



Terra Latinoamericana

E-ISSN: 2395-8030

terra@correo.chapingo.mx

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo,  
A.C.  
México

Vergara-Sánchez, Miguel Ángel; Etchevers-Barra, Jorge D.; Vargas-Hernández, Mateo  
Variabilidad del carbono orgánico en suelos de ladera del sureste de México  
Terra Latinoamericana, vol. 22, núm. 3, julio-septiembre, 2004, pp. 359-367  
Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.  
Chapingo, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57322313>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica  
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# VARIABILIDAD DEL CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DE LADERA DEL SURESTE DE MÉXICO

## Variability of Organic Carbon in Hillside Soils of the Southeast of Mexico

Miguel Ángel Vergara-Sánchez<sup>1‡</sup>, Jorge D. Etchevers-Barra<sup>1</sup> y Mateo Vargas-Hernández<sup>2</sup>

### RESUMEN

Uno de los servicios ambientales que proporciona el suelo es el secuestro de carbono. La capacidad para llevarlo a cabo varía de acuerdo con el tipo de suelo y sus características, historial de manejo y factores ambientales. El efecto del manejo en la distribución de carbono en los suelos de ladera es poco conocido. El propósito de este estudio fue cuantificar el C orgánico en suelos de laderas (0 a 20 y 20 a 40 cm) en tres regiones de la Sierra Norte de Oaxaca, México (Mazateca, Cuicateca y Mixe, representadas por microcuencas experimentales), así como su variabilidad y las diferencias entre sistemas de uso del suelo (bosques secundarios, cultivos agrícolas permanentes, anuales y mixtos). El porcentaje medio de C orgánico del suelo de las microcuencas, el carbono de las profundidades y el carbono de los sistemas estudiados dentro de cada microcuenca presentaron diferencias que fueron significativas, mismas que se atribuyeron al uso del suelo actual, al historial y a las condiciones climáticas de cada región. Estos resultados sugieren que las estimaciones del potencial de secuestro de C del suelo, en estas regiones y sistemas de uso de la tierra, deberían tomar en consideración los factores anteriores para que el cálculo resulte más cercano a la realidad de cada una de ellas.

**Palabras clave:** Secuestro de C, reservorios de C, materia orgánica del suelo, variabilidad espacial.

### SUMMARY

Carbon sequestration is one of the environmental services provided by the soil. The capacity to carry

out this function varies in accordance with soil type and its characteristics, previous management and environmental factors. The effect of management on soil carbon distribution has not been studied under hillside conditions. The objective of this survey was to quantify the variability of soil organic carbon (0 to 20 and 20 to 40 cm) in the slopes of three regions (Mazateca, Cuicateca, and Mixe, represented by experimental microbasins) and landuse systems (secondary forest, permanent, annual, and multiple cropping) in the Sierra Norte of Oaxaca, Mexico. The soil organic carbon (average of all observations) in the microbasins, the 0 to 20 and 20 to 40 cm depths and landuse systems revealed significant differences related to present soil use, previous management, and climatic conditions of each region. These results suggest that future estimations of potential soil carbon sequestration in these regions and landuses should consider these factors to calculate figures closer to actual values.

**Index words:** Carbon sequestration, carbon stocks, soil organic matter, spatial variability.

### INTRODUCCIÓN

El contenido y la variabilidad espacial del carbono del suelo se ha poco estudiado en terrenos agrícolas y con alta pendiente. El diseño de estrategias para la captura de este elemento requiere de una mejor comprensión de dicho fenómeno.

El suelo tiene capacidad para acumular C y retenerlo por largos periodos de tiempo, fenómeno conocido como secuestro de C (Swift, 2001). La cantidad de C que un suelo puede secuestrar y su distribución son funciones de las características, del uso y manejo del suelo (Lal *et al.*, 1998; Schwager y Mikhailova, 2002). Prácticas que aumentan la producción de biomasa vegetal o que reducen la erosión y la oxidación microbiana de la materia orgánica, son efectivas para incrementar la captura del C atmosférico y mitigar los efectos ambientales negativos que causa el aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico. Además, incrementan y preservan la calidad del suelo

<sup>1</sup>Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México.

<sup>‡</sup>Autor responsable (sesamo000@hotmail.com.mx)

<sup>2</sup>Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. 56230 Chapingo, estado de México.

Recibido: Septiembre de 2002. Aceptado: Marzo de 2004.

Publicado en *Terra Latinoamericana*: 359-367.

y mejoran la productividad agrícola (Carter *et al.*, 1997).

En el suelo ocurre una parte importante del ciclo global del C (Bruce *et al.*, 1999; Follet, 2001). Se estima que el total del C acumulado en los suelos de todo el mundo es mayor que la suma de éste en la atmósfera y en la vegetación (Swift, 2001). El C que el suelo secuestra es considerado como un servicio ambiental de alto beneficio para la humanidad (Arnold *et al.*, 1990). Para aprovechar eficientemente este fenómeno, es preciso comprender mejor las diferencias que existen entre suelos y su variabilidad. La variabilidad en la distribución del C en el suelo se puede analizar mediante herramientas, como la geoestadística, que permite estudiarla independientemente del tamaño de la unidad de observación. Trangmar *et al.* (1985), Stein *et al.* (1997), Schomberg *et al.* (2000) y Yanai *et al.* (2001) han empleado el análisis geoestadístico como una herramienta para examinar y describir la variabilidad espacial de las propiedades del suelo.

