



ALMACENES DE CARBONO Y ESTABILIDAD DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO EN UN AGROECOSISTEMA CAFETALERO EN LA SIERRA SUR DE OAXACA, MÉXICO

[CARBON STORAGE AND STABILITY OF SOIL ORGANIC MATTER IN A COFFEE AGROECOSYSTEM IN SIERRA SUR DE OAXACA, MEXICO]

Gustavo Álvarez Arteaga^{1*}, Abel Ibáñez Huerta¹,
Norma Eugenia García Calderón² and Gonzalo Almendros Martín³

¹Lab. Edafología Nicolás Aguilera, Dpto. Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F. 04510, México. Email: galvareza68@gmail.com

²UMDI-DERN Facultad de Ciencias, Campus Juriquilla, Universidad Nacional Autónoma de México, 76230, Querétaro

³Centro de Ciencias Medio Ambientales CSIC, Madrid, España

*Corresponding author

SUMMARY

We evaluated the ability of the soils in a shade coffee agroecosystem under different handling conditions to accumulate stable forms of carbon in the Sierra Sur of Oaxaca, for this we quantify the soil carbon store and performed the isolation and chemical characterization of soil organic matter by chemical fractionation, UV-visible and infrared spectroscopy in the first 40 cm depth. Results showed no significant differences in carbon stores between handling conditions, reaching mean values 150 Mg C ha⁻¹. Humification patterns are consistent for all soils and indicate that over 50% of soil organic matter found in the insolubilization humins and between 15 and 20% are humic acids. This fraction, presumably the most stable, is made up of molecules whose aromatic and maturation has a positive relationship with increasing altitude and clay content. According to the above confirms the ability of shade-coffee agroecosystems to accumulate high carbon content associated with stable forms of soil mineral fraction.

Key words: humic acids; humins; infrared spectroscopy.

RESUMEN

Se evaluó la capacidad de los suelos de un agroecosistema cafetalero de sombra bajo diferentes condiciones de manejo para acumular formas estables de carbono, en la Sierra Sur de Oaxaca; para ello, se cuantificó el almacén de carbono edáfico y se realizó el aislamiento y caracterización química de la materia orgánica del suelo mediante fraccionamiento químico, espectroscopía UV-visible e infrarroja en los primeros 40 cm de profundidad. Los resultados no mostraron diferencias significativas para los almacenes de carbono entre condiciones de manejo, situándose en valores promedio de 150 Mg C ha⁻¹. Los patrones de humificación son consistentes para todos los suelos e indican que más del 50 % de la materia orgánica del suelo se encuentra en las huminas de insolubilización y entre el 15 y 20 % corresponde a los ácidos húmicos. Esta fracción, presumiblemente la más estable, está conformada por moléculas cuya aromaticidad y maduración tiene una relación positiva con el incremento de altitud y el contenido de arcillas en el suelo. De acuerdo a lo anterior se corrobora la capacidad de los agroecosistemas cafetaleros bajo sombra para acumular elevados contenidos de carbono en formas estables asociadas con la fracción mineral del suelo.

Palabras clave: ácidos húmicos; huminas; espectroscopía.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la cafecultura en México durante el Siglo XX propició que grandes extensiones de bosques tropicales modificaran su vocación original

hacia esta práctica agroforestal, estableciéndose sistemas de manejo bajo diferentes intensidades, basados tanto en el desmonte total y la introducción de plantaciones monoespecíficas, como en la coexistencia del café con algunas especies nativas o

introducidas para su protección, a lo que se ha denominado cultivo de café en jardín (Moguel y Toledo, 1996). Los estudios realizados en zonas cafetaleras de México y de otras partes del mundo han permitido entender las ventajas ambientales y socioculturales que plantean estos sistemas de manejo frente al cultivo monoespecífico (Moguel y Toledo 1999; García Calderón *et al.*, 2000). Sin embargo, aún es necesario profundizar en el conocimiento del impacto que ejerce esta práctica sobre las propiedades y funciones del suelo.

