

Terra Latinoamericana

E-ISSN: 2395-8030

terra@correo.chapingo.mx

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

México

Balderas-Plata, Miguel Angel; Gutiérrez-Castorena, Ma. del Carmen; Carrillo-González, Rogelio; Ortiz-Solorio, Carlos A.; Lugo-de la Fuente, Jorge A.

Distribución de elementos traza en los suelos de las microcuenca en Texcoco

Terra Latinoamericana, vol. 24, núm. 4, octubre-diciembre, 2006, pp. 451-461

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

Chapingo, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57324402>

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

DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS TRAZA EN LOS SUELOS DE LAS MICROCUENCAS EN TEXCOCO

Trace Element Distribution in Soils from the Texcoco Micro-Watersheds

Miguel Angel Balderas-Plata^{1‡}, Ma. del Carmen Gutiérrez-Castorena¹, Rogelio Carrillo-González¹, Carlos A. Ortiz-Solorio¹ y Jorge A. Lugo-de la Fuente²

RESUMEN

La contaminación del suelo por elementos traza (ETs) originada por el hombre o por procesos geológicos naturales, que los liberan de las rocas por intemperismo, ha tomado gran relevancia, pues algunos de ellos se consideran tóxicos para los organismos vivos. Estos elementos pueden asociarse con las arcillas y emigrar como partículas compuestas en los sedimentos. El objetivo de este estudio fue determinar la distribución espacial de los ETs (Cd, Cu, Pb y Zn) y su movilidad en suelos arcillosos de origen volcánico en microcuenca de Texcoco, México, a través de la técnica de extracción secuencial. Se encontró que los factores que determinan el comportamiento de los ETs son: pH, composición mineralógica y procesos edáficos. El Cu se asoció, principalmente, con la fracción residual (20 a 50%) y con los óxidos de Fe cristalino (20 a 42%); el Pb se unió con la fracción residual (43 a 72%) y con los óxidos de Mn (15 a 17%); y el Zn, con la fracción residual dominante (89 a 92%), sin importar el origen de la carga de los materiales.

Palabras clave: extracción secuencial, Cd, Cu, Pb, Zn, suelos arcillosos.

SUMMARY

Soil pollution by trace elements (TEs) from human activities and released by rocks through natural weathering is a real concern, because some TEs are toxic to live organisms. Due to the preferential association of the TEs with clays, they could emigrate as soil

particles in loamy silts. The aim of this study was to determine the spatial distribution of the TEs (Cd, Cu, Pb, and Zn) and their mobility in volcanic clay soils from micro-watersheds of Texcoco, Mexico. A sequential extraction methodology was used. Different and independent processes control the behavior of each TE analyzed. pH and the mineralogical composition are the main factors controlling Cu and Pb availability. Cu was mainly associated with the residual fraction (20 50%) and with crystalline Fe oxides (20 42%), while Pb was mainly associated with the residual fraction (43 72%) and with Mn oxides (15 17%). The highest percentage of Zn was related predominantly to the residual fraction (89 92%), regardless of the origin of the material.

Index words: sequential extraction, Cd, Cu, Pb, Zn, clayed soils.

INTRODUCCIÓN

Los elementos traza (ETs) han recibido mucha atención, debido a que se consideran tóxicos para los organismos vivos ya que, al ser bioacumulables y poder integrarse a la red trófica (Kabata-Pendias, 1985; Alloway, 1995a; Seoáñez *et al.*, 1999), su depósito en el suelo y en el agua puede ocasionar contaminación ambiental (Li y Shuman, 1996).

Los sitios contaminados por ETs ligados con las actividades humanas son relativamente fácil de reconocer, pero los asociados a la contaminación de origen natural (material parental e intemperismo) son difícil de identificar (Kabata-Pendias y Pendias, 1985).

Las microcuenca Jalapango y Coatlinchan, localizadas en la zona oriente del estado de México, están formadas por sedimentos aluviales o lacustres que provienen de rocas ígneas (andesitas, riolitas y tobas vítricas o tepetates) (Mooser, 1963; Rodríguez *et al.*, 1999). Estas rocas, por su composición mineralógica, son fácilmente alterables y, de acuerdo con Sposito (1989), pueden liberar ETs como: Cd, Cu, Cr, Co, Ni, Pb o Zn, por intemperismo. Gutiérrez *et al.*

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, estado de México.

[‡] Autor responsable (mplata@colpos.mx)

² Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de México. Instituto Literario 100, 50000 Toluca, estado de México.

Recibido: julio de 2004. Aceptado: agosto de 2006.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 24: 451-461.

(2005) encontraron que en la parte más baja de la cuenca (zona lacustre) se presentan altos porcentajes de materiales amorfos silicios, alta concentración de Cu, Mo y hasta 8% de Pb; además, un alto contenido de sodio soluble e intercambiable, que los hace no aptos para uso agrícola (Gutiérrez y Ortiz, 1999).

Se ha reportado que los ETs se acumulan en los sedimentos arcillosos, debido a su asociación con coloides, lo que significa que pueden emigrar como partículas compuestas, si las condiciones edafológicas lo permiten (Sposito, 1989; Alloway, 1995b; Sañudo-Wilhelmy *et al.*, 2002). En la zona de estudio hay diferentes suelos donde dominan los materiales arcillosos: los producidos *in situ* (Vertisoles), en los lomeríos (Rodríguez *et al.* 1999; Segura, 1999); los aluviales (Entisoles y Vertisoles); las tierras de Barro y los lacustres (Entisoles y Mollisoles) (Gutiérrez y Ortiz, 1999). El hecho de que haya Pb en los sedimentos lacustres implica que los ETs también pueden encontrarse en los planos de inundación, las tierras más productivas del área, y que están ligados con los suelos arcillosos presentes en las diferentes altitudes.

Pueyo *et al.* (2003) reportaron que los ETs pueden estar ligados con diferentes fracciones del suelo, dependiendo de sus condiciones edáficas. Un procedimiento común de separar los ETs en el suelo es a través de la extracción secuencial, mediante el uso de diversos reactivos en solución. La información que se obtiene sirve para entender los procesos de biodisponibilidad, disponibilidad fisicoquímica, retención y movilidad potencial de los ETs en el perfil del suelo, así como para identificar las fracciones a las que se asocian los metales en la fase sólida: soluble, intercambiable, ligados a la materia orgánica (MO) u óxidos y residuales (Shuman, 1979; Sposito *et al.*, 1982; Chen *et al.*, 1996; Li y Shuman, 1996; Eick *et al.*, 1999).

