tr	203	107	43.6	9.5	0.22	0.9	1.9	0.4	3.2
01/09/05	Tr	16	16	6	0.5	0.08	0.2	0.2	0.0	0.3
09/09/05	Tr	10	11	10.2	0.5	0.05	0.1	0.1	0.0	0.3
15/09/05	Tr	46	72	17	1.9	0.11	0.7	0.5	0.1	1.3
06/10/05	Tr	1	4	14.2	0.2	0.01	0.1	0.0	0.0	0.1
11/10/05	Tr	23	120	41	13.0	0.32	2.5	0.4	1.4	4.2
26/07/05	RO	2055	2020	32.3	25.1	0.78	9.8	5.6	1.7	17.2

Apéndice 1. Continuación ...

fecha de evento	Trat.	Sedimento		lluvia	Volumen escurrimiento	Kr	C			total
		masa	suspensión				sedimento		agua	
		-----kg ha ⁻¹ -----					-----mm-----		-----kg ha ⁻¹ -----	
28/07/05	RO	1988	1612	17.5	12.7	0.73	7.5	4.2	1.2	12.9
07/08/05	RO	771	573	31.9	12.6	0.40	2.5	2.1	0.8	5.3
11/08/05	RO	452	231	17.6	10.5	0.60	0.9	1.5	0.5	3.0
13/08/05	RO	267	176	6.35	3.4	0.53	0.8	1.2	0.2	2.2
14/08/05	RO	77	68	6.17	1.5	0.24	0.3	0.3	0.1	0.7
20/08/05	RO	33	28	11	2.0	0.18	0.1	0.1	0.1	0.4
23/08/05	RO	392	279	25.5	9.7	0.38	1.2	1.2	0.5	2.8
31/08/05	RO	758	431	43.6	24.2	0.56	1.9	2.6	0.7	5.2
01/09/05	RO	239	254	6	3.5	0.58	0.7	0.7	0.2	1.6
08/09/05	RO	44	46	13.2	2.7	0.20	0.3	0.3	0.2	0.7
09/09/05	RO	107	113	10.2	4.6	0.45	0.6	0.5	0.3	1.4
15/09/05	RO	234	49	17	6.2	0.37	0.5	0.9	0.4	1.9
04/10/05	RO	28	45	18.2	3.5	0.19	0.6	0.4	0.3	1.4
05/10/05	RO	66	128	22	8.5	0.39	1.9	0.8	0.8	3.4
06/10/05	RO	82	94	14.2	6.2	0.44	0.7	0.6	0.6	2.0
07/10/05	RO	78	79	9.2	7.3	0.80	0.7	0.7	0.6	2.1
11/10/05	RO	950	921	41	33.2	0.81	4.8	3.6	3.1	11.4
26/07/05	RT	1105	1020	32.3	17.0	0.53	7.2	4.9	1.2	13.3
28/07/05	RT	1474	1342	17.5	11.9	0.68	8.2	5.0	1.3	14.5
07/08/05	RT	594	507	31.9	12.7	0.40	2.8	2.3	0.8	6.0
11/08/05	RT	294	323	17.6	8.8	0.50	1.6	1.1	0.4	3.2
13/08/05	RT	173	128	6.35	2.5	0.40	0.8	1.1	0.2	2.0
14/08/05	RT	38	39	6.17	0.8	0.12	0.2	0.2	0.1	0.5
20/08/05	RT	20	22	11	1.4	0.13	0.1	0.1	0.1	0.3
22/08/05	RT	21	17	3.4	2.6	0.76	0.1	0.1	0.1	0.3
23/08/05	RT	175	70	25.5	2.6	0.10	0.4	0.6	0.2	1.1
31/08/05	RT	555	461	43.6	37.1	0.85	2.7	2.0	1.6	6.2
01/09/05	RT	127	139	6	4.1	0.68	0.6	1.1	0.2	2.0
08/09/05	RT	40	40	13.2	2.2	0.17	0.3	0.3	0.2	0.7
09/09/05	RT	54	50	10.2	2.6	0.25	0.3	0.3	0.2	0.8
15/09/05	RT	173	105	17	4.6	0.27	1.3	0.9	0.5	2.7
04/10/05	RT	19	22	18.2	2.6	0.14	0.6	0.5	0.3	1.4
05/10/05	RT	23	56	22	3.2	0.15	1.0	0.3	0.3	1.6
06/10/05	RT	33	37	14.2	2.7	0.19	0.4	0.3	0.3	1.0
07/10/05	RT	34	36	9.2	3.1	0.34	0.4	0.4	0.3	1.2
11/10/05	RT	532	567	41	26.5	0.65	4.0	2.6	3.0	9.6

Apéndice 2. Relación entre sedimentos, sedimentos en suspensión, agua de escurrimiento y C asociado a éstos en parcelas experimentales de tepetate cultivado en Tlalpan, Tlaxcala.