La materia orgánica del suelo (MOS) desempeña un papel muy importante en el mantenimiento de la fertilidad a través de la retención y transferencia de nutrientes a las plantas (Stevenson, 1994), por lo que su contenido y calidad son críticos para que el suelo pueda mantener estas funciones. Tanto el contenido como la composición de la MOS pueden variar en función del uso y manejo del suelo, p.e. Detwiler, (1986) estimó que el contenido de C en suelos de bosques tropicales disminuye en un 40 % cuando se dedican a prácticas agrícolas, requiriendo de al menos 35 años para la recuperación de los niveles originales, una vez que estos suelos son abandonados; por otra parte, Watanabe *et al.*, (2001), en una secuencia de suelos forestales con mayor intensidad de manejo, encontraron que la proporción de ácidos húmicos (AH) en la MOS de las capas superficiales disminuía, en tanto que la de los ácidos fúlvicos (AF) se incrementaba. En este mismo sentido, Velasco y García Calderón (1990), encontraron una disminución en el grado de humificación y estabilidad estructural en suelos con vegetación secundaria (acahuales) y bajo cultivo de café. A partir de lo anterior, es posible inferir que los cambios de uso en el suelo tienden a influir de manera importante sobre el contenido y las características químicas de la MOS, siendo tal vez las sustancias húmicas los constituyentes del suelo que en mayor medida acusan el efecto de los impactos ambientales. No obstante, poco se conoce sobre el contenido y composición química de la MOS y su trascendencia sobre las funciones ecosistémicas de los suelos de las zonas cafetaleras en México, por lo que el objetivo de este estudio se centra en evaluar ambos parámetros en los suelos de una finca cafetalera en el Estado de Oaxaca, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización de la zona de estudio

El estudio se realizó en la finca cafetalera “El Sinaí” (Figura 1) en el Estado de Oaxaca, México (16°07'41.5 N, 97°06'12.9 O). El relieve es montañoso, escarpado y el rango de altitud va de 900

a 1300 m. La formación montañosa data del Paleozoico y los materiales parentales son gneises, anfibolitas y granitos del Cenozoico (Hernández *et al.*, 1996). El relieve es complejo y las pendientes se orientan de norte–este y oeste–sur y pueden sobrepasar el 40 %. El clima de la región se clasifica como cálido, húmedo isotermal con una precipitación anual de 1800 a 2000 mm y una temperatura media anual de 21 a 21.9 °C (García, 2004). Existen dos periodos principales en el año: el de lluvias que va de junio a noviembre y el seco de diciembre a mayo. La vegetación, originalmente de bosque tropical subcaducifolio (Rzedowski y Huerta, 1978) coexiste ya modificada desde hace más de 150 años con plantaciones de café (*Coffea arabica* L.). En un estudio florístico en la localidad de Santos Reyes Nopala, adyacente a nuestro sitio de estudio, se encontraron un total de 25 especies de árboles y arbustos en un transecto de 200 m, de las cuales, además del café destacan diversas especies frutícolas (Moguel y Toledo, 1996). De acuerdo a los datos reportados, los suelos de la finca cafetalera corresponden a Alisoles úmbricos, húmicos y arénicos, Cambisoles mólicos y Umbrisoles arénicos (FAO-ISRIC-ISSS, 1998). La pedogénesis de estos suelos resulta compleja y en gran medida está determinada por el fuerte intemperismo de los materiales parentales y por procesos de ladera (García-Calderón *et al.*, 2006)

Procedimiento de muestreo

A partir de una malla con puntos equidistantes a 100 m, se tomaron muestras de suelo de 0-20 y 20-40 cm, totalizando 131 puntos dentro de la finca cafetalera, de los cuales 83 correspondieron a plantaciones de café y 48 a suelos abandonados (acahuales). Adicionalmente se caracterizaron los perfiles tipo para los diferentes grupos de suelo y condiciones de manejo identificados dentro de la finca (García-Calderón *et al.*, 2006). Para las primeras muestras se determinó su pH (en H₂O y KCl 1M), densidad aparente (DA) por el método del cilindro y Carbono Orgánico Total (COT). En el caso de los perfiles, además se evaluó la textura por el método del hidrómetro (Tan, 1996), Nitrógeno total (N_t) por el método de micro-Kjeldahl, Bases Intercambiables (BI) con acetato de amonio (Juo *et al.*, 1976) y la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) como la suma de las bases intercambiables y acidez intercambiable (Tan, 1996). El contenido de COT en todos los casos se cuantificó por el método de combustión en húmedo (Nelson y Somers, 1982).

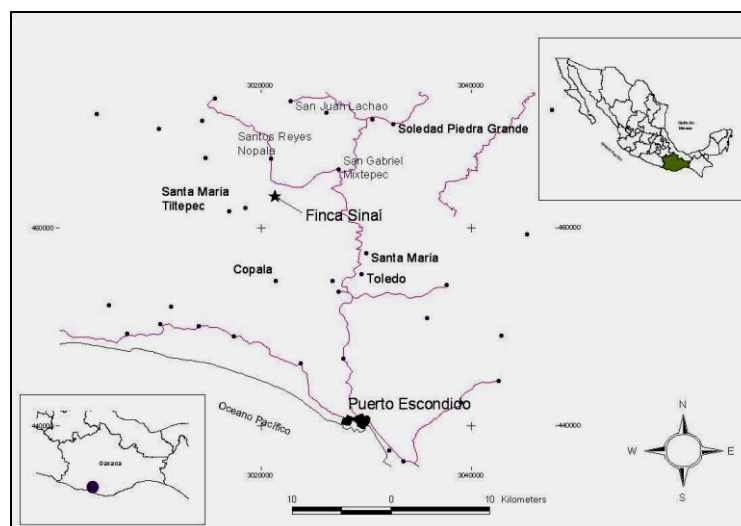


Figura 1. Localización del sitio de estudio en la finca cafetalera “El Sinaí”, Oaxaca, México.