El objetivo de este trabajo fue determinar la distribución espacial de los ETs (Cd, Cu, Pb y Zn) y su movilidad, relacionada con las propiedades y procesos edáficos, en suelos arcillosos de origen volcánico, basado en la técnica de extracción secuencial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron seis suelos arcillosos de dos microcuencas: Coatlinchan (Mcoa1) y Jalapango (Mja2), del municipio de Texcoco, estado de México, con diferente material parental (tobas, riolitas y andesitas). Estas microcuencas se localizan entre 19° 25' y 19° 35'N, y 98° 40' y 99° 00' (Figura 1). El clima es templado frío, en la zona más alta, hasta templado semi seco, en la más baja, con lluvias en verano (INEGI, 2001a); la temperatura media anual es de 16 °C y la precipitación anual entre 600 y 800 mm (INEGI, 2001b).

Dos suelos estudiados, La Mesa (LM1) y Cerro Purificación (CP2), son áreas con poca perturbación humana, con bosque de pino-encino y matorral, respectivamente; tres, San Camilo (SC1), La Presa (LP1) y La Purificación (P2) son sitios de actividad agrícola, donde se cultiva trigo y maíz; y uno, Montecillo (M1) no es agrícola y es altamente salino sódico.

Se realizaron pozos pedológicos y se colectaron muestras de suelos, a intervalos de 10 a 15 cm, desde la superficie, hasta 100 a 150 cm de profundidad. Los análisis físicos y químicos de laboratorio, para clasificar y caracterizar al suelo, y relacionarlo con los ETs (pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), MO y distribución de partículas), se basaron en el Manual de Van Reeuwijk (ISRIC, 1995).

La extracción de ETs se realizó por digestión en horno de microondas CEM- MARS 5; se utilizaron 10 mL de HNO₃, por 20 min, a 180 °C y

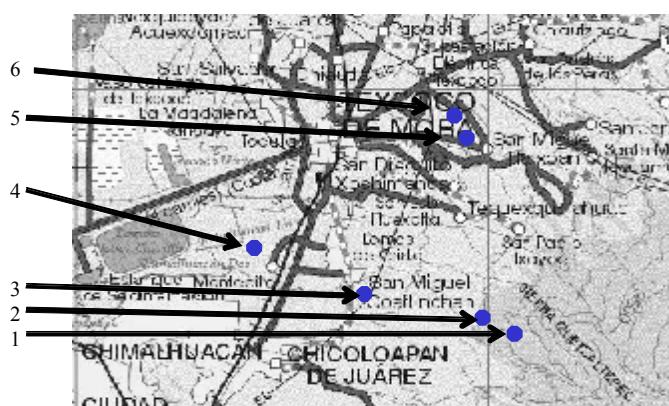


Figura 1. Localización de los sitios de estudio.

Microcuenca Coatlinchan	Altitud (m)
1. La Mesa (LM1)	2602
2. San Camilo (SC1)	2550
3. La Presa (LP1)	2285
4. Montecillo (M1)	2250
Microcuenca Jalapango	
5. Cerro Purificación (CP2)	2370
6. La Purificación (P2)	2270

Cuadro 1. Procedimiento de extracción secuencial para elementos traza (ETs).

Fracción	Solución	Suelo	Volumen	Tiempo	Condiciones	
					g	mL
Intercambiable (F1)	1 M Mg(NO ₃) ₂ (pH 7)	5	20	2 h	Agitación a 150 opm	
Orgánica (F2)	0.7 M NaOCl (pH 8.5)	5	10	30 min	Baño María 30 min, agitación ocasional (dos extracciones)	
Óxido de Mn (F3)	0.1 M NH ₂ OH·HCl (pH 2) 0.2 M (NH ₄)C ₂ O ₄ ⁻	5	30	30 min	Agitación a 150 opm	
Óxido de Fe amorfo (F4)	0.2 M H ₂ C ₂ O ₄ (pH 3)	5	30	4 h	Agitación a 150 opm	
Óxido de Fe cristalino (F5)	Solución F4 + 0.2 M ácido ascórbico	5	30	30 min	Baño María 30 min, agitación ocasional	
Residual (F6)					F6 = [MT] - Σ(F1 + ... + F5)	

Fuente: Li y Shuman (1996). [MT]: concentración total del metal. Nota: Cada extracción se centrifugó a 2564.44 g durante 15 min, separando posteriormente el sobrenadante.

350 PSI (Ure, 1995). Las metodologías para el fraccionamiento secuencial para ETs se reportan en el Cuadro 1. Los extractos se centrifugaron a 2564.4 g y después se filtraron. La cuantificación del Cd, Cu, Pb y Zn, en cada una de las fracciones, se realizó por absorción atómica, con un equipo Perkin-Elmer 3110.

Los análisis físicos y químicos, incluyendo la extracción de ETs, se realizaron por duplicado; el resultado reportado representa su promedio. Para la validación de los resultados obtenidos por absorción atómica, se consideró el límite de detección (LD) y de cuantificación, calculado con la desviación estándar (3σ) de por lo menos 10 veces la lectura de concentración de la muestra blanco, la cual fue diferente por cada solución extractora (American Public Health Association, 1992). Se calculó el coeficiente de correlación entre las propiedades del suelo y el contenido de ETs, en cada fracción. La clasificación de los suelos se realizó utilizando el Soil Survey Staff (2003).

La fracción arcillosa se determinó con un difractómetro de rayos X, en muestras en suspensión a las que se les eliminó previamente la MO, con H₂O₂ a 30%. Las mediciones se realizaron por la técnica de barrido, a una velocidad de 4° min⁻¹, de 2° a 60° 20.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Clasificación de Suelos

El Cuadro 2 reporta la clasificación de los suelos estudiados, el origen del material parental, el proceso edáfico que lo caracteriza y la altitud. En conjunto, éstos demuestran que cada sitio es diferente, aun cuando puedan tener el mismo origen geológico.

Variables Edáficas

Tal como se apreció en campo y con los resultados de los análisis de laboratorio, los seis sitios son suelos arcillosos, pero difieren en sus procesos y naturaleza (Cuadro 3). La textura arcillosa dominó a lo largo del perfil en la mayoría de los sitios, excepto en el Alfisol y Molisol, que ocurrió sólo en horizontes subsuperficiales. El pH presentó dos comportamientos: 1) descenso de la concentración de H⁺ con la altitud; acidez (4.4) en la zona alta con bosque (Inceptisol); y alcalinidad (10) en la zona baja lacustre (Molisol); y 2) disminución regular con la profundidad del suelo; de ligeramente ácidos a alcalinos; todas las capas de los suelos son

Cuadro 2. Clasificación, origen y proceso principal de los suelos de la *Mcoa1* y *Mjal2*.

Suelo	Andic Dystruptepts (LMI)	Vertic Haplustalfs (SC1)	Typic Ustifluvents (LPI)	Fluvaquentic Endoaquolls (MI)	Lithic Haplustepts (CP2)	Mollie Ustifluvents (P2)
Origen	Coluvial	<i>In situ</i>	Sedimentación aluvial	Sedimentación lacustre	<i>In situ</i>	Sedimentación aluvial
Proceso	Lixiviación, con características ándicas	Vertización e iluviaión	Sedimentación	Melanización y alcalinización	Lixiviación	Sedimentación
Altitud (m)	2602	2550	2285	2250	2370	2270

Cuadro 3. Propiedades físicas y químicas de los suelos en función de la profundidad.

