



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

FACULTAD DE CIENCIAS

DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS EN
PERFILES DE SUELOS ALUVIALES DE LA CUENCA
ALTA DEL RÍO LERMA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRA EN CIENCIAS (EDAFOLOGÍA)

PRESENTA

BIÓL. ALINA MORQUECHO CONTRERAS

DIRECTOR DE TESIS: DR. GILBERTO HERNÁNDEZ SILVA

MÉXICO, D.F.

MT 350785

OCTUBRE, 2005



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

RESUMEN

El sistema hidrológico Lerma-Santiago, uno de los más importantes del país, se caracteriza por concentrar una gran población urbana, industrial y agrícola. Lo cual ha dado como resultado el incremento en la actividad económica, el crecimiento demográfico y urbano, propiciando un avanzado proceso de senectud para el río, alterando las condiciones naturales de los cauces, degradando la calidad del agua, aumentando la erosión en la zona y afectando el sistema con distintas fuentes de contaminación, entre las que destacan descargas industriales, municipales y escurrimientos de las tierras cultivadas.

Entre los contaminantes ambientales se encuentran los metales pesados, entre los que destacan: arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel y zinc, que pueden afectar la salud de los organismos, son bioacumulables y se integran a los ciclos biogeoquímicos. Una forma de conocer el riesgo ambiental es conocer la cantidad de estos en el suelo que pueden ingresar a las cadenas tróficas y aguas subterráneas.

El comportamiento y contenido de metales pesados en los suelos depende, entre otros, de propiedades del suelo que intervienen en su sorción, principalmente: potencial de hidrógeno, condiciones redox, materia orgánica, textura y capacidad de intercambio catiónico. Sin embargo, la accesibilidad y la toxicidad de estos elementos para las plantas dependen de la fracción del suelo a la que se encuentran ligados, de las cuales se definen cinco: I) intercambiable, II) ligada a carbonatos, III) ligada a óxidos de Fe y Mn, IV) orgánica y sulfuros, y V) residual. Pueden ser movilizados con mayor facilidad si se encuentran relacionados con las fases orgánica, intercambiable e hidrosoluble.

En el presente trabajo se realizó la caracterización de cinco perfiles de suelo en la cuenca alta del río Lerma, incluyendo su descripción, densidad real, densidad aparente, porosidad, textura, pH, Eh, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, Na, K, Ca y Mg. También se determinó la concentración de Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn para establecer su distribución a lo largo del perfil y, se realizó el fraccionamiento de estos metales para definir su distribución en las diferentes fracciones del suelo y por tanto su disponibilidad. Finalmente se buscaron las relaciones estadísticas entre los metales pesados y las características del suelo para inferir su adsorción y movilidad en el sistema.

Los suelos descritos en este trabajo fueron clasificados como Phaeozem lúvico y Cambisol eútrico de acuerdo con la clasificación de FAO-UNESCO (1998), encontrando en todos los casos suelos fértiles, formados a partir de depósitos aluviales, con horizonte de acumulación de arcillas, pH neutro a básico, condiciones oxidantes, porcentaje medio de materia orgánica; se consideran suelos con fertilidad alta, pero con manto freático a menos de dos metros de la superficie.

Tanto el Cd como el Cr pueden considerarse inocuos dentro de este estudio debido a las bajas concentraciones que se determinaron. Mientras que el Pb, Zn y Ni son los elementos potencialmente más tóxicos ya que rebasan los límites sugeridos en mayor número de muestras.

De acuerdo a las fracciones en las que se determinaron, el Co y el Cr, fueron heredados litológicamente y se encuentran inmóviles dentro de los perfiles del suelo estudiados. Los micronutrientes Cu y Zn se encontraron de forma disponible en los tres perfiles, por lo que ambos podrían estar migrando dentro de los perfiles de suelo; sin embargo, no son considerados como contaminantes debido a su actividad en las plantas. El Ni es móvil dentro del perfil a través de la solución del suelo y de la materia orgánica, por lo que es considerado potencialmente peligroso. El Pb es móvil a través de los perfiles de suelo, por lo que podría causar problemas en los sitios estudiados, especialmente en Ixtlahuaca al ingresar a los cultivos y en el Cerrillo Piedras Blancas al pasar el manto freático.