Bajo criterios de representatividad sobre el tipo de suelo y condiciones de uso se seleccionaron 20 muestras de 0-20 cm, las cuales fueron secadas a temperatura ambiente y tamizadas con malla de 2 mm de apertura, posteriormente fueron procesadas para efectuar el fraccionamiento y caracterización química de la MOS. La procedencia de este grupo de muestras correspondió a suelos con las siguientes características: acahuales por más de 50 años (AC), situados a 1150 m y sitios bajo cultivo de café a 990 m (CA1), 1170 m (CA2) y 1225 m (CA3) de altitud.

Fraccionamiento de la materia orgánica del suelo

Se emplearon diferentes procesos para aislar las fracciones de la MOS de acuerdo a Dabin (1971). Se realizó una primera separación física de materia orgánica particulada en función de su densidad, consistente en la adición de 100 mL de H_3PO_4 2M a 10 g de suelo, agitándose mecánicamente durante 5 min y centrifugando; el sobrenadante compuesto de residuos orgánicos particulados se denominó materia orgánica libre (MOL). La solución conteniendo la materia orgánica disuelta se guardó para la valoración de los AF disueltos en H_3PO_4 . El residuo de suelo resultante de la extracción anterior fue sucesivamente tratado con $Na_4P_2O_7$ 0.1 M y NaOH 0.1 M hasta agotamiento de la extracción, a la cual se denominó extracto húmico total (EHT). Se tomaron alícuotas de este extracto y se precipitaron con H_2SO_4 (1:1 v:v) que fueron utilizadas para la determinación cuantitativa de la fracción de AF soluble en ácido y la fracción de AH insoluble en este medio.

El residuo de suelo resultante de las extracciones alcalinas fue sometido a tratamientos sucesivos con

una mezcla de $Na_2S_2O_4$ 60 mM y HCl-HF 1M (1:1), para eliminar los óxidos de Al y Fe y la arcilla. Este tratamiento se repitió tres veces, descartándose el sobrenadante. Finalmente, el residuo de suelo fue tratado con NaOH 0.1 M para extraer la fracción de las huminas que originalmente estaba asociada con la matriz mineral, denominada humina de insolubilización.

A partir del EHT se obtuvo la fracción de los AH ajustando el pH de la solución a 1 con HCl 6 M y centrifugando para recuperar los AHs precipitados, que fueron posteriormente re disueltos en NaOH 0.5 M y centrifugados a 10000 rpm. El residuo con impurezas minerales y orgánicas particuladas fue descartado y el sobrenadante se precipitó con la mezcla de HCl-HF 1M, centrifugado y dializado en bolsas de celofán para remover las sales introducidas durante el proceso de extracción. Los AH fueron desecados a 105 °C y homogeneizados para su caracterización química. La densidad óptica de los AH se midió a partir de una solución con concentración de 0.136 mg C mL⁻¹ en $NaHCO_3$ 0.04 M, determinándose los valores de absorbancia en el rango UV-visible entre los 400 y 800 nm (Kononova, 1982). Los espectros infrarrojos se obtuvieron con un espectrofotómetro Bruker IFS28 de transformada Fourier (FT-IR) y fueron transformados mediante un algoritmo para el aumento de resolución basado en la sustracción digital de un múltiplo positivo de la segunda derivada del espectro original (Rosenfield y Kak, 1982; Almendros y Velasco, 2004)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados sobre algunos parámetros edáficos dentro de la finca cafetalera confirman lo encontrado en estudios previos por García Calderón *et al.* (2006), quienes identificaron patrones de formación altamente complejos que dan lugar a suelos típicamente tropicales en los que se pueden advertir rasgos comunes como son el alto grado de intemperismo, condiciones de fuerte acidez, baja disponibilidad de nutrientes y una dinámica muy intensa en los procesos de reciclado de la MOS (Tabla 1). De forma general, los horizontes superficiales presentan valores de pH ácidos, independientemente del tipo de cobertura vegetal. La CIC es media (180 – 260 mmol c kg⁻¹) y la desbasificación fluctúa de moderada a fuerte conforme se incrementa la altitud, siendo el sitio C2, a 1170 m, el de menor contenido de bases intercambiables, lo que se traduce en una saturación de bases inferior al 50 %. Por otra parte, predominan niveles medios – altos de COT y Nt, siendo la relación C/N en todos los casos menor a 15.