Profundidad del suelo cm	pH	MO	CIC cmol _c kg ⁻¹	Arena	Limo	Arcilla	Textura	Profundidad del suelo cm	pH	MO	CIC cmol _c kg ⁻¹	Arena	Limo	Arcilla	Textura	
	%	- - - - -	%	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -		%	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	
La Mesa (LM1)																
0-10	4.6	8.00	60.2	39.3	27.0	33.7	Fr-Ar	0-15	6.9	3.83	27.5	5.2	50.2	44.6	Ar-L	
10-20	4.4	2.02	23.2	38.0	19.7	42.3	Ar	15-30	7.0	3.55	108.8	4.3	49.3	46.5	Ar-L	
20-30	5.0	1.88	72.7	32.4	21.6	45.9	Ar	30-45	7.0	2.44	106.9	2.1	44.8	53.0	Ar-L	
30-40	5.2	0.70	90.7	30.5	18.7	50.9	Ar	45-60	7.0	2.57	32.3	2.3	13.1	84.6	Ar	
40-50	5.4	0.56	91.1	29.2	23.6	47.2	Ar	60-75	6.9	1.74	31.9	1.3	54.1	44.6	Ar-L	
50-60	5.3	0.49	86.3	29.7	26.0	44.2	Ar	75-90	6.8	1.60	28.1	1.1	40.7	58.1	Ar-L	
60-70	5.4	0.77	86.1	33.4	22.3	44.3	Ar	90-105	6.5	1.39	32.7	1.4	42.6	56.0	Ar-L	
70-80	5.5	0.97	81.6	31.4	22.9	45.7	Ar	105-120	6.5	2.44	35.2	1.7	29.6	68.8	Fr-Ar-L	
80-90	5.6	0.84	16.7	30.9	22.1	47.0	Ar									
San Camilo (SC1)																
0-10	6.4	1.48	18.9	62.9	27.0	10.1	Fr-A	0-10	9.5	3.97	43.6	26.8	25.5	47.7	Ar	
10-20	6.1	1.48	18.9	61.6	22.3	16.1	Fr-A	10-20	9.9	3.97	43.6	24.1	15.0	60.9	Ar	
20-30	6.1	1.48	18.9	50.6	26.1	23.3	Fr-Ar-A	20-30	10.4	5.38	41.2	78.7	7.1	14.3	Fr-A	
30-40	6.0	1.03	17.0	18.0	27.2	54.8	Ar	30-40	10.3	5.38	41.2	81.3	10.9	7.9	A-Fr	
40-50	6.0	1.03	17.0	14.1	20.2	65.7	Ar	40-50	10.3	1.40	7.0	77.6	5.6	16.8	Fr-A	
50-60	5.9	1.03	17.0	14.5	16.6	68.9	Ar	50-60	10.3	1.40	7.0	77.7	11.2	11.2	FR-A	
60-70	5.9	0.79	33.5	16.3	21.0	62.7	Ar	60-70	10.6	1.40	7.0	35.2	20.7	44.0	Fr	
70-80	6.2	0.79	33.5	27.3	40.7	32.0	Fr-Ar	70-80	10.5	1.04	7.0	7.1	28.3	64.6	Ar	
80-90	7.0	0.79	33.5	65.6	23.2	11.3	Fr-A	80-90	10.4	2.56	59.1	2.7	31.6	65.7	Ar	
90-100	7.1	0.12	33.8	71.4	15.8	12.8	Fr-A	90-100	10.1	2.56	59.1	3.8	33.8	62.5	Ar	
								100-110	10.1	2.56	59.1	4.0	40.4	55.6	Ar-L	
								110-120	10.2	2.56	59.1	2.9	41.6	55.5	Ar-L	
								120-130	10.3	2.56	57.1	3.4	48.3	48.3	Ar-L	
								130-140	10.3	0.50	55.1	7.5	39.6	52.9	Ar	
								140-150	10.3	0.50	55.1	3.5	42.9	53.6	Ar-L	
Cerro La Purificación (CP2)																
0-10	6.0	5.22	73.92	36.4	13.8	49.8	Ar	0-10	6.4	1.53	26.7	15.9	22.5	61.6	Ar	
10-20	6.0	3.98	66.25	37.4	15.0	47.5	Ar	10-20	6.1	1.53	34.5	13.7	24.4	61.9	Ar	
20-30	6.0	1.70	85.15	36.0	12.2	51.8	Ar	20-30	6.2	1.53	34.5	11.9	24.1	63.9	Ar	
30-40	6.0	2.74	79.92	28.4	12.8	58.8	Ar	30-40	6.3	1.60	33.7	3.4	33.8	62.8	Ar	
40-50	6.1	2.48	67.83	21.8	18.4	59.9	Ar	40-50	6.4	1.68	36.0	5.4	31.6	63.0	Ar	
50-60	6.5	2.67	85.78	14.5	7.3	78.2	Ar	50-60	6.6	1.68	33.0	8.9	32.0	59.1	Ar	
60-70	7.0	2.61	80.53	12.7	9.4	77.8	Ar	60-70	6.6	0.63	36.0	8.7	22.0	69.3	Ar	
70-80	7.2	1.17	69.30	12.1	11.9	76.0	Ar	70-80	6.5	0.63	36.0	7.6	25.2	67.3	Ar	
80-90	7.5	1.17	76.44	11.7	9.5	78.7	Ar	80-90	6.4	0.63	36.0	7.2	33.6	59.2	Ar	
90-100	7.8	1.96	82.84	9.9	7.0	83.1	Ar	90-100	6.4	0.63	39.4	5.2	47.4	47.4	Ar-L	

MO: materia orgánica; CIC: capacidad de intercambio catiónico; Ar: arcilloso; Fr-Ar: franco arcilloso; Fr-A: franco arenoso; Ar-L: arcillo limoso; Fr-Ar-A: franco arcillo arenoso.

estadísticamente diferentes (confiabilidad 0.05) (Figura 2b), aun las agrupadas con similar acidez (Figura 2a) (Millar *et al.*, 1958).

Estos cambios en el pH están relacionados con el tipo de vegetación forestal y pastizal (Alloway, 1995b), el tipo de sedimentación (coluvial, aluvial y lacustre) lacustre (Soil Survey Staff, 2003), incremento de bases con la profundidad en suelo *in situ* y climas templados y húmedos (Alloway, 1995b), y acumulación de sales por alcalinización (Pape y Lagger, 1994).