En el estado de Oaxaca, México, el uso del suelo de la Sierra Norte era originalmente forestal, pero con el transcurso del tiempo ha cambiado a agrícola. Las áreas explotadas se ubican en laderas con elevada pendiente (de 20 a 60%), donde se practica una agricultura de tipo tradicional, con escaso uso de recursos y limitada productividad. De acuerdo con Acosta (2003), la modificación de las tecnologías tradicionales, como es la implantación de sistemas agroforestales con árboles frutales intercalados con cultivos anuales (1400 árboles ha<sup>-1</sup>, donde cada árbol tiene la capacidad de secuestrar 1 kg año<sup>-1</sup> de C) y la labranza de conservación que deja los residuos de cosecha en el terreno, crean una condición potencial para secuestrar carbono. Sin embargo, el efecto de estas tecnologías en la variabilidad espacial del C del suelo no es claro. Un mejor entendimiento de esta última ayudaría a predecir con mayor exactitud la verdadera capacidad de captura de este elemento por los suelos y los sistemas de uso de la tierra.

El objetivo de este estudio fue determinar los porcentajes del C del suelo en sistemas de uso con vegetación nativa secundaria y con cultivos agrícolas permanentes, anuales y mixtos, comunes en terrenos de ladera de tres regiones del estado de Oaxaca, México, así como su variabilidad espacial, para contribuir a tener mayores elementos para la estimación del potencial de secuestro del C en tales áreas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se condujo en tres regiones de la Sierra Norte del estado de Oaxaca, México (Mazateca, Cuicateca y Mixe) en las que el Proyecto Manejo Sostenible de Laderas (PMSL) (Acosta, 2003) tiene microcuencas experimentales. Las características generales de las regiones y de las microcuencas se reportan en el Cuadro 1.

En cada una de las microcuencas, se seleccionaron sitios con diferentes usos del suelo (forestales, cultivos agrícolas permanentes, agrícolas mixtos y agrícolas anuales) representativos de esa región. El PMSL introdujo nuevas tecnologías de producción en esas regiones, como son labranza de conservación y sistemas agroforestales (muro vivo), destinadas a mejorar la captura del C y reducir o eliminar la roza-tumba-quema como sistema de producción, mismas que se incorporaron en este estudio.

Para estimar la variabilidad del C orgánico en los bosques, café, pradera y labranza de conservación, los autores generaron el siguiente esquema de muestreo: se trazaron dos líneas paralelas de 22 m de largo, con una separación de 4 m entre ellas y dos perpendiculares (a 1/3 y 2/3 de la distancia del extremo). Sobre las líneas paralelas se tomaron muestras de suelo a una distancia de 2 m y una muestra en la parte central de cada línea perpendicular, obteniéndose un total de 26 muestras simples en cada sistema.

En los sistemas labranza tradicional, roza-tumba-quema, acahual y muros vivos sólo se tomaron tres muestras compuestas; cada una formada por cinco a siete submuestras repartidas en cada tercio de la parcela. El muestreo en estos sistemas fue menos intensivo, pues sólo interesaba tener una idea general de cuál era el porcentaje de C orgánico en el suelo.

Las muestras se secaron al aire y se tamizaron antes de determinar su contenido de C orgánico mediante combustión seca; se empleó un analizador automático de C, Shimadzu TOC 5000-A.

Se calcularon la media, varianza, desviación estándar, el valor mínimo y valor máximo del C orgánico de las microcuencas, de las profundidades y de los sistemas de uso por microcuenca, con ayuda del SAS (SAS Institute, 1985). Las pruebas de comparación de medias, entre los sistemas y profundidades de muestreo, con base en un diseño completamente al azar, se hicieron mediante el estadístico de Tukey.

**Cuadro 1. Características generales de las regiones y microcuencas de estudio (Acosta, 2003).**

Características	Mazateca	Cuicateca	Mixe
		<b>Características de la región</b>	
Coordenadas geográficas	18° 08' 57'' a 18° 10' 13'' N 96° 53' 30'' a 96° 54' 43'' O	17° 50' 20'' a 17° 51' 25'' N 96° 53' 30'' a 96° 54' 43'' O	18° 08' 57'' a 18° 10' 13'' N 96° 53' 30'' a 96° 54' 43'' O
Área	2301.33 km <sup>2</sup>	1329.67 km <sup>2</sup>	6 470 km <sup>2</sup>
Suelo <sup>†</sup>	Luvisol, Rendzina, Feozem y Acrisol	Luvisol, Rendzina, Feozem y Acrisol	Acrisol y Cambisol
Uso del suelo	Agricultura, bosque pino-encino, selva alta, pastizal	Agricultura, bosque pino-encino, pastizal	Agricultura, selva baja, pastizal cultivado y bosque
Altitud	200 a 3250 msnm	200 a 3000 msnm	200 a 3200 msnm
Pendientes	> 15% (25-45%)	> 15%	> 25%
Precipitación	> 2000 mm	500 a 700 mm	1500 a 2000 mm
Temperatura	16 a 27 °C	18 – 20 °C	17 a 27 °C
		<b>Características de las microcuencas</b>	
Nombre	Santa Catarina	Concepción Pápalo	Zompantele
Superficie	319 ha	149 ha	32 ha
Altitud	1380 a 1910 m	1700 a 2200 m	1280 a 1525 m
Pendiente	> 30% (60%)	> 30% (65%)	> 30% (65%)
Tipo de suelo <sup>†</sup>	Acrisol	Luvisol	Acrisol
Uso suelo			
Milpa	41.04 ha	65.31 ha	3.00 ha
Pastizal	16.49 ha	27.66 ha	-
Bosque	20.29 ha	49.00 ha	0.52 ha
Café	169.14 ha	-	8.39 ha
Acahual	72.29 ha	-	20.77 ha
Matorral	-	5.20 ha	-

<sup>†</sup> INEGI (1997).