Estos valores son comunes para suelos de bosques tropicales y principalmente se deben al tipo de material parental predominante en la zona (gneises y granitos), pero también a las condiciones bioclimáticas imperantes (temperatura, humedad y acumulación de materia orgánica) (Zech *et al.*, 1997).

Si bien se ha considerado de manera general que el cambio de uso de suelo implica modificaciones en los contenidos de C edáfico, en el caso de los agroecosistemas cafetaleros bajo sombra, los datos

obtenidos en este estudio (Tabla 2) corroboran las evidencias acumuladas para otras regiones cafetaleras de Centroamérica (Fassbender 1993) que apuntan hacia la preservación de los contenidos de C en el suelo cuando estos sistemas productivos coexisten con los reductos de la vegetación original. En tal sentido, la cifra de 150 Mg C ha⁻¹ obtenida para los primeros 40 cm de profundidad son altas si se comparan con suelo de otros sistemas agroforestales, pero ligeramente inferiores a las de algunos ecosistemas tropicales primarios de México (Masera, 1997).

Distribución de las fracciones de la MOS

La distribución de las diferentes fracciones de MOS expresada en g·C kg⁻¹ y como porcentaje sobre el COT se muestra en el Tabla 3 y en la Figura 2, respectivamente. Los datos obtenidos sugieren una rápida transformación de los restos vegetales en todos los sitios y de manera particular en el caso de los suelos con cafetal a 990 y 1225 m (C1 y C3 respectivamente), en los que menos del 2 % permanece en forma de materia orgánica libre (MOL). En consecuencia, más del 30 % del C edáfico está compuesto por sustancias húmicas coloidales (AH + AF). Dentro de este segmento, resalta el hecho de que la fracción de AF solubles en H₃PO₄, presumiblemente la más débilmente fijada a la matriz organomineral del suelo, se presenta en proporciones significativamente mayores para los suelos del sitio C2. Por otra parte, los AF extraídos mediante NaOH representaron entre el 11 y 24 % del COT.

Tabla 1. Características analíticas generales de la capa superficial (0–20 cm) de perfiles representativos de los agroecosistemas cafetalero en la Sierra Sur de Oaxaca, México.

Sitio	PF	Altitud m	pH H ₂ O	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	CIC	SB	Arcilla	C	N	C/N
				mmol _c kg ⁻¹				%	(g · kg ⁻¹)				
Cafetal C1 (Alisol húmico)	LC	990	5,4	71,6	35,8	3,0	17,1	214	59,4	316	33,2	3,7	9,0
Achual AC (Cambisol mólico)	PL	1150	5,3	111,2	9,4	7,3	1,9	226	57,3	76	42,1	3,2	13,4
Cafetal C2 (Umbrisol arénico)	LM	1170	5,7	35,0	8,2	9,5	6,1	178	33,0	84	35,4	3,2	11,1
Cafetal C3 (Alisol arénico)	LC	1225	5,5	59,1	6,8	5,5	0,8	262	27,4	92	52,1	3,5	14,9
Desviación estándar			0,2	31,8	13,9	2,8	7,4	34	16,4	146	8,49	0,2	2,6

PF: Posición del perfil : LC= Ladera cóncava, PL= pie de ladera, LM= ladera media, CIC, capacidad de intercambio catiónico; SB, saturación de bases.

Tabla 2. Valores de pH, densidad aparente, carbono orgánico total y reserva de carbono, para las modalidades de uso de suelo dentro de la finca cafetalera "El Sinafi"

Profundidad	Acahual (1)		Cultivo de café (2)	
	0–20 cm	20–40 cm	0–20 cm	20–40 cm
pH (H ₂ O)	5,33 (0,4)	5,34 (0,4)	5,32 (0,5)	5,33 (0,5)
DA (g·cm ⁻³)	0,91 (0,2)	1,01 (0,1)	0,9 (0,1)	0,98 (0,2)
COT (g · kg ⁻¹)	49,1 (19,0)	32,8 (12)	48,3 (16)	36,7 (14,0)
C Mg ha ⁻¹	87,1 (26,6)	65,28 (21,2)	35,7 (25,6)	68,0 (24,5)

(1) n = 48, (2) n = 83

Los números entre paréntesis corresponden a la desviación estándar

Tabla 3. Contenidos de carbono edáfico en las diferentes fracciones de la materia orgánica de los suelos representativos dentro del agroecosistema cafetalero en la Sierra Sur de Oaxaca, México.