Elementos Traza

Los contenidos de Cu, Pb y Zn de los sitios estudiados se encuentran dentro del intervalo normal de concentración del suelo (Cuadro 4), de acuerdo con

Kabata-Pendias y Pendias (1985) y Bohn *et al.* (1993), inclusive no se detectan, como el Cd (Cuadro 4), a pesar de provenir de materiales volcánicos en los cuales dominan minerales ferromagnesianos (Mooser, 1963; Rodríguez *et al.*, 1999) que deben presentar importantes cantidades de ETs (Sposito, 1989). Sin embargo, se obtuvo información relevante sobre su comportamiento en cuanto al fenómeno de sorción selectiva con algunos componentes del suelo, estos mecanismos determinan su movilidad en la cuenca (Cuadro 5).

Cobre. Este elemento tiene un comportamiento homogéneo en los perfiles con ligeras variaciones; aunque puede concentrarse en algunas capas subsuperficiales en los sedimentos lacustres y en condiciones de reducción. Gutiérrez *et al.* (2005) reportaron que el Cu imparte un color rojizo a

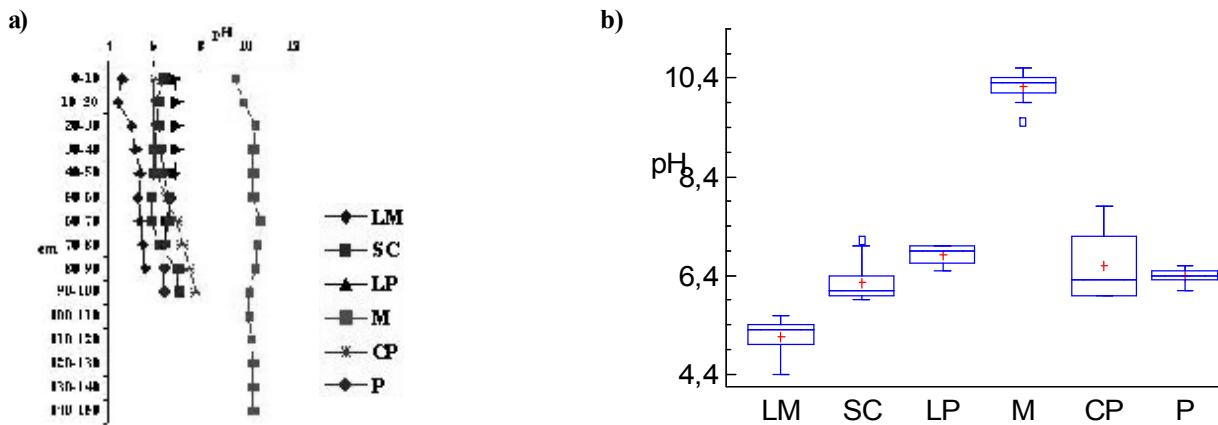


Figura 2. a) Comportamiento del pH en los perfiles de suelo; b) comparación de media de los pH entre los perfiles de suelo. LM: La Mesa; SC: San Camilo; LP: La Presa; M: Montecillo; CP: Cerro Purificación; P: La Purificación.

estos sedimentos, en condiciones reductoras, aun en concentraciones bajas; ésta es una forma indirecta de detectar su presencia.

En la MCoa1, el Cu, en el Inceptisol, está dominanteamente asociado con los óxidos cristalinos de Fe (42%), fracción intercambiable (31%) y residual (20%), resultados que concuerdan con Navarro (2000). De acuerdo con Rodríguez *et al.* (1999), los primeros productos de intemperismo del vidrio volcánico y los feldespatos de la MCoa1 son los óxidos de Fe, por lo que es probable que el Cu liberado durante este proceso sea inmediatamente quimiosorbido u ocluido, como lo mencionaron Baker y Senft (1995). Cuando se incrementa el pH, con la profundidad del suelo, las formas de Cu son más estables y eso justifica su incremento en la fracción residual.

Conforme desciende la altitud, en el Alfisol, el Cu se asocia homogéneamente en las distintas fracciones, aunque no se detectó en la fracción de óxidos de Mn (F3) (Cuadro 6). Al llegar a la zona aluvial (Entisol, LP) y lacustre (Mollisol, M), se incrementó su asociación con la fracción residual (de 50 a 56%) y disminuyó en los óxidos de Fe cristalino y amorfo, mientras que la intercambiable se mantuvo constante.

Cuadro 4. Valores típicos e intervalos de elementos traza (ETs) en suelo.

Elemento	Valor típico	Intervalo
- - - - - $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ - - - - -		
Cd	0.06 [†]	0.01 - 7 [‡]
Cu	20.0 [†]	2 - 100 [‡]
Pb	10.0 [‡]	2 - 200 [‡]
Zn	50.0 [†]	10 - 300 [‡]

[†] Kabata-Pendias y Pendias (1985); [‡] Bohn *et al.* (1993).

Estos resultados son contradictorios, ya que McBride (1994) y Navarro (2000) señalaron que la adsorción del Cu por los óxidos de Fe cristalinos se favorece por el incremento en la alcalinidad del suelo. El Cu está emigrando con la fracción residual, es decir, en los sedimentos que están compuestos por limos y coloides minerales, aunque no se descarta su acumulación por el escurrimiento superficial del agua (Birkeland, 1984).

La fracción residual de los suelos estudiados difiere en su composición mineralógica (Cuadro 6). En la parte más alta de la cuenca (Inceptisol) se identificaron esmectitas y, en la zona lacustre (Mollisol), principalmente arcillas amorfas (sílice opalino), esmectitas, metahaloisita y haloisita; todos estos minerales tienen una alta capacidad de retención iónica y el Cu puede ser uno de ellos.

En el caso de intercambio del Cu entre las fracciones del suelo, el pH, el contenido de carbono orgánico y, en menor importancia, la CIC del suelo son los factores responsables (Kabata-Pendias y Pendias, 1985; McBride, 1994); sin embargo, la proporción de Cu intercambiable varió poco a lo largo del transecto muestreado.

Al correlacionar el contenido de Cu en la fracción de los óxidos de Fe cristalino con las propiedades del suelo en el Inceptisol, se encontró que hay una correlación positiva con el pH ($r = 0.94$), pero negativa con el contenido de arena ($r = -0.91$) y MO ($r = -0.95$). Estas relaciones están en función de la carga variable, tanto de los óxidos, como de la MO; ambos con pH ácidos se hacen más negativos y atraen mayor cantidad de Cu^{2+} , lo cual también implica una competencia entre ellos por este elemento. Lindsay (1979) mencionó que con pH alcalino puede formarse CuOH^- , el cual es insoluble;