La variabilidad espacial del porcentaje de C orgánico en los sistemas donde se muestreó intensivamente, se analizó mediante semivariogramas calculados con el programa GS<sup>+</sup> (Robertson, 1998). Se seleccionaron aquellos modelos con la mas alta r<sup>2</sup> y la menor suma de cuadrados residual (RSS). Con el uso del programa Surfer 7 para Windows (Golden Software, 1999), se obtuvo un mapa de contornos para algunos de los sistemas estudiados.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Estadísticas Descriptivas del Porcentaje de Carbono

En el Cuadro 2, se muestran los porcentajes de C orgánico por microcuenca, promedio de todas las muestras y promedio por profundidad (de 0 a 20 y de 20 a 40 cm). Los resultados se reportan en porcentaje porque el objetivo del presente trabajo fue estudiar la concentración de C en el suelo y su variabilidad espacial y no los almacenes del mismo. No existen estudios previos de C en el suelo en estas regiones,

por lo cual no es posible hacer una comparación en tiempo.

Los porcentajes promedio de C del suelo de las microcuencas experimentales representativas de las regiones Mazateca, Cuicateca y Mixe fueron diferentes. La Mixe y la Mazateca tuvieron porcentajes promedio de C en el suelo (0 a 40 cm) similares (4.16 y 3.88%, respectivamente), pero mayores que los de la Cuicateca (1.93%). El porcentaje de C en esta última microcuenca fue significativamente más bajo que en las dos anteriores. Las diferencias se explican por las características particulares de manejo, clima, suelo y uso de cada una de ellas. Por ejemplo, para la preparación de los suelos en la Cuicateca se usa la tracción animal, a pesar de las altas pendientes (mayores que 25%) existentes en esa región, lo cual explicaría la pérdida de la mayor parte del horizonte superficial en los sitios con vegetación diferente a bosque. En contraste, en las regiones Mixe y Mazateca, donde las pendientes alcanzan hasta 50% y el suelo es labrado manualmente, prácticamente no hay erosión. Observaciones de los autores y mediciones de

**Cuadro 2. Porcentaje promedio de carbono por microcuencas (Mazateca, Cuicateca y Mixe) y por profundidad (0 a 20 y 20 a 40 cm) en la Sierra Norte de Oaxaca, México y estadísticos asociados.**

Microcuenca	Profundidad cm	N <sup>†</sup>	Media <sup>‡</sup>	Desv. Std.	Mínimo	Máximo
				----- % -----		
Promedio general por microcuenca						
Mazateca	0 a 40	372	3.88 a	1.53	0.40	11.60
Cuicateca	0 a 40	166	1.93 b	0.66	0.30	3.40
Mixe	0 a 40	214	4.16 a	2.18	0.70	11.60
DMS			0.30			
Promedio por microcuenca y profundidad						
Mazateca	0 a 20	186	4.67 b	1.54	0.70	11.60
Cuicateca	0 a 20	96	2.32 c	0.49	0.70	3.40
Mixe	0 a 20	107	5.63 a	1.80	2.40	11.60
DMS			0.44			
Mazateca	20 a 40	186	3.09 a	1.04	0.40	6.50
Cuicateca	20 a 40	70	1.43 c	0.49	0.30	2.60
Mixe	20 a 40	107	2.69 b	1.40	0.70	7.30
DMS			0.36			

<sup>†</sup> Número de muestras. <sup>‡</sup> Letras diferentes indican diferencias significativas (P = 0.01).

pérdidas de suelo por erosión en esas microcuencas (M. Martínez, 2002, Comunicación personal), indican que, en estas últimas, dichas pérdidas son escasas, aún en los suelos cultivados en pendientes mayores que 30%. En cuanto a clima, las regiones Mazateca y Mixe tienen precipitaciones pluviales más altas que la Cuicateca (2000 a 2500, 1500 a 2000 *versus* 500 a 700 mm año<sup>-1</sup>, respectivamente), por lo cual hay mayor producción de biomasa (Etchevers *et al.*, 2003) y, en consecuencia, mayor aporte de material vegetal al suelo, lo cual se refleja en el porcentaje de C encontrado en cada microcuenca. En cuanto a la profundidad del suelo, los autores anteriores reportaron que ésta es mayor que 60 cm en las microcuencas Mazateca y Mixe, mientras que en la Cuicateca es menor que ese valor. En cada microcuenca hay sistemas diferentes de uso de la tierra, con mayor presencia de bosques en la Mazateca y Mixe que en la Cuicateca. Los resultados del presente trabajo son consistentes con lo indicado por Lal *et al.* (1998) y Swift (2001), para quienes la capacidad de almacenamiento de C de un suelo depende de la vegetación que soporta, composición mineralógica, profundidad, drenaje, disponibilidad de agua y aire, además, del uso y manejo que se hace del mismo.