Sitio	MOL	EHT	AF (H ₃ PO ₄)	AF (NaOH)	AH	Huminas	AH/AF
g C · kg ⁻¹							
C1 990 m	0,5	23,6	0,0	5,80	7,9	9,90	1,36
	1,6	40,0	0,2	6,30	7,7	25,80	1,20
	1,1	39,9	2,4	4,4	2,4	30,70	0,36
AC 1150 m	2,0	54,0	1,5	5,00	10,8	36,70	1,67
	2,7	47,3	1,4	6,40	8,5	31,00	1,10
	2,1	50,9	2,6	6,8	11,9	29,60	1,26
C2 1170 m	3,6	57,4	5,5	11,40	10,1	30,40	0,60
	4,2	56,8	4,9	6,30	6,3	39,30	0,45
	4,2	53,8	10,2	10,6	11,8	21,20	0,57
C3 1225 m	0,1	51,9	2,1	7,4	8,1	34,3	0,85
	0,2	60,7	2,0	10,6	15,2	32,9	1,20
	1,9	63,1	1,1	8,2	23,3	30,5	2,48
LSD	1,44	17,64	2,84	2,3	5,20	7,71	0,59

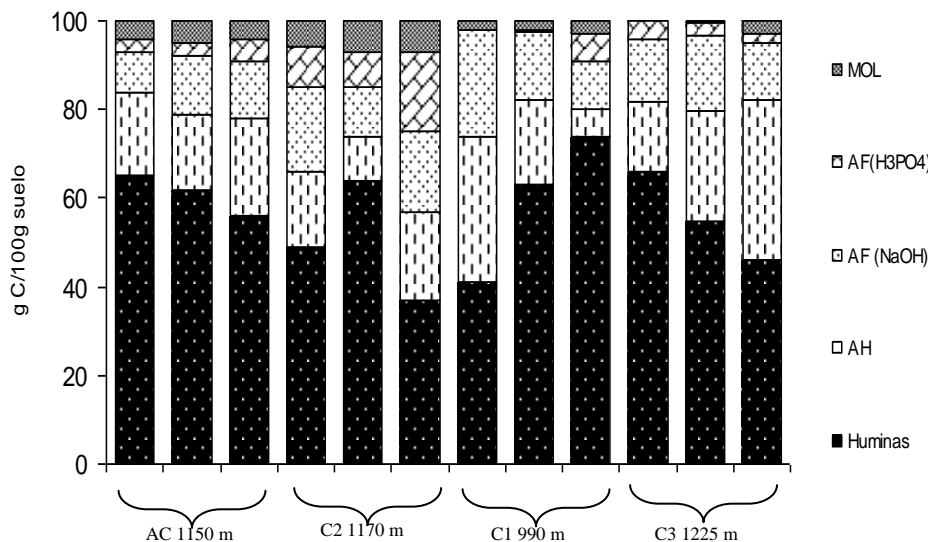


Figura 2. Porcentaje de carbono edáfico contenido en las diferentes fracciones de la materia orgánica del suelo.

La proporción de AH mostró variaciones importantes y en términos generales, fue ligeramente inferior para CA1 (15.6 %). Al considerar estos dos últimos componentes, resalta el hecho de que la relación AH/AF presenta, en promedio, valores ligeramente superiores a 1, con excepción del sitio C2 (0.5) lo que indica una mayor producción de compuestos fúlvicos para este sitio, como podría corresponder a condiciones locales de tropicalidad más acentuadas. Destaca el hecho de que las huminas de insolubilización contribuyen con más del 50 % del COT, independientemente del tipo de uso y posición altitudinal. En su conjunto, estos indicadores permite suponer una relativa homogeneidad sobre los patrones de humificación dentro de la zona, independientemente de la modalidad de uso o tipo de suelo y cuyas excepciones pudieran deberse a condiciones de microclima y de relieve particulares.

Estudios espectroscópicos: espectroscopía UV-visible

A partir de la solución de AH con concentración estándar de 0.136 mg C mL⁻¹ (Kononova 1982) y considerando que en algunas lecturas se rebasaban los límites de absorbancia que cumplen las leyes de Lambert-Beer, se procedió a diluir todas las muestras en una proporción de 1 a 9 con agua destilada, determinándose los valores de absorbancia en el rango visible en longitudes de onda entre los 400 y los 800 nm. Los espectros visibles mostraron extinciones específicas que fluctuaron entre 0,4 y 0,7 (Tabla 4). Estos valores no muestran diferencias significativas entre las unidades muestrales, aunque si presentan una débil correlación positiva con la altitud

($r = 0.43$, $P < 0.05$) lo que indica mayor aromaticidad en los AH de las zonas más altas.