Cuadro 5. Contenidos totales de Cu, Pb y Zn en los perfiles

Microcuenca Coatlinchan (MCoa1)							Microcuenca Jalapango (MJal2)				
Profundidad del suelo	Cu	Pb	Zn	Profundidad del suelo	Cu	Pb	Zn	Profundidad del suelo	Cu	Pb	Zn
cm	μg·g⁻¹			cm	μg·g⁻¹			cm	μg·g⁻¹		
La Mesa											
0-10	2.85	7.95	78.05	0-10	7.60	2.60	31.90	0-10	8.35	5.55	54.60
10-20	2.20	4.70	52.55	10-20	7.05	2.35	25.40	10-20	7.85	5.20	47.00
20-30	3.60	4.20	55.00	20-30	7.80	2.60	27.85	20-30	8.25	4.80	47.80
30-40	4.40	4.15	57.30	30-40	12.75	2.25	58.35	30-40	7.55	4.10	46.60
40-50	4.55	2.95	57.45	40-50	14.45	2.60	63.10	40-50	8.60	5.30	57.30
50-60	3.35	3.20	58.80	50-60	13.45	3.35	62.00	50-60	10.10	3.95	62.65
60-70	3.85	3.25	53.55	60-70	13.00	3.60	62.35	60-70	11.20	3.30	64.65
70-80	3.00	3.35	56.60	70-80	10.60	2.95	55.95	70-80	8.30	3.35	65.30
80-90	3.40	3.45	54.60	80-90	11.70	3.50	63.15	80-90	9.10	4.25	68.35
				90-100	11.75	2.80	59.60	90-100	9.50	3.30	71.00
Presa Coatlinchan											
				Montecillo				Purificación			
0-15	8.35	3.45	79.60	0-10	10.65	6.35	55.35	0-10	9.90	2.90	55.20
15-30	8.90	5.70	77.10	10-20	11.35	6.85	47.75	10-20	9.15	3.70	54.30
30-45	6.40	6.90	63.35	20-30	5.55	3.40	27.65	20-30	9.80	3.35	53.25
45-60	7.10	4.75	60.85	30-40	5.20	3.20	15.10	30-40	11.40	2.65	58.30
60-75	7.20	7.80	61.15	40-50	5.00	2.50	16.05	40-50	10.80	2.80	49.35
75-90	7.00	5.90	62.40	50-60	6.80	3.85	20.35	50-60	10.50	2.10	50.55
90-105	7.70	4.00	61.40	60-70	13.30	3.40	29.00	60-70	10.30	2.05	35.15
105-120	8.15	5.30	71.30	70-80	16.03	4.15	41.50	70-80	10.50	3.10	56.25
				80-90	17.95	5.40	33.25	80-90	12.00	2.45	54.55
				90-100	10.85	5.30	31.30	90-100	13.30	2.30	54.10
				100-110	3.85	4.95	29.25				
				110-120	5.55	5.50	30.10				
				120-130	4.95	4.40	23.55				
				130-140	4.20	5.25	24.60				
				140-150	4.65	5.00	23.20				

esto puede ser una explicación de porqué el Cu disminuyó en su asociación con los óxidos.

En el Alfisol, hay una correlación positiva con MO, pero sólo en la fracción intercambiable ($r = 0.71$); en el Entisol, el contenido de Cu tiene correlación negativa con el porcentaje de arena ($r = -0.81$) y con MO ($r = -0.75$), y, en la fracción orgánica, se encontraron correlaciones positivas con pH ($r = 0.72$) y con MO ($r = 0.87$); en el Molisol, hubo correlación positiva entre la fracción intercambiable con el porcentaje de limo ($r = 0.82$) y relaciones negativa con la materia orgánica ($r = -0.82$), el porcentaje de arena ($r = -0.76$) y con los óxidos de Fe amorfos ($r = -0.80$) (Cuadro 7).

En la Microcuenca (MJal2), el Cu presentó un comportamiento diferente, dependiendo de su posición en el paisaje: se asoció con la fracción arcillosa (fracción residual, 35%) en la parte más alta, y con los óxidos de Fe amorfos (47%) en los sedimentos arcillosos. En las fracciones intercambiable, la orgánica y la de óxidos de Fe cristalino, se observaron concentraciones parecidas (Cuadro 5).

En cuanto a las correlaciones, en el Inceptisol, el Cu asociado a los óxidos de Fe cristalino correlacionó positivamente con pH ($r = 0.89$) y con el porcentaje de arcilla ($r = 0.97$) y negativamente con el porcentaje de

arena ($r = -0.98$) y con MO ($r = -0.72$). En el Entisol, el Cu de la fracción intercambiable y el asociado a los óxidos de Fe amorfos correlacionó positivamente con la CIC, ($r = 0.76$) y ($r = 0.75$), respectivamente, mientras que el Cu asociado a la fracción de Fe cristalino correlacionó positivamente con el pH ($r = 0.91$) (Cuadro 7). Fassbender (1975) y Seoánez (1999) señalaron que la CIC es la responsable de controlar la cantidad de Cu presente en la fase intercambiable y la asociada con óxidos de Fe amorfos, debido a que es quimioadsorbido en la superficie, y a la formación de cargas negativas en los óxidos a pH superiores al punto de carga cero.

Pb. La concentración de este elemento fue relativamente homogénea en casi todos los perfiles, con excepción del Entisol de la MCoa1, donde hubo distribución irregular en el perfil (Cuadro 5).

En cuanto a los mecanismos de sorción, se encontró que en la microcuenca MCoa1, el Pb está principalmente asociado con la fracción residual (F6), con los óxidos de Mn (F3) y la fracción intercambiable (F1), aunque con un comportamiento inversamente proporcional a la pendiente; es decir, disminución de la concentración del Pb en la F6 del Inceptisol al Molisol (de 72 a 20%) e incremento en las fracciones F3 y F1 (de 10 a 49% y de

Cuadro 6. Porcentaje de Cu, Pb, Zn en las diferentes fracciones, arcilla, pH y principales minerales en los perfiles de suelos.

		% Metal en la fracción del suelo			% Arcilla en el perfil del suelo	Principales minerales en la fracción arcillosa (DRX)	pH (promedio)
		Cu	Pb	Zn			
Microcuenca Coatlinchan (MCoa1)							
Inceptisol (La Mesa)	Residual	20	72	89	44.6	Esmectitas Metahalolita	5.1 (Fuertemente ácido) [†]
	Óxidos de Fe Cristalino	42	18	5			
	Óxidos de Fe amorfos	4	ND	4			
	Óxidos de Mn	ND	10	<2			
	Orgánica	ND	ND	<0.5			
Alfisol (San Camilo)	Intercambiable	31	ND	<0.5	35.8	Esmectitas Metahalolita Vermiculita	6.3 (Ligeramente ácido) [†]
	Residual	25	43	92			
	Óxidos de Fe Cristalino	24	34	4			
	Óxidos de Fe amorfos	22	3	2			
	Óxidos de Mn	ND	15	<1			
Entisol (La Presa)	Orgánica	9	ND	<1	57	Esmectitas Metahalolita	6.8 (Neutro) [†]
	Intercambiable	20	5	<1			
	Residual	50	54	90			
	Óxidos de Fe Cristalino	20	10	2			
	Óxidos de Fe amorfos	7	ND	6			
Molisol (Montecillo)	Óxidos de Mn	ND	17	<1	44.1	Esmectitas Metahalolita Halloysita Amorfos de Si	10.2 (Extremadamente alcalino) [†]
	Orgánica	2	ND	<1			
	Intercambiable	21	19	<1			
	Residual	56	20	89			
	Óxidos de Fe Cristalino	9	4	1			
Microcuenca Jalapango (Mjal2)							
Inceptisol (Cerro Purificación)	Óxidos de Fe amorfos	12	14	2	66.2	Esmectitas Metahalolita Vermiculita Halloysita Hematita	6.6 (Ligeramente ácido) [†]
	Óxidos de Mn	ND	25	1			
	Orgánica	7	ND	ND			
	Intercambiable	23	8	1			
	Residual	6	20	90			
Entisol (La Purificación)	Óxidos de Fe Cristalino	18	44	6	59.1	Esmectitas Metahalolita Vermiculita Hematita	6.4 (Ligeramente ácido) [†]
	Óxidos de Fe amorfos	47	ND	3			
	Óxidos de Mn	ND	30	<1			
	Orgánica	8	ND	ND			
	Intercambiable	21	6	<1			