El porcentaje promedio de C de las profundidades 0 a 20 y 20 a 40 cm difirió entre las microcuencas, pero en todos los casos tuvo una tendencia decreciente similar. En general, fue entre 30 y 50% mayor en la capa superficial que en la subyacente. El porcentaje de este elemento en la última capa mencionada se

considera elevado, aún en el caso de la Cuicateca. La concentración de C que se determinó en los suelos de la Sierra Norte de Oaxaca fue, en general, alto, lo cual es un indicador de que poseen la capacidad para acumular este elemento. Se juzgó necesario analizar más profundamente el efecto que tenía el uso del suelo en dicho fenómeno.

En el Cuadro 3, se presenta el porcentaje de C por sistema de uso y por profundidad (0 a 20 y 20 a 40 cm) en las tres microcuencas y algunos estadísticos asociados. Los sistemas de uso de la tierra que se seleccionaron son representativos del área o son tecnologías alternativas propuestas para incrementar el secuestro de C y mejorar la productividad de la tierra y los ingresos del productor. La tecnología de muros vivos, una de las tecnologías ensayadas, se ha probado con anterioridad en otras zonas de México por miembros del grupo del PMSL (Turrent *et al.*, 1995)

El porcentaje de C en el suelo, dentro de cada microcuenca, fue función del sistema de uso de la tierra. En general, los sistemas agrícolas anuales presentaron porcentajes de C similares o incluso mayores que los de vegetación arbórea o con cultivos permanentes, tal es el caso de RTQ LC, RTQ LT, LT<30 y LC<30 en la Mazateca, LC y LT en la Mixe y LC(Y) en la Cuicateca.

El bajo porcentaje de C en los bosques de liquidámbar y de aile en la Mazateca se debe, según Acosta (2003), a que en el pasado éstos tuvieron un uso agrícola intenso y se habrían abandonado debido a la degradación. Con el tiempo, esas áreas se

convirtieron en bosques secundarios con lento crecimiento. En contraste, la producción de biomasa aérea de la milpa (que emplea variedades criollas de gran porte) alcanza, en algunos casos, aproximadamente 10 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (J.I. Cortés Flores, 2003. Comunicación personal). Se estima que la

biomasa de las raíces de los cereales es equivalente a 15% de la biomasa aérea (Rodríguez, 1993) que, sumada a los residuos de cosecha, constituye un importante aporte anual de carbono. Datos preliminares de la Mazateca muestran que el contenido de C en la zona de raíces de los sistemas

**Cuadro 3. Porcentaje de carbono por sistema de uso de la tierra y por profundidad (0 a 20 y 20 a 40 cm), en las microcuencas Mazateca, Cuicateca y Mixe de la Sierra Norte de Oaxaca, México y estadísticos asociados.**

Uso de la tierra <sup>†</sup>	0 a 20 cm				20 a 40 cm			
	Media <sup>‡</sup>	S <sup>§</sup>	Mín.	Máx.	Media <sup>‡</sup>	S <sup>§</sup>	Mín.	Máx.
----- % -----								
<b>Mazateca</b>								
Sist. Naturales								
B. Aile	5.43 abc	1.07	3.3	8.1	3.15 ab	0.41	2.5	4.0
B. Liquidámbar	5.36 abc	0.56	4.2	6.3	3.29 ab	0.59	2.0	4.6
Sist. Agr. Permanente								
Café	4.99 abcd	2.54	0.7	11.6	3.36 ab	1.71	0.4	6.5
Pradera	3.85 bcd	0.36	2.7	4.5	2.43 b	0.56	1.1	3.2
Sist. Agr. Mixtos								
MVDUR	2.83 d	0.30	2.4	3.2	2.11 b	0.59	1.5	3.0
MVCAFE	5.02 abc	0.58	4.1	5.5	3.31 ab	0.57	2.5	4.1
Sist. Agr. Anual								
L C >30	3.14 cd	0.20	2.8	3.6	2.39 b	0.24	2.1	3.1
L T >30	2.93 d	0.25	2.7	3.2	4.50 a	0.95	3.9	5.6
L C <30	5.47 ab	0.97	2.2	6.9	3.65 ab	1.11	0.9	5.5
L T <30	5.40 abc	1.30	3.9	6.2	3.67 ab	0.45	3.2	4.1
R-T-Q								
RTQ LC	6.62 a	0.85	5.8	7.5	3.70 ab	0.34	3.3	3.9
RTQ LT	5.43 abc	2.88	2.1	7.2	4.63 a	1.04	3.8	5.8
DMS	2.29				1.69			
<b>Cuicateca</b>								
Sist. Agr. Permanente								
Pradera	1.99 ab	0.39	0.7	2.5	0.94 b	0.35	0.30	1.5
Sist. Agr. Mixtos								
MVDUR (Y)	2.10 ab	0.25	1.7	2.4	1.62 a	0.20	1.4	2.0
MVDUR (C)	2.28 ab	0.31	1.8	2.7	1.80 a	0.19	1.5	2.0
Sist. Agr. Anual								
LC (Y)	2.70 a	0.57	0.7	3.4	1.69 a	0.38	0.8	2.6
LT (Y)	1.77 b	0.23	1.5	1.9	1.86 a	0.25	1.6	2.1
LC (C)	2.42 ab	0.31	1.7	2.9	----	----	----	----
LT (C)	2.17 ab	0.21	2.0	2.4	1.70 a	0.20	1.5	1.9
DMS	0.70				0.59			
<b>Mixe</b>								
Sist. Naturales								
Bosque	4.73 c	0.94	2.8	7.1	2.12 b	0.88	0.7	4.5
Acahual (2)	4.38 c	1.15	2.4	6.9	1.99 b	0.88	0.8	3.8
Sist. Agr. Permanente								
Café	4.60 c	0.70	2.9	5.7	1.80 b	0.54	1.0	3.4
Sist. Agr. Mixtos								
MVCAFE	6.63 b	0.62	5.5	7.8	4.19 a	1.46	2.0	6.7
Sist. Agr. Anual								
L C	7.85 a	1.59	4.9	11.6	3.76 a	1.24	1.9	7.3
L T	9.40 a	0.95	8.5	10.4	3.97 a	1.95	2.1	6.0
DMS	1.55				1.33			