Los rangos para la relación E4/E6 cuyo valor esta inversamente relacionado con el tamaño molecular y la polidispersidad de las sustancias húmicas (Chen *et al.*, 1977), son similares en todas las muestras y no presentan correlación con otras variables. Este cociente, con valores próximos a 5, denota tamaños moleculares moderados o bajos para los AH de todos los sitios. De manera general, los estudios espectroscópicos de los AH sugieren la presencia de moléculas con baja aromaticidad, que puede incrementarse moderadamente a medida que aumenta la altitud. Consideramos que estos niveles de aromaticidad pudieran estar asociados con la baja disponibilidad de arcillas y bases intercambiables en los suelos que, cuando están presentes en mayor cantidad, favorecen la maduración *in situ* de estas moléculas húmicas.

La segunda derivada en los espectros UV-VIS (Tabla 4 y Figura 3), evidenció la presencia de máximos espectroscópicos a 530, 570 y 620 nm. Tales patrones son típicos de los AH de tipo P (Kumada y Hurst, 1967), caracterizados por la presencia de pigmentos fúngicos del tipo dihidroxiperilenquinona (DHPQ) y cuya concentración es indicativa de la contribución de la actividad fúngica en los procesos de formación de AH.

Se detectó la presencia de estos pigmentos en todos los suelos estudiados, con lo cual es posible establecer que una de las rutas de humificación predominante puede ser la acumulación de compuestos húmicos de

neoformación acompañados de metabolitos microbianos, sin embargo, al hacer las comparaciones respectivas, no es clara la relación que tiene esta vía con la maduración de los AH.

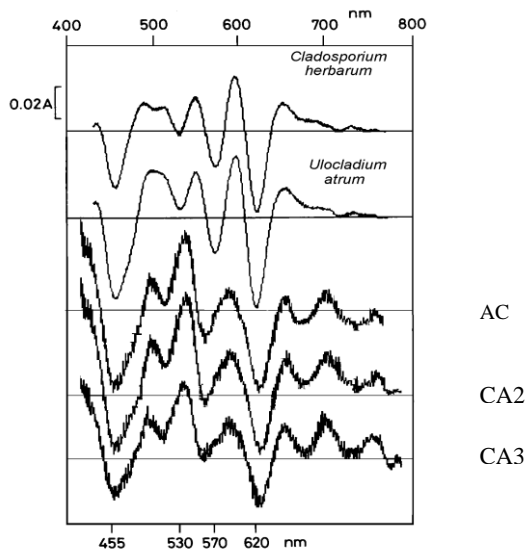


Figura 3. Espectro de la segunda derivada de los AH en los suelos de la finca cafetalera “El Sinaí”, en comparación con melaninas fúngicas de especies productoras de pigmentos de tipo dihidroxiperilenquinona.

Por otra parte, una condición que bien pudiera influir sobre la magnitud con que se manifiesta cada uno de los procesos de humificación dentro de la zona de estudio es el relieve, hasta el punto que los estudios edafológicos realizados para estos suelos de ladera, dan cuenta de la importancia que tiene el desplazamiento y retraslación de materiales sobre la pedogénesis del lugar (García Calderón *et al.* 2006), por lo cual es posible suponer la coexistencia de los diferentes mecanismos de humificación dentro de la zona, pero también cierto desplazamiento de los sustancias húmicas de diferente procedencia a favor de la pendiente.

Espectroscopía infrarroja

Los espectros infrarrojos (Figura 4) mostraron patrones similares en todos los AH estudiados, siendo los picos de las bandas más significativas a

3400, 2920, 1720, 1620 cm^{-1} . Los espectros de resolución aumentada muestran un segundo patrón de bandas (inflexiones en el espectro original) situadas a 1510, 1460, 1270 y 1030 cm^{-1} característicos de unidades constitucionales del esqueleto de las ligninas vegetales (Fengel y Wegener 1984).

A 2920 cm^{-1} es posible advertir la presencia de una banda de moderada intensidad, característica de los grupos CH_3 y CH_2 , cuya intensidad suele considerarse como una referencia de la alifaticidad de la molécula de AH. De acuerdo con ello, el patrón alifático parece correlacionarse negativamente con la altitud. Otra banda característica en estos espectros es la 1510 cm^{-1} indicativa de la aromaticidad de las moléculas de AH, cuya intensidad muestra tendencia contraria a la anterior, y corrobora las evidencias proporcionadas por la espectroscopía visible respecto a la formación de ácidos húmicos más aromáticos en altitudes más elevadas. Finalmente, al comparar los espectros de resolución aumentada, es posible observar que el patrón de ligninas en los AH parece sufrir mayores alteraciones a medida que se incrementa la altitud.

CONCLUSIONES.

En el análisis del contenido y composición de la MOS, y considerando las condiciones biofísicas imperantes así como el tipo de uso es posible establecer las siguientes premisas:

Los procesos de humificación en la zona de estudio están supeditados a las condiciones bioclimáticas y edáficas, más que a las modificaciones en la cobertura vegetal. Dichos procesos favorecen la formación de fracciones húmicas y fúlvicas de baja aromaticidad y complejidad molecular

La aromaticidad en las macromoléculas de AH tiende a incrementarse de manera moderada con la altitud.