Apéndice 3. Fraccionamiento físico de un tepetate t2 colectado en Tlalpan, Tlaxcala.

Energía J ml ⁻¹	FL	AG	AF	L	AR	Total	ST	FL	AG	AF	L	AR	Total
	------(%)-----						-----C g kg ⁻¹ de suelo-----						
Manejo tradicional													
0	0.4	9.7	40.8	43.9	3.0	97.9	4.3	0.7	0.1	0.7	2.9	0.4	4.8
	0.5	10.2	40.5	42.3	3.8	97.2	4.3	1.1	0.1	0.6	2.8	0.4	4.9
	0.5	9.2	40.2	44.0	3.6	97.4	4.3	0.9	0.1	0.6	2.9	0.5	4.9
228	0.6	9.6	34.5	32.1	20.7	97.5	4.3	1.2	0.1	0.0	2.3	1.7	5.3
	0.5	10.1	35.2	32.4	18.9	97.1	4.3	1.3	0.1	0.0	2.4	1.4	5.2
	0.4	9.4	36.4	31.3	20.2	97.8	4.3	0.9	0.1	0.2	2.3	1.6	5.0
455	0.4	8.9	35.6	30.1	24.2	99.2	4.3	1.0	0.1	0.2	2.2	2.0	5.5
	0.3	9.3	35.1	28.4	24.1	97.3	4.3	0.9	0.1	0.2	2.0	2.0	5.2
	0.4	11.0	33.2	28.7	24.5	97.8	4.3	1.1	0.1	0.1	2.0	2.1	5.5
910	0.4	10.3	33.9	26.9	26.0	97.5	4.3	1.1	0.1	0.0	1.9	3.0	6.1
	0.5	9.7	34.3	28.2	25.8	98.5	4.3	1.4	0.1	0.0	2.1	2.3	5.9
	0.4	9.7	32.8	28.0	25.3	96.3	4.3	1.1	0.1	0.0	2.0	2.5	5.6
1365	0.4	9.5	34.2	26.1	28.1	98.4	4.3	1.1	0.1	0.0	1.7	2.9	5.7
	0.5	11.0	32.1	25.5	28.3	97.4	4.3	1.2	0.1	0.0	1.7	2.9	5.9
	0.4	10.0	32.5	26.6	28.2	97.8	4.3	1.0	0.0	0.0	1.8	2.9	5.7
Manejo orgánico													
0	0.2	9.1	42.7	41.3	5.4	98.7	3.3	0.4	0.1	0.8	2.1	0.8	4.2
	0.2	10.0	37.2	47.2	5.2	99.7	3.3	0.5	0.1	0.6	2.5	0.6	4.3
	0.2	10.0	35.0	45.8	6.6	97.5	3.3	0.4	0.1	0.6	2.2	0.7	3.9
228	0.2	9.0	30.1	33.6	25.7	98.7	3.3	0.4	0.0	0.2	1.8	1.9	4.3
	0.2	9.4	30.2	31.7	24.9	96.4	3.3	0.4	0.0	0.1	1.7	1.7	3.9
	0.3	9.4	28.8	34.5	25.6	98.6	3.3	0.3	0.0	0.0	1.9	1.7	3.9
455	0.2	9.0	29.2	30.9	28.9	98.2	3.3	0.3	0.0	0.0	1.6	2.1	4.0
	0.1	9.1	28.9	31.0	28.4	97.5	3.3	0.4	0.0	0.1	1.6	2.2	4.2
	0.1	10.1	27.6	31.3	29.3	98.4	3.3	0.4	0.0	0.0	1.6	2.1	4.0
910	0.2	9.4	27.7	28.1	33.6	99.0	3.3	0.5	0.1	0.0	1.5	2.3	4.3
	0.2	9.1	27.7	29.3	29.7	96.1	3.3	0.7	0.0	0.0	1.4	2.2	4.4
	0.2	9.0	28.4	28.6	31.5	97.8	3.3	0.5	0.0	0.0	1.5	2.2	4.1
1365	0.2	9.5	26.5	28.4	33.8	98.4	3.3	0.4	0.0	0.0	1.5	2.3	4.2
	0.2	9.2	27.5	28.2	31.3	96.4	3.3	0.5	0.0	0.0	1.5	2.1	4.1
	0.1	10.0	26.5	28.2	32.0	96.8	3.3	0.2	0.0	0.0	1.5	2.2	3.8