<sup>†</sup> MVDUR y MVCAFE = muro vivo de durazno y café intercalado con maíz; LT y LC = labranza tradicional y de conservación; < y > 30 = pendiente del terreno en porcentaje; R-T-Q = roza-tumba-quema; Acahual(2) = acahual de dos años de edad; Y y C = sitio Yacuay y Las Coloradas; DMS = diferencia mínima significativa. <sup>‡</sup> Letras diferentes dentro de cada microcuenca indican diferencias significativas. <sup>§</sup> Desviación estándar

anuales de cultivo (2.3 a 4.3 Mg ha<sup>-1</sup>) en la profundidad de 0 a 105 cm, son similares a los medidos en los Bosque de aile y liquidambar (2.31 a 4.14 Mg ha<sup>-1</sup>) (Acosta, 2003).

El porcentaje de C en la profundidad de 0 a 20 cm de RTQ LT (5.43%) y LT<30 (5.40%) en la microcuenca Mazateca, fue similar al medido en el Bosque de aile (5.43%) y Bosque de liquidambar (5.36%), pero más elevado que en el de los sistemas permanentes: Café (4.99%) y Pradera (3.85%). El mayor porcentaje correspondió al sistema RTQ LC (6.62%). Parte del C de este sistema es C condensado o carbón vegetal, residuo de las quemas.

En la microcuenca Mixe, el porcentaje de C en el suelo (0 a 20 cm) en los sistemas agrícolas LT y LC fue aproximadamente el doble (9.40%) que en el Bosque, el Acahual y el Café (4.73, 4.38 y 4.60%, respectivamente). En esta microcuenca y en la Mazateca, los agricultores preparan el terreno manualmente, lo cual reduce la probabilidad de oxidación de la materia orgánica, permitiendo su acumulación. Contrariamente a lo que habitualmente se piensa, el manejo tradicional que dan los agricultores de las regiones Mazateca y Mixe al suelo y a los cultivos, permite conservar las reservas de C en valores similares a los encontrados en los sistemas de bosque incluidos en este estudio.

En la microcuenca Cuicateca, la LC(Y), LT(C) y LC(C) y la Pradera presentaron entre 2.70 y 1.99% de C en el suelo (0 a 20 cm), valores estadísticamente iguales, lo cual determinó que la media del porcentaje de C en la Cuicateca fuera inferior a la media de las otras dos microcuencas

Los sistemas de producción con muro vivo en la Mazateca y la Mixe tuvieron, en general, menor porcentaje de C orgánico [2.83% el muro vivo de durazno (MVDUR) en la Mazateca y 6.63% el muro vivo de café (MVCAFE) en la Mixe], que los sistemas anuales. Esto se atribuyó a que durante la preparación del terreno para la plantación de los frutales que forman el muro vivo, se modificó la pendiente del mismo, desplazando suelo de la parte alta hacia la parte baja para formar la terraza; sin embargo, MVCAFE en la Mazateca y MVCAFE en la Mixe mostraron porcentajes de C orgánico similares o mayores que en los sistemas con vegetación arbórea. Los sistemas de LC y MV, que se introdujeron en la región en 1999, no muestran aún efecto claro sobre el contenido de C orgánico (Vergara, 2003).

## Variabilidad Espacial del Porcentaje de Carbono

En el Cuadro 4, se presentan algunos parámetros geoestadísticos correspondientes al porcentaje de C orgánico en el suelo (profundidades de 0 a 20 y de 20 a 40 cm) en sistemas de uso de la tierra seleccionados. Estos sistemas corresponden a aquellos donde se hizo un muestreo intensivo con este propósito. Se consideró que no hubo ajuste del modelo cuando el valor de  $r^2$  era menor que 0.50. En este cuadro, sólo se muestran los sistemas con  $r^2$  mayor que 0.50.

En los sistemas naturales y permanentes fue posible ajustar un mayor número de modelos que en los sistemas anuales (Cuadro 4), lo cual significa que la distribución del C es más uniforme en sistemas donde no ocurre movimiento del suelo durante largos periodos.