Con respecto al análisis estadístico de los resultados se encontró que en los horizontes más arenosos existen bajas concentraciones de metales pesados, pero estos pueden moverse fácilmente. La materia orgánica podría estar actuando como acarreador de Ni, Pb y Zn, o bien ayudando a precipitar al Pb y Zn como óxidos; sin embargo, el comportamiento de los metales pesados con respecto a la materia orgánica depende principalmente del desarrollo de ésta y de sus propiedades de quelación. El pH controla parcialmente la movilidad del Co y Cr, por lo que al disminuir el pH existiría mayor movilidad de ambos elementos.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo reespecial.

NOMBRE: Alina Moravacho
Contreras

FECHA: 8-XI-05

FIRMA: 

EL DÉCIMO PRIMER MANDAMIENTO

Deberás utilizar la Tierra como si fueras un fiel administrador, conservando sus recursos y productividad de generación en generación. Deberás proteger sus campos contra la erosión, sus aguas contra la desecación, sus bosques contra la desolación, y sus lomas protégelas del sobrepastoreo.

De esta manera, tus descendientes podrán tener abundancia para siempre.

Si alguno falla en esta administración de la Tierra, los campos productivos se volverán estériles, terrenos pedregosos o inútiles barrancos y tus descendientes vivirán en la miseria o desaparecerán por siempre de la Tierra.

Walter C. Lowdermilk

AGRADECIMIENTOS

A los miembros del comité de revisores de tesis: Dr. Gilberto Hernández Silva, M. En C. Rosa María Ramírez Gama, Dra. Silke Cram Heydrich, Dra. Norma Eugenia García Calderon y Dr. Jorge Alberto Lugo de la Fuente, por sus observaciones y sugerencias para mejorar la interpretación y calidad de este trabajo.

A la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma del Estado de México, particularmente al laboratorio de Edafología y Ambiente, donde se realizó el trabajo de laboratorio.

A la T.L. Elda García Velazco por su apoyo en el laboratorio.

A los dueños de los terrenos donde se realizaron los muestreos por permitir hacer los perfiles de suelo.

A la Dirección General de Intercambio Académico de la UNAM y al Gobierno del Estado de México por el apoyo económico recibido a través de las becas otorgadas.

*A las dos personas más importantes del mundo para mí.
Hermilo y Montse*

Con todo mi amor

INDICE

Introducción	1
Antecedentes	
La cuenca del río Lerma.....	2
Problemática de la cuenca.....	5
Los metales pesados	
Generalidades.....	7
Factores que intervienen en la sorción de los metales pesados	
a) Potencial de hidrógeno: pH.....	10
b) Condiciones redox.....	11
c) Materia orgánica.....	12
d) Textura.....	13
e) Capacidad de intercambio catiónico.....	14
Objetivos.....	15
Justificación.....	16
Metodología	
Muestreo.....	17
Análisis de laboratorio.....	17
Análisis estadístico.....	20
Resultados y Discusión	
Características de los perfiles de suelo	
Perfil 1	
1. Descripción de campo.....	21
2. Características físicas.....	22
3. Características químicas.....	24
4. Metales pesados totales.....	27
Perfil 2	
1. Descripción de campo.....	30
2. Características físicas.....	31
3. Características químicas.....	32
4. Metales pesados totales.....	34
Perfil 3	
1. Descripción de campo.....	36
2. Características físicas.....	38
3. Características químicas.....	39
4. Metales pesados totales.....	41
Perfil 4	
1. Descripción de campo.....	43
2. Características físicas.....	45
3. Características químicas.....	46
4. Metales pesados totales.....	48
Perfil 5	
1. Descripción de campo.....	50
2. Características físicas.....	51