AG: arena gruesa, AF: arena fina, AR: arcilla, FL: fracción liviana, L: limo, ST: suelo total

Apéndice 4. Fraccionamiento físico de un andosol cultivado colectado en la microcuenca de Coinzio, Michoacán.

Energía J ml ⁻¹	FL	AG	AF	L	AR	Total	ST	FL	AG	AF	L	AR	Total
	------(%)-----						-----C g kg ⁻¹ de suelo-----						
Manejo tradicional													
0	1.7	15.3	18.1	59.1	3.9	98.0	46.7	4.3	2.1	5.4	33.8	2.4	48.0
	1.4	13.8	19.4	56.9	5.1	96.7	46.7	4.0	1.9	5.9	31.4	3.2	46.4
	1.0	14.1	18.6	56.1	4.1	93.9	46.7	2.9	1.9	5.4	31.8	2.5	44.6
228	1.1	13.1	10.7	59.8	12.0	96.8	46.7	4.3	1.9	1.6	34.2	6.4	48.4
	1.0	14.3	11.4	59.7	13.2	99.6	46.7	3.1	2.1	1.7	33.8	7.1	47.9
	1.3	14.2	10.1	58.8	14.5	98.8	46.7	4.0	2.1	1.4	32.8	7.8	48.2
455	1.3	13.9	10.5	55.1	18.1	99.0	46.7	4.1	1.9	1.4	31.7	9.4	48.5
	1.6	15.1	9.7	54.3	19.0	99.7	46.7	5.1	2.0	1.2	30.9	9.9	49.1
	1.3	14.8	11.2	54.3	17.2	98.7	46.7	4.2	2.0	1.4	31.0	9.1	47.7
910	1.2	13.6	9.2	51.9	22.4	98.2	46.7	4.0	1.7	1.1	29.8	11.8	48.4
	1.1	13.8	9.1	50.9	23.6	98.4	46.7	3.9	1.7	1.1	29.3	12.2	48.2
	1.5	13.8	8.5	51.7	23.8	99.4	46.7	5.3	1.7	1.0	29.4	12.5	49.8
1365	1.1	14.0	8.9	48.3	26.1	98.4	46.7	4.2	1.9	0.9	28.0	13.3	48.4
	1.2	14.2	7.7	48.5	26.9	98.6	46.7	4.7	2.0	0.8	28.1	13.7	49.2
	1.2	14.5	7.6	48.0	27.7	99.0	46.7	4.7	2.1	0.8	27.8	14.1	49.5
Manejo orgánico													
0	0.7	11.6	20.9	59.5	4.4	97.1	48.5	2.3	2.0	6.5	33.6	2.5	46.9
	1.3	15.2	18.2	57.1	5.5	97.4	48.5	4.1	2.4	5.5	32.0	3.3	47.3
	0.8	13.2	19.1	58.0	5.0	96.2	48.5	2.8	2.1	5.9	32.5	3.0	46.2
228	0.8	12.8	10.7	57.7	14.1	96.1	48.5	2.7	2.0	1.5	32.5	8.0	46.6
	0.7	12.9	9.9	58.5	14.7	96.6	48.5	2.8	2.2	1.4	32.5	8.0	47.0
	0.9	13.2	9.7	57.4	15.5	96.7	48.5	3.4	2.2	1.3	32.4	8.5	47.8
455	0.7	11.5	9.3	56.4	17.9	95.7	48.5	2.7	1.9	1.1	31.6	9.9	47.1
	0.9	12.6	9.0	54.8	18.8	96.1	48.5	3.0	2.1	1.0	30.8	10.3	47.3
	0.8	11.1	9.3	55.8	18.9	95.8	48.5	2.9	1.8	1.1	31.3	10.3	47.4
910	0.8	12.7	7.9	52.2	23.0	96.6	48.5	2.8	2.1	0.7	29.3	12.4	47.4
	0.4	10.9	9.1	51.1	24.2	95.8	48.5	1.8	1.8	1.0	29.4	13.1	47.1
	0.7	11.2	7.9	50.9	24.6	95.4	48.5	2.8	1.9	0.8	28.9	13.1	47.4
1365	0.9	11.7	6.9	48.6	28.0	96.2	48.5	3.3	2.1	0.7	27.5	15.1	48.6
	0.5	11.3	6.8	49.4	28.8	96.8	48.5	1.8	2.0	0.6	27.9	15.6	47.9
	0.3	11.2	7.8	48.3	29.1	96.6	48.5	1.0	1.9	0.7	27.3	15.7	46.6