El rango parámetro que indica el límite de la dependencia espacial, fue pequeño en la mayoría de los casos, pero los valores de semivarianza fueron muy amplios. Esto indica que existe una considerable variabilidad en los porcentajes de C en el suelo. La heterogeneidad observada en la distribución del porcentaje de C en el suelo era esperada, ya que éste no es un cuerpo natural homogéneo y sus propiedades no se distribuyen uniformemente. Conocer la magnitud de esa heterogeneidad permite reducir errores en las extrapolaciones.

En la microcuenca Mazateca no fue posible ajustar un modelo con  $r^2$  mayor que 0.5 en los sistemas LC > 30 y Pradera. Haynes y Williams (1993) señalaron que, en las praderas, la elevada heterogeneidad se debe a la distribución aleatoria de las excretas que deja el ganado; éste, además, modifica sustancialmente la remoción y distribución de los nutrientes en los sitios donde pasta. En esta microcuenca, los valores de la semivarianza, considerando ambas profundidades, fueron de 0.24 en Bosque de aile hasta de 7.86 en Café. En la microcuenca Cuicateca para LC(C) sólo se contó con resultados de la profundidad de 0 a 20 cm a los que fue posible ajustarles un modelo, al igual que en LC(Y), profundidad de 20 a 40 cm. La semivarianza fue de 0.14 en LC(C) a 0.31 en Pradera cuando se consideraron ambas profundidades. Para LC de la microcuenca Mixe sólo fue posible ajustar un modelo en la profundidad de 20 a 40 cm. La semivarianza, considerando ambas profundidades, fue de 0.37 en Café a 1.79 en LC.

**Cuadro 4. Resumen del análisis geoestadístico para algunos sistemas de uso de la tierra en las microcuencas Mazateca, Cuicateca y Mixe de la Sierra Norte de Oaxaca, México.**

Uso de la tierra <sup>†</sup>	Profundidad cm	Modelo	C <sub>0</sub> <sup>‡</sup>	C <sub>0</sub> +C <sup>§</sup>	Rango	RSS <sup>¶</sup>	r <sup>2</sup>
<b>Mazateca</b>							
Sist. Naturales							
B. Aile	20 a 40	Linear/sill	0.12	0.24	20.26	0.003	0.82
B. Liquidámbar	0 a 20	Esférico	0.12	0.33	5.79	0.006	0.56
	20 a 40	Linear/sill	0.03	0.42	6.55	0.013	0.80
Sist. Agr. Perm.							
Café	0 a 20	Linear/sill	3.24	7.86	10.37	0.450	0.95
	20 a 40	Gausiano	0.90	2.91	13.51	0.227	0.87
Sist. Agr. Anual.							
LC <30	0 a 20	Linear/sill	0.21	1.00	8.42	0.100	0.74
	20 a 40	Exponen.	0.	1.87	8.32	0.017	0.97
<b>Cuicateca</b>							
Sist. Agr. Perm.							
Pradera	0 a 20	Gausiano	0.118	0.25	24.58	0.0005	0.93
	20 a 40	Gausiano	0.036	0.31	22.87	0.0012	0.97
Sist. Agr. Anual.							
LC (Y)	20 a 40	Exponen.	0.012	0.18	3.02	0.0001	0.96
LC (C)	0 a 20	Exponen.	0.025	0.14	7.54	0.0005	0.98
<b>Mixe</b>							
Sist. Naturales							
Bosque	0 a 20	Linear/sill	0.60	0.84	6.55	0.016	0.54
	20 a 40	Linear/sill	0.44	0.96	12.31	0.060	0.65
Acahual (2)	0 a 20	Linear/sill	0.13	1.40	4.56	0.220	0.94
	20 a 40	Linear/sill	0.48	1.06	10.38	0.560	0.69
Sist. Agr. Perm.							
Café	0 a 20	Esférico	0.21	0.60	8.17	0.002	0.94
	20 a 40	Linear/sill	0.12	0.37	10.36	0.006	0.86
Sist. Agr. Anual.							
LC	20 a 40	Esférico	0.90	1.79	14.28	0.067	0.78