ND: no detectado; [†] Millar *et al.* (1958).

0 a 27%, respectivamente). Liu *et al.* (2002) señalan que la asociación del Pb con los óxidos de Mn se debe a que los ETS se precipitan (Cuadro 6).

Como se mencionó anteriormente, la composición mineralogía varía con la pendiente, el tipo de suelo y el pH. El cambio de pH, de ácido a fuertemente alcalino, con la pendiente (Cuadro 6), implica que algunos minerales son de nueva formación, como las arcillas amorfas y la holloysita, lo cual genera posibilidades para la difusión de los elementos en los cristales más estables. Por ejemplo, el ion Pb²⁺, en condiciones de alcalinidad puede oxidarse cambiando de Pb²⁺ a Pb⁴⁺, esto facilita

su porción y oclusión dentro de nódulos de óxidos y concreciones de Mn (Kabata-Pendias y Pendias, 1985; McBride, 1994; Davies, 1995; Liu *et al.*, 2002).

El resto de la fracción arcillosa no parece tomar gran importancia, ya que, de acuerdo con Lindsay (1979), a pH mayores de 7.5, las formas que controlan su solubilidad en el suelo son los carbonatos e hidróxidos o fosfatos, los cuales no se detectaron o identificaron.

En lo que respecta a las otras fracciones, se encontró que las correlaciones tienen un comportamiento irregular, dependiendo del sitio y de las propiedades del suelo; por ejemplo, en el Inceptisol, el contenido de Pb asociado

Cuadro 7. Correlaciones múltiples entre las propiedades físicas-químicas y las concentraciones de Cu, Pb y Zn en las diferentes fracciones de los perfiles de suelos

	pH	M.O	CIC	Arena	Arcilla		pH	M.O	CIC	Arena	Limo	Arcilla
Micocuenca Coatlinchan												
Inceptisol (LM1)												
CuF5	0.94	-0.78		-0.91			CuF1		-0.75		-0.82	
PbF6	-0.7	0.96		0.74	-0.82		CuF2	0.71	0.87		0.86	
ZnF1	0.72	0.7			-0.77		ZnF4		0.87		0.95	
Alfisol (SC1)												
CuF1		0.72					CuF1				-0.76	0.82
PbF3			0.81				CuF4		-0.71		-0.8	
PbF5			-0.73				PbF3			0.74	-0.84	0.77
ZnF1				-0.73	0.73		ZnF4					0.79
ZnF4				0.81	-0.84							
Micocuenca Jalapango												
Inceptisol (CP2)												
CuF5	0.88	-0.72		-0.97	0.97		CuF1		0.75			
PbF1			-0.75				CuF4		0.75			
PbF3	-0.8			0.71			CuF5	0.91				
ZnF3		0.71		0.88	0.83		PbF3		0.82			
ZnF4		0.84		0.76	-0.71		ZnF1				-0.71	
ZnF5	-0.79	0.74		0.86	-0.87		ZnF3		-0.94			
ZnF6	0.92			-0.94	0.94							

Nota: Los coeficientes de correlación presentan en todos los casos una probabilidad < 0.05.

con la fracción residual mostró una correlación positiva con el porcentaje de arena ($r = 0.74$) y con la MO ($r = 0.96$) y negativas con el porcentaje de arcilla ($r = -0.82$) y pH ($r = -0.70$). En el Alfisol, el contenido de Pb asociado a los óxidos de Mn correlacionó positivamente ($r = 0.82$) y el contenido de Pb unido a los óxidos de Fe cristalinos negativamente ($r = -0.73$) con la CIC; en el Entisol no se encontraron correlaciones y, en el Molisol, el Pb de la fracción asociada con los óxidos de Mn correlacionó positivamente con el porcentaje de arcilla ($r = 0.80$), el porcentaje de limo ($r = 0.77$) y con la CIC ($r = 0.74$), por el contrario se relacionó negativamente con el porcentaje de arena ($r = -0.84$) (Cuadro 7). Las diferencias en las correlaciones para una misma fracción y propiedad del suelo (por ejemplo, entre la CIC del Alfisol y Molisol) puede ser resultado de la naturaleza arcillosa y de la carga del suelo (variable o permanente), donde los proceso de sorción pueden ser dependientes del pH del suelo.

En la microcuenca Mjal2, el Pb está asociado con las fracciones de óxidos de Fe cristalino, con la de óxidos de Mn, intercambiable y residual. Conforme desciende la altitud, desde el Inceptisol al Entisol, estas asociaciones variaron de manera inversa proporcional a la pendiente y la ubicación del sitio, las fracciones de los óxidos de Mn y Fe se incrementaron (de 25 a 30% y de 31 a 44%, respectivamente), mientras que las fracciones residual e intercambiable disminuyeron (de 22 a 20% y de 8 a 6%, respectivamente) (Cuadro 5). Aun cuando

el ambiente edáfico no es tan contrastante como en la *MCoal*, este elemento tiene el mismo comportamiento. De la misma manera que en *MCoal*, las correlaciones de las otras fracciones tuvieron un comportamiento irregular (Cuadro 7). Por ejemplo, en el Inceptisol, el Pb intercambiable presentó correlación negativa con la CIC ($r = -0.75$) y el Pb asociado con los óxidos de Mn con el pH ($r = -0.81$) y, en el Entisol (zona de acumulación), el Pb de la fracción de óxidos de Mn correlacionó positivamente con la CIC ($r = 0.82$). Kabata-Pendias y Pendias (1985) y McBride (1994) señalan que los óxidos son los que contribuyen, de manera considerable, a la CIC, al contener al Pb en sus sitios de intercambio. Además, a pH ligeramente ácido, como es el de este sitio, la CIC tiene importancia en la retención de los elementos traza. Al respecto, Davies (1995) señala que el pH y la CIC son las principales propiedades del suelo involucradas en la inmovilización del Pb en el suelo.