Los resultados de este estudio confirman evidencias previas sobre la alta capacidad de estos agroecosistemas para actuar como importantes almacenes de C edáfico.

Finalmente, se proponen como los mecanismos dominantes en la humificación de la MOS la preservación selectiva de formas progresivamente alteradas de ligninas y la acumulación de productos de neoformación.

Tabla 4. Parámetros espectroscópicos de los ácidos húmicos de un agroecosistema cafetalero en la Sierra Sur de Oaxaca.

Sitio	Valores de densidad óptica en el rango visible (unidades de absorción)		Intensidad del valle en la segunda derivada del espectro de (unidades de absorción)	Valores de densidad óptica de las principales bandas (longitud de onda en cm^{-1}) del espectro infrarrojo*		
	E_{465} (E4)	$E_{465/E665}$ (E4/E6)		E_{620}	3400	2920
AC	0,437	5,06	0,093	0,889	1,011	0,667
CA1	0,534	5,30	0,113	1,000	0,729	0,729
CA2	0,520	5,59	0,131	0,840	0,691	0,745
CA3	0,697	4,98	0,112	1,125	0,602	0,682
LSD	0,108	0,27	0,015	0,128	0,176	0,037

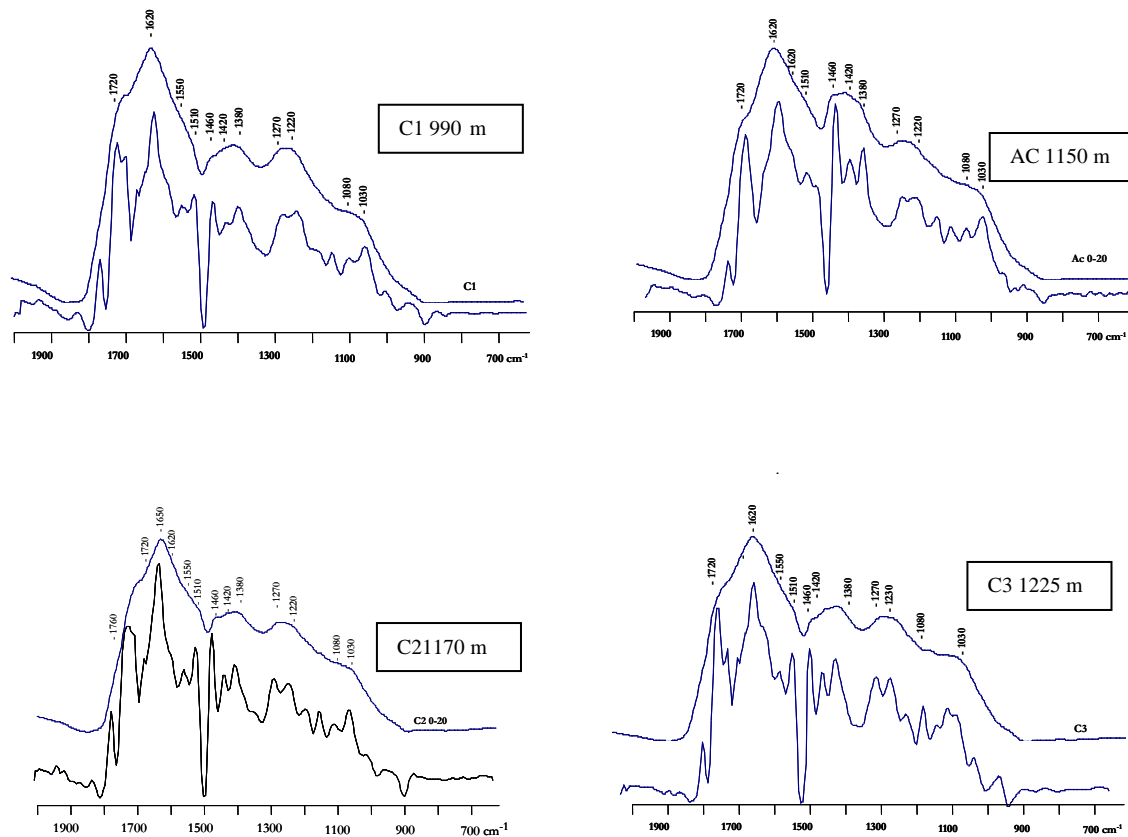


Figura 4. Espectros infrarrojos de resolución aumentada para diferentes sitios de estudio en de la finca cafetalera Sinaí, Estado de Oaxaca.