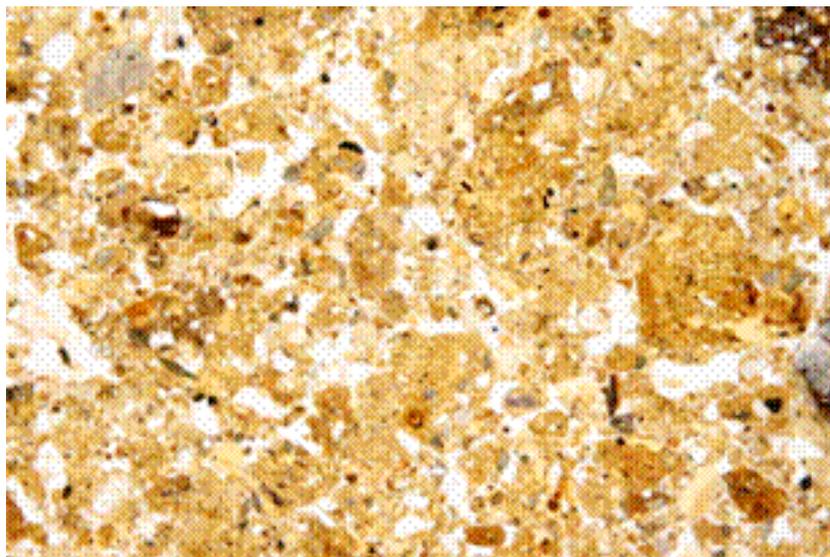
AG: arena gruesa, AF: arena fina, AR: arcilla, FL: fracción liviana, L: limo, ST: suelo total

Apéndice 5. Fraccionamiento físico de acrisol colectado en la microcuenca de Coinzio, Michoacán.