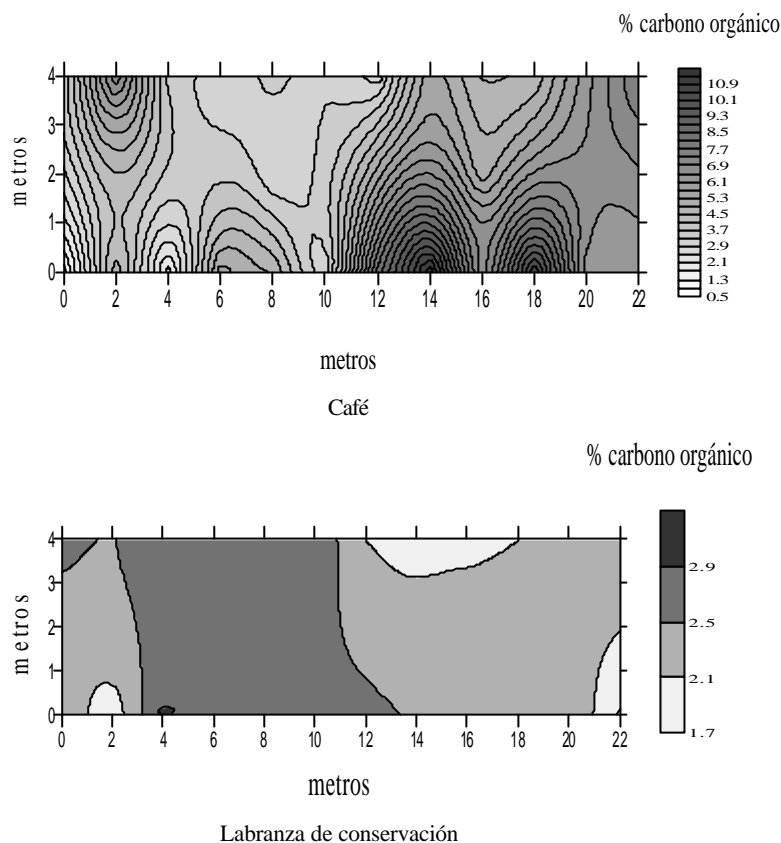
<sup>†</sup> LT y LC = labranza tradicional y de conservación; < y > 30 = pendiente del terreno; Acahual(2) = Acahual (2)-Acahual de dos años de edad; Y y C = sitio Yacuay y Las Coloradas. <sup>‡</sup> Nugget (variabilidad espacial no explicada debido al esquema de muestreo usado, es la ordenada al origen). <sup>§</sup> Sill (valor máximo de la semivarianza). <sup>¶</sup> Suma de cuadrados de residuales.

La mayor amplitud de los valores de la semivarianza en las microcuencas Mazateca y Mixe, con respecto a la Cuicateca, indican una mayor variabilidad de C del suelo en esas cuencas. La imposibilidad de ajustar un modelo a los datos de los sistemas de LC se debe a que los residuos de las cosechas no se distribuyeron uniformemente, por lo que no se encontró una dependencia espacial entre muestras colindantes.

Para ilustrar la variabilidad de C en las áreas de estudio, se seleccionaron tres sistemas de uso de la tierra. Los sistemas se diferencian por la vegetación que sostienen, el régimen climático y el manejo, por lo que la media, la desviación estándar y los valores mínimo y máximo de C orgánico del suelo que exhiben es contrastante (Cuadro 5).

Los mapas de contorno, generados por el programa Surfer 7 para Windows (Golden Software, 1999) para dos sistemas contrastantes, se muestran en la Figura 1.

Las líneas de contorno indican puntos con igual porcentaje de C orgánico. En condiciones de pendientes pronunciadas, la distribución del C resultó ser muy heterogénea. Así, por ejemplo, el porcentaje de este elemento en el sistema Café de la microcuenca Mazateca, va de un mínimo de 0.7% a un máximo de 11.6%, mientras que en el sistema LC(C) de la Cuicateca el intervalo es de 1.7 a 2.9% de C orgánico. La alta variabilidad de estos resultados permiten indicar que las mediciones de C que se realicen para establecer líneas bases o estudios referentes a proyecciones de captura de C, en terrenos de ladera,



**Figura 1. Mapas de contornos para Café (Mazateca) y Labranza de Conservación en Las Coloradas (Cuicateca), profundidad de 0 a 20 cm, en la Sierra Norte de Oaxaca, México.**

deben tomar en cuenta la heterogeneidad de la concentración de C en el suelo.

### CONCLUSIONES

- Los porcentajes de C del suelo en las microcuencas experimentales fueron muy variables. Las medias de éstos en la profundidad de 0 a 20 cm de la Mazateca se ubicó en el intervalo de 0.7 a 11.6%, en la Cuicateca de 0.7 a 3.4% y en la Mixe de 2.4 a 11.6%.

**Cuadro 5. Sistemas seleccionados para ilustrar la variabilidad del porcentaje de carbono orgánico en las áreas de estudio (datos de la profundidad de 0 a 20 cm).**

Microcuenca	Sistema <sup>†</sup>	Media	S <sup>‡</sup>	Mín.	Máx.
Mazateca	Café	4.99	2.54	0.7	11.6
Cuicateca	Pradera	1.99	0.39	0.7	2.5
Cuicateca	LC (C)	2.42	0.31	1.7	2.9

<sup>†</sup> LC(C)-Maíz en labranza de conservación. Sitio Las Coloradas.

<sup>‡</sup> Desviación estándar.

En la profundidad de 20 a 40 cm, los porcentajes de C del suelo fueron 30 a 40% menores. Las diferencias en porcentajes de C fueron explicadas por las diversas condiciones ecológicas y de manejo presentes en los sitios estudiados.

- Los porcentajes de C del suelo en las microcuencas, sistemas de uso de la tierra dentro de cada microcuenca y profundidades fueron significativamente diferentes. El conocer dichas diferencias permitirá realizar estimaciones del C más cercanas a la realidad, así como una mejor planeación de los trabajos futuros de medición de este elemento en las áreas de estudio.