REFERENCIAS

Almendros, G., Velasco, F. 2004. Influencia de la vegetación en la evolución del humus de las tierras pardas meridionales sobre areniscas

triásicas de la provincia de Guadalajara. *Revue d'Ecologie et de Biologie du Sol.* 21: 515-429.

Chen, Y., Senesi, N. and Schnitzer, M. 1977. Information provided on humic substances

- by E4/E6 ratios. *Soi Science Society of American Journal*. 41:352–358.
- Dabin, B. 1971. Étude d'une méthode d'extraction de la matière humique du sol. *Science du Sol*. 2: 47–63.
- Detwiler, R.P. 1986. Land use change and the global carbon cycle: the role of tropical soils. *Biogeochemistry*. 2. 67–93.
- Fassbender, H.W. 1993. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. 2ª ed. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. CATIE. Turrialba, Costa Rica. pp. 493.
- FAO-ISRIC-ISSS. 1998. World Reference Base for Soil Resources, Soil Resources Report No. 84. Rome, Italy.
- Fengel, D. and Wegener, G. 1984. Wood. Chemistry, Ultrastructure, Reactions. De Gruyter. Berlin. pp. 613.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 5ª ed. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía. México.
- García-Calderón N.E., Ibáñez Huerta, A., Álvarez Arteaga, G., Krasilnikov, P.V. and Hernández Jiménez, A. 2006. Soil diversity and properties in mountainous subtropical areas in Sierra Sur de Oaxaca, México. *Canadian Journal of Soil Science*. 86:61-76.
- García-Calderón, N.E., Ibáñez, A., Fuentes, E., Platero, B., Galicia, M.S., Ramos, R., Mercado, I., Reyes, L., Hernández, A., Trémols, J., 2000, Características de los suelos de un sector de Pluma Hidalgo, Sierra Sur de Oaxaca, México. En: Quintero-Lizaola R., Reyna-Trujillo, T., Corlay-Chee, L., Ibáñez-Huerta, A., García-Calderón, N.E. (eds.), *La Edafología y sus Perspectivas al Siglo XXI: México*, Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de México, Universidad Autónoma Chapingo. pp. 61–67..
- Hernández, J.R., Ortiz, M.A. and Zamorano, J.J. 1996. Regionalización morfoestructural de la Sierra Madre del Sur, México. *Investigaciones Geográficas* 31: 45–67.
- Juo, A.S.R., Ayanlaja, S.A. and Ogunwale, J.A. 1976. An evaluation of cation exchange measurements for soils in the tropics. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 7:751–761.
- Kononova, M. 1982. *Materia orgánica del suelo*. Editorial Oikos-Tau S.A. Barcelona, España.
- Kumada K., Hurst, H.M. 1967. Green humic acids and its possible origin as a fungal metabolite. *Nature*. 214: 631–633.
- Masera, O.R., Ordóñez, M.J. and Dirzo, R. 1997. Carbon emissions from mexican forests: current situation and long-term scenarios. *Climate Change*. 35: 265–295.
- Moguel, P., Toledo, V.M. 1996. El café en México, cultura indígena y sustentabilidad. *Ciencias*. 43: 40–51.
- Moguel, P., Toledo, V.M. 1999. Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conservation Biology*. 13: 11–21.
- Nelson, D.W. and Sommers, L.E. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: A.L. Page, R.H. Miller and D.R. Keeney (Eds). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. Agronomy 9. 2nd ed. ASA, SSSA. Publ., Madison, WI. pp. 539–579.
- Rosenfield, A., Kak, A.C. 1982. Digital picture processing. Vol I. Academic Press. New York.
- Rzedowski, J., Huerta M., L. 1978. *Vegetación de México*. Limusa. México. pp. 432.
- Stevenson, F.J. 1994. *Humus Chemistry*. 2nd. Wiley, New York. pp. 497.
- Tan, K.H. 1996. *Soil sampling, preparation, and analysis*. Dekker, New York, New York, USA.
- Velasco, F., García-Calderón, N., Aguilera, N. 1990. Investigaciones edafológicas sobre la degradación de diversos agrosistemas en Veracruz, México. *Memorias del XI Congreso Latinoamericano y II Congreso Cubano de la Ciencia del Suelo*. La Habana. Cuba.
- Watanabe A., Sarno, J., Rumbanraja, K. and Kimura, M. 2001. Humus composition of soils under forest, coffee and arable cultivation in hilly areas of Routh Sumatra,

- Indonesia. *European Journal of Soil Science*. 52: 599–606.
- Zech W., Senesi, N., Guggenberger, G., Kaiser, K., Lehmann, J., Miano, T.M., Miltner, A., Schroth, G. 1997. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma*. 79: 117–161.

Submitted May 04, 2012– Accepted June 27, 2012
Revised received September 14, 2012