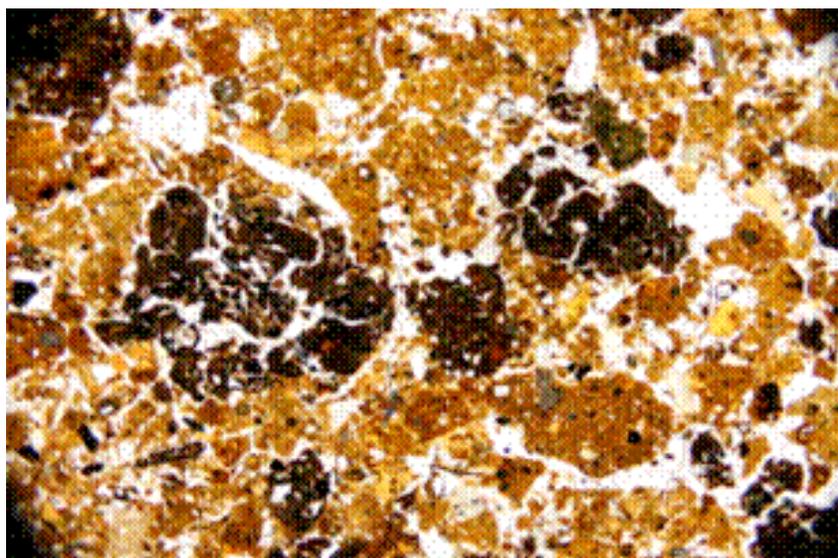
Energía J ml ⁻¹	FL	AG	AF	L	AR	Total	ST	FL	AG	AF	L	AR	Total
	------(%)-----						-----C g kg ⁻¹ de suelo-----						
Manejo tradicional													
0	0.2	0.5	22.6	59.3	14.9	97.6	19.9	0.7	0.0	3.1	12.5	3.6	19.9
	0.3	2.1	21.4	56.3	16.8	96.9	19.9	1.1	0.2	3.2	12.8	3.7	21.0
	0.5	2.4	22.2	57.8	16.0	98.9	19.9	1.5	0.1	3.0	12.6	1.9	19.1
228	0.7	4.1	6.7	35.7	41.8	89.0	19.9	2.0	0.5	0.4	9.0	8.3	20.1
	0.4	2.4	9.6	42.3	44.4	99.1	19.9	1.1	0.2	0.7	10.9	8.2	21.0
	0.3	2.5	8.3	43.8	43.4	98.4	19.9	1.0	0.3	0.5	11.1	8.3	21.2
455	0.4	2.2	8.2	38.6	50.5	99.9	19.9	1.2	0.2	0.5	10.8	9.6	22.3
	0.4	2.3	7.5	37.7	52.5	100.4	19.9	1.3	0.1	0.4	10.2	9.7	21.7
	0.8	3.0	7.8	38.2	49.4	99.1	19.9	1.7	0.3	0.4	10.2	9.2	21.8
910	0.7	2.4	7.3	33.5	54.6	98.5	19.9	1.4	0.2	0.3	9.0	10.9	21.7
	0.3	2.5	8.0	34.3	54.6	99.6	19.9	0.7	0.1	0.4	9.5	10.7	21.4
	0.6	2.6	7.4	35.5	52.3	98.3	19.9	1.8	0.2	0.3	9.8	9.8	21.9
1365	0.4	2.6	7.6	32.1	54.9	97.5	19.9	1.1	0.2	0.3	9.1	10.5	21.2
	0.5	2.3	8.3	31.8	58.4	101.4	19.9	1.4	0.2	0.4	9.1	11.2	22.2
	0.2	0.5	22.6	59.3	14.9	97.6	19.9	0.7	0.0	3.1	12.5	3.6	19.9
Manejo orgánico													
0	0.5	2.6	22.3	61.5	11.3	98.3	18.8	1.4	0.3	3.1	13.9	2.5	21.2
	0.3	2.7	20.9	60.1	13.7	97.7	18.8	0.9	0.3	2.8	13.2	2.7	19.9
	0.4	2.4	21.7	61.9	12.5	99.0	18.8	1.2	0.3	2.9	13.7	2.5	20.6
228	0.5	2.5	7.9	46.7	41.3	98.9	18.8	1.6	0.2	0.4	11.6	8.1	21.9
	0.3	2.7	10.2	48.1	36.8	98.1	18.8	0.9	0.3	0.6	11.7	7.0	20.6
	0.5	2.6	12.8	48.3	34.0	98.2	18.8	1.1	0.2	1.4	12.6	6.4	21.7
455	0.5	2.6	8.0	40.5	46.2	97.8	18.8	1.1	0.2	0.5	10.2	9.2	21.2
	0.5	2.5	9.4	42.1	44.6	99.1	18.8	1.7	0.1	0.7	10.4	8.6	21.5
	0.3	2.4	7.0	38.8	49.4	97.9	18.8	0.7	0.1	0.4	10.2	9.6	21.0
910	0.3	2.4	7.5	35.5	52.7	98.4	18.8	0.5	0.2	0.5	9.6	10.3	21.1
	0.6	2.4	7.1	36.4	52.0	98.5	18.8	1.0	0.2	0.3	9.6	10.2	21.3
	0.7	2.6	8.0	36.7	50.5	98.5	18.8	1.1	0.2	0.4	9.8	9.9	21.4
1365	0.4	2.4	6.5	32.7	54.1	96.0	18.8	0.7	0.2	0.2	8.6	9.0	18.7
	0.4	2.1	6.2	31.8	53.6	94.2	18.8	0.7	0.1	0.2	8.4	8.9	18.3
	0.7	2.8	6.1	32.3	54.8	96.6	18.8	0.8	0.3	0.2	8.5	9.1	18.9

AG: arena gruesa, AF: arena fina, AR: arcilla, FL: fracción liviana, L: limo, ST: suelo total

Apéndice 6. Corte transversal del sustrato tepetate correspondiente al tratamiento testigo sin inoculación del HMA *Glomus mosseae* y sin adición de vermicomposta.



Apéndice 7. Corte transversal del sustrato tepetate correspondiente al tratamiento con inoculación del HMA *Glomus mosseae* y con adición de vermicomposta.



Apéndice 8. Producción de agregados mayores de 4.76 mm en el tepetate después de concluir el experimento en invernadero (Capítulo V).