- La variabilidad espacial del porcentaje de C en los suelos de ladera de la Sierra Norte de Oaxaca fue considerable. Las semivarianzas tuvieron un rango de 0.14 a 7.86 en la profundidad de 0 a 20 cm y de 0.18 a 2.91 en la profundidad de 20 a 40 cm. La variabilidad, aun en los sistemas ubicados dentro de la misma cuenca es amplia, como resultado de la alta heterogeneidad en la distribución del carbono. En los

sistemas no-agrícolas se obtuvieron, en general, más y mejores ajustes de los modelos geoestadísticos que de los agrícolas. Estudios subsecuentes deben elucidar cómo las prácticas de manejo, propias de cada sistema, afectan la variabilidad del C, permitiendo valorar, de manera indirecta, el efecto de éstas sobre la dinámica y potencial del secuestro de C y proporcionar información para el manejo sitio-específico y la toma de muestras

- Futuras extrapolaciones, a escala de cuenca, que tomen como base los resultados aquí obtenidos deben considerar la heterogeneidad en el contenido de C de los sistemas de uso de la tierra y profundidades estudiadas.

### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al GEF-BM por el apoyo económico para la realización de esta investigación, así como a los directivos, técnicos y productores del Proyecto Manejo Sostenible de Laderas (PMSL) y al personal administrativo y operativo del Laboratorio de Fertilidad de Suelos, Edafología, Instituto de Recursos Naturales, del Colegio de Postgraduados, por su ayuda y colaboración en el muestreo y análisis de suelos.

### LITERATURA CITADA

- Acosta M., M. 2003. Diseño y aplicación de un método para medir los almacenes de carbono en sistemas con vegetación forestal y agrícola de ladera en México. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Arnold, R.W., I. Szabolcs y V.O. Targulian (eds.). 1990. Global soil change. International Institute for Applied Systems Analysis-International Soil Science Society-United Nations Environmental Program. Laxenburg, Austria.
- Bruce, J.P., M. Frome, E. Haites, H. Janzen, R. Lal y K. Paustian. 1999. Carbon sequestration in soils. *J. Soil Water Conserv.* 54: 382-389.
- Carter, M.R., E.G. Gregorich, D.W. Anderson, J.W. Doran, H.H. Janzen y F.J. Pierce. 1997. Concepts of soil quality and their significance. pp. 1-19. *In: Gregorich, E.G. y M. Carter (eds.). Soil quality for crop production and ecosystem health.* Elsevier Science Publishers. Amsterdam, The Netherlands.
- Etchevers, J.D., M. Acosta, C. Monreal, C. Hidalgo, J. Padilla y L. Jiménez. 2003. Below-ground (roots and soil) compartments of carbon in forest and agricultural systems on hillsides in Mexico. pp. 163-172. *In: Scott Smith C.A. (ed.). Soil organic carbon and agriculture: Developing indicators for policy analyses.* Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa and Organization for Economic Cooperation and Development. Paris, France.
- Follet, R.F. 2001. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soil Tillage Res.* 61: 77-92.
- Golden Software, Inc. 1999. Surfer, Versión 7. Golden, CO.
- Haynes, R.J. y P.H. Williams. 1993. Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem. *Adv. Agron.* 49: 119-199.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1997. Carta edafológica (disco compacto): Cobertura nacional, Serie 1. ISBN 970-13-1812-9. Aguascalientes, México.
- Jobbágy, E. y R.B. Jackson. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol. Applications* 10: 423-436.
- Lal, R., J. Kimble, R. Follet y B.A. Stewart 1998. Soil processes and the carbon cycle. CRC Press. Boca Raton, FL.
- Robertson, G.P. 1998. GS<sup>+</sup>: Geostatistics for the environmental science. Gamma Design Software. Plainwell, MI.
- Rodríguez S., J. 1993. La fertilización de los cultivos. Un método racional. Colección de Agricultura. Facultad de Agronomía. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
- SAS Institute. 1985. Introductory guide for personal computers. 6th ed. Raleigh, NC.
- Schomberg, H.H., J.A. Stuedemann, A.J. Franzluebbers y S.R. Wilkinson. 2000. Spatial distribution of extractable phosphorus, potassium, and magnesium as influenced by fertilizer and tall fescue endophyte status. *Agron. J.* 92: 981-986.
- Schwager, S.J. y E.A. Mikhailova. 2002. Estimating variability in soil organic carbon storage using the method of statistical differentials. *Soil Sci.* 167: 194-200.
- SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación, 31 de diciembre. México, D.F.
- Stein, A., J. Brouwer y J. Bouma. 1997. Methods for comparing spatial variability patterns of millet yield and soil data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 861-870.
- Swift, R.S. 2001. Sequestration of carbon by soil. *Soil Sci.* 166: 858-871.
- Trangmar, B.B., R.S. Yost y G. Uehara. 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Adv. Agron.* 38: 45-94.
- Turrent F., A., S. Uribe G., N. Francisco N. y R. Camacho C. 1995. La terraza de muro vivo para laderas del trópico subhúmedo de México. I. Análisis del desarrollo de la terraza durante 6 años. *Terra* 13: 276-298.
- Vergara S., M.A. 2003. Identificación y selección de indicadores de calidad del suelo y sustentabilidad en sistemas naturales y agrícolas de ladera en Oaxaca. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Yanai, J., C.K. Lee, T. Kaho, M. Lida, T. Matsui, M. Umeda y T. Kosaki. 2001. Geostatistical analysis of soil properties and rice yield in a paddy field and application to the analysis on yield-determining factors. *Soil Sci. Plant Nutr.* 47: 291-301.