Zinc. En la mayoría de los perfiles, se presentó un comportamiento homogéneo del Zn, con ligeras variaciones. Sólo en el Molisol su distribución fue irregular. En el Alfisol, el suelo se formó *in situ* y la variación del contenido de Zn en los primeros 30 cm del suelo se debe a que estas capas de suelo tienen un origen coluvial (material que posiblemente provenga de una zona con un menor aporte inicial de este elemento), diferente del resto del suelo del perfil (Cuadro 5).

En ambas microcuenca, el Zn se encuentra dominante en la fracción residual, con concentraciones mayores de 89%, lo cual implica poca movilidad de este elemento

y donde las otras facciones tienen poco efecto sobre su distribución (Cuadro 6). Gupta y Chen (1975), Jordao y Nickless (1989) y Kabala y Singh (2001) encontraron resultados similares, y Abd-Elfattah y Wada (1981) lo explican señalando que el Zn se fija como resultado de una precipitación física, en los látices de las arcillas donde se entrampa, o bien, se adsorbe fuertemente en los sitios de intercambio. La fuerte asociación de las arcillas esmectíticas y amorfas se debe a la gran cantidad de cargas permanentes y dependientes de pH que presentan, permitiendo su quimioadsorción (Abd-Elfattah y Wada, 1981; Drees *et al.*, 1989; Bohn *et al.*, 1993; Sparks, 1995). Esta fuerte sorción hace que el Zn del suelo no esté disponible para las plantas (Ma y Rao, 1997). Al subir el pH, ocurren procesos como la precipitación y oclusión (Kiekens, 1995; Adriano, 2001) que no se diferencian con la extracción secuencial, pero se consideran procesos de sorción del suelo (Sparks, 1995). El análisis de correlación múltiple permitió observar que la relación que guardan los contenidos de Zn en las fracciones con las propiedades del suelo son muy variables y dependen de las condiciones propias de cada sitio. Por ejemplo, al correlacionar los contenidos de Zn intercambiable del sitio Inceptisol, lo hace negativamente con el porcentaje de arcilla ($r = -0.77$); aunque en el Alfisol, la correlación fue positiva ($r = 0.74$); y el porcentaje de arcilla se relaciona negativamente con el Zn asociado a los óxidos de Fe amorfos ($r = -0.85$), esto implica sorción específica y poco dependiente de la CIC debida a cargas permanentes. En el Entisol, el Zn de los óxidos de Fe amorfos correlaciona positivamente con el porcentaje de arena ($r = 0.95$) y con la MO ($r = 0.87$); mientras que en el Molisol no se presentaron correlaciones significativas (Cuadro 7). Navarro (2000) menciona que la relación entre los óxidos y la MO se debe a la formación de complejos, tanto orgánicos solubles, como insolubles.

En la microcuenca *MJal2*, de igual manera que en la *MCoa1*, las correlaciones presentaron un comportamiento irregular que depende de las características de cada sitio; por ejemplo, en el Inceptisol, el porcentaje de arena correlacionó positivamente con el Zn asociado a los óxidos de Mn ($r = 0.88$), al Fe amorfos ($r = 0.76$) y a los cristalinos ($r = 0.86$), y negativamente con la fracción residual ($r = -0.95$); estas mismas fracciones correlacionaron, de manera inversa, con el porcentaje de arcilla: F3 ($r = -0.83$); F4 ($r = -0.71$); F5 ($r = -0.88$) y F6 ($r = 0.94$); el pH se relaciona negativamente con el contenido de Zn asociado a

los óxidos de Fe cristalinos ($r = -0.79$) y positivamente al ligado con la fracción residual ($r = 0.92$). En la zona de acumulación de sedimentos arcillosos (el sitio P) el Zn intercambiable correlaciona negativamente con el porcentaje de arena ($r = -0.717$) y el pH con los óxidos de Mn ($r = -0.94$) (Cuadro 7). Esto se explica porque la arena no contribuye a la CIC y porque, al aumentar el pH, disminuye la importancia del intercambio catiónico en retener a los ETs.

Es posible que la disminución del contenido de Zn en la fracción intercambiable, que también incluye la soluble, se origine por su lixiviación en las capas con alto contenido de arenas, además de su intercambio con la fase coloidal (Kabata-Pendias y Pendias, 1985; Navarro, 2000; Castellanos *et al.*, 2000). La baja concentración de este elemento en las fracciones: orgánica, óxidos de Mn y Fe amorfos es, de igual manera, originada por la preferencia del Zn de ser retenido en la fase coloidal (Kabata-Pendias y Pendias, 1985; Kiekens, 1995; Seoáñez *et al.*, 1999).

CONCLUSIONES

- En los suelos arcillosos de origen volcánico, los mecanismos que determinan la presencia, asociación y movilidad de Cu, Pb y Zn en las diferentes fracciones químicas de los suelos están relacionados con las propiedades del suelo, la concentración de estos metales en las diferentes fracciones químicas y la pendiente.
- El comportamiento del Cu y Pb está controlado, principalmente, por el pH y la composición mineralógica de los suelos de las microcuenca. Esto permite la asociación del Cu con la fracción residual (arcillas esmectíticas, amorfas, metahaloisita y vermiculita) y con la fracción de óxidos de Fe cristalino; y de Pb con la fracción residual y con la de óxidos de Mn. En el caso del Zn, en todos los sitios, se asoció de manera contundente con la fracción residual, lo cual significa que tiene preferencia por la carga de los materiales, independientemente si son variables o permanentes (esmectíticas o amorfos silíciros). El Cu, Pb y Zn tienen baja movilidad, por estar unidos a fracciones muy estables de suelo; no obstante, es posible que el Zn se difunda con mayor facilidad entre los cristales y se ubique en moléculas estables y, por eso, la mayor proporción se encuentra asociada a la fracción mineral; en contraste, el Pb y el Cu son elementos menos móviles por estar fuertemente adsorbidos en arcillas y óxidos.

LITERATURA CITADA

- Abd-Elfattah, A. y K. Wada. 1981. Adsorption of lead, copper, zinc, cobalt and cadmium by soil that differ in cation-exchange materials. *J. Soil Sci.* 32: 271.
- Adriano, D. C. 2001. Trace elements in terrestrial environmental biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals. 2nd ed. Springer Verlag. New York, NY, USA.
- Alloway, B. J. 1995a. The origin of heavy metals in soils. pp. 45, *In: B. J. Alloway (ed.). Heavy metals in soils*. Blackie Academic and Professional. London, UK.
- Alloway, B. J. 1995b. Soil processes and the behaviour of heavy metals. pp. 12, 23. *In: B. J. Alloway (ed.). Heavy metals in soils*. Blackie Academic and Professional. London, UK.
- American Public Health Association. 1992. Data quality. Part 1030. pp. 1-3 – 1.12. *In: A. E. Greenberg (ed.). Standard method for the examination of water and wastewater*. 18th ed. APHA. Washington, DC, USA.
- Baker D. E. y J. P. Senft. 1995. Copper. pp. 179-205. *In: B. J. Alloway (ed.). Heavy metals in soils*. Blackie Academic and Professional. London, UK.
- Birkeland, P. W. 1984. Soils and geomorphology. Oxford University Press. New York, NY, USA.
- Bohn, H. L., B. L. McNeal y G. O. O'Connor. 1993. Química de suelos. Trad. al español por M. Sánchez O. Limusa-Noriega. México, D.F.
- Castellanos, J. Z., J. X. Uvalle-Bueno y A. Aguilar-Santelises. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. 2^a ed. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapino, estado de México.
- Chen, W., S. K. Tan y J. H. Tay. 1996. Distribution, fractional composition and release of sediment-bound heavy metals in tropical reservoirs. *Water Air Soil Pollut.* 92: 273-287.
- Davies, B. E. 1995. Copper. pp. 206-223. *In: B. J. Alloway (ed.). Heavy metals in soils*. Blackie Academic and Professional. London, UK.
- Drees, L. R., L. P. Wilding, N. E. Seck y A. L. Sekayi. 1989. Silica in soil: quartz and disordered silica polymorphs. Book series 1. *In: J. B. Dixon y S. B. Weed (eds.). Minerals in soil environmental*. 2nd ed. Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.
- Eick, M. J., J. D. Peak, P. V. Brady y J. D. Pesek. 1999. Kinetics of lead adsorption/desorption on goethite: residence time effect. *Soil Sci.* 164: 28-39.
- Fassbender, H. W. 1975. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
- Gupta, S. K. y K. Y. Chen. 1975. Partitioning of trace metal in selective chemical fractions of nearshore sediments. *Environ. Lett.* 10:129-158.
- Gutiérrez-Castorena, Ma. del C. y C. A. Ortiz-Solorio. 1999. Origen y evolución de los suelos del ex lago de Texcoco, México. *Agrociencia* 33: 199-208.
- Gutiérrez-Castorena, Ma. del C., G. Stoops, C. A. Ortiz-Solorio y G. López-Ávila. 2005. Amorphous silica materials in soils and sediments of the Ex-Lago de Texcoco, México: an explanation for its subsidence. *Catena* 60: 205-226.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2001a. Carta estatal hidrología superficial. Escala 1:400 000. *In: Anexo cartográfico. Síntesis de información geográfica del estado de México*. Dirección General de Geografía. México. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2001b. Carta estatal de climas. Escala 1:400 000. *In: Anexo cartográfico. Síntesis de información geográfica del estado de México*. Dirección General de Geografía. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- ISRIC (International Soil Reference and Information Centre). 1995. Procedures for soil analysis. Technical Paper 9. 5th ed. Wageningen, The Netherlands.
- Jordao, C. P. y G. Nickless. 1989. Chemical association of Zn, Cd, Pb and Cu in soils and sediments determined by the sequential extraction technique. *Environ. Technol.* 10: 743-752.
- Kabala, C. y B. R. Singh. 2001. Fractionation and mobility of copper, lead, and zinc in soil profiles in the vicinity of a copper smelter. *J. Environ. Qual.* 30: 485-492.
- Kabata-Pendias, A. 1985. Agricultural problems related to excessive trace metal contents of soils. pp. 3-18. *In: W. Solomons, U. Förstner y P. Mader (eds.). Heavy metals: problems and solutions*. Springer Verlag. Berlin, Germany.
- Kabata-Pendias, A. y H. Pendias. 1985. Trace elements in soils and plants. CRC Press. Boca Raton, FL, USA.
- Kiekens, L. 1995. Zinc. pp. 284-305. *In: B. J. Alloway (ed.). Heavy metals in soils*. Blackie Academic and Professional. London, UK.
- Li, Z y L. M. Shuman. 1996. Heavy metal movement in metal-contaminated soil profiles. *Soil Sci.* 161: 656-666.
- Lindsay, W. L. 1979. Chemical equilibria in soil. John Wiley. New York, NY, USA.
- Liu, F., C. Colombo, P. Adamo, J. Z. He y A. Violante. 2002. Trace elements in manganese iron nodules from a Chinese Alfisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 661-670.
- Ma, L. Q. y G. N. Rao. 1997. Heavy metals in the environment. Chemical fractionation of cadmium, copper, nickel, and zinc in contaminated soils. *J. Environ. Qual.* 26: 259-264.
- McBride, M. B. 1994. Environmental chemistry of soil. Oxford University Press. New York, NY, USA.
- Millar, C. E., L. M. Tuck y H. D. Foth. 1958. Fundamentals of soil Science. 3rd ed. John Wiley. New York, NY, USA.
- Mooser, F. 1963. La cuenca lacustre del Valle de México. *Ing. Hidráulica Méx.* 17:47-56.
- Navarro, G. 2000. Química agrícola. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Pape, Th. y D. Lagger. 1994. Manual for soil description and classification. Department of Soil Science and Geology, Wageningen Agricultural University. Wageningen, The Netherlands.
- Pueyo, M., J. Sastre, E. Hernández, M. Vidal, J. F. López-Sánchez y G. Rauret. 2003. Prediction of trace element mobility in contaminated soils by sequential extraction. *J. Environ. Qual.* 32: 2054-2066.
- Rodríguez-Tapia, S., Ma. del C. Gutiérrez-C., C. Hidalgo-M. y C. A. Ortiz-S. 1999. Intemperismo en tepetas y en cenizas volcánicas y su influencia en la formación de Andisoles. *Terra* 17: 97-108.
- Sañudo-Wilhelmy, S. A., F. K. Rossi, H. Bokuniewic y R. J. Paulsen. 2002. Trace metal levels in uncontaminated groundwater of

- a coastal watershed: importance of colloidal forms. *Environ. Sci. Technol.* 36: 1435-1441.
- Seoánez, C., A. J. Chacón, A. Gutiérrez e I. Angulo. 1999. Contaminación de suelos: estudios, tratamiento y gestión. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Shuman, L. M. 1979. Zinc, manganese and copper in soil fractions. *Soil Sci.* 127: 10-17.
- Soil Survey Staff. 2003. Key to Soil Taxonomy. Ninth edition. US Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. Washington, DC, USA.
- Sparks, D. L. 1995. Environmental soil chemistry. Academic Press. San Diego, CA, USA.
- Sposito, G. 1989. The chemistry of soil. Oxford University Press. New York, NY, USA.
- Sposito, G., L. J. Lund y A. C. Chang. 1982. Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge: I. Fraction of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in solid phases. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 260-264.
- Ure, A. M. 1995. Methods of analysis for heavy metals in soils. pp. 58-73. In: B. J. Alloway (ed.). Heavy metals in soils. Blackie Academic and Professional. London, UK.