3. Características químicas.....	53
4. Metales pesados totales.....	55
Perfil 6	
1. Descripción de campo.....	57
2. Características físicas.....	58
3. Características químicas.....	59
4. Metales pesados totales.....	60
Fraccionamiento de metales pesados.....	63
1. Cobalto.....	63
2. Cromo.....	64
3. Cobre.....	65
4. Níquel.....	66
5. Plomo.....	67
6. Zinc.....	68
Análisis estadístico de los resultados.....	70
Conclusiones.....	75
Recomendaciones.....	76
Referencias.....	77
Apéndice I. Descripciones de perfil.....	81
Apéndice II. Características físicas y químicas.....	87
Apéndice III. Metales pesados totales.....	90
Apéndice IV. Fraccionamiento de metales pesados.....	92

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Tablas

Tabla 1	Límite de detección de metales pesados.....	20
Tabla 2	Clases texturales para cada horizonte del perfil de suelo del rancho “El Puente”, Ixtlahuaca, Estado de México.....	23
Tabla 3	Clasificación del suelo a partir del pH de acuerdo a la USDA.....	24
Tabla 4	Valores típicos, intervalo y límites permitidos de metales pesados en el suelo.....	27
Tabla 5	Clases texturales para los distintos horizontes del perfil de suelo de “El Aguaje”. Ranchería “La Cuadrilla”, Temascalcingo, Estado de México.....	32
Tabla 6	Clases texturales en los distintos horizontes del perfil de suelo de El Cerrillo “Vista Hermosa”, Toluca, Estado de México.....	39
Tabla 7	Clases texturales en los distintos horizontes del perfil de suelo del rancho “Los Compadres”, Hacienda Solis, Temascalcingo, Estado de México.....	45
Tabla 8	Clases texturales en los distintos horizontes del perfil de suelo de “Manto del Río”, Atlacomulco, Estado de México.....	52
Tabla 9	Clases texturales en los distintos horizontes del perfil de suelo de El Cerrillo “Piedras Blancas”, Toluca, Estado de México.....	59
Tabla 10	Análisis de correlación múltiple entre los parámetros del suelo y los metales pesados totales.....	71
Tabla 11	Análisis de correlación múltiple entre los parámetros del suelo y las fracciones de metales pesados.....	72

Figuras

Figura 1	Ubicación de la cuenca Lerma-Santiago en la República Mexicana.....	2
Figura 2	La cuenca alta del río Lerma en el Estado de México.....	3
Figura 3	Esquema del comportamiento de los metales pesados en el suelo.....	7
Figura 4	El crecimiento industrial en el Estado de México de 1976 a 1999.....	16
Figura 5	Diagrama de flujo del procedimiento a seguir para la descripción de un perfil de suelo.....	17
Figura 6	Mapa de la cuenca alta del río Lerma, en el que se localizan los sitios de estudio.....	18
Figura 7	Características físicas: densidades real y aparente, porcentaje de porosidad y textura en los distintos horizontes del perfil de suelo del rancho “El Puente”, Ixtlahuaca, Estado de México.....	24
Figura 8	Características químicas pH, conductividad eléctrica, materia orgánica en los distintos horizontes del perfil de suelo del rancho “El Puente”, Ixtlahuaca, Estado de México.....	25
Figura 9	Características químicas: capacidad de intercambio catiónico, iones intercambiables (Na, K, Ca y Mg) y porcentaje de saturación de bases en los distintos horizontes del perfil de suelo del rancho “El Puente”, Ixtlahuaca, Estado de México.....	26
Figura 10	Metales pesados totales: cobalto, cromo y cobre en los distintos horizontes del perfil de suelo del rancho “El Puente”, Ixtlahuaca, Estado de México.....	28
Figura 11	Metales pesados totales: níquel, plomo y zinc en los distintos horizontes del perfil de suelo del rancho “El Puente”, Ixtlahuaca, Estado de México.....	29
Figura 12	Características físicas: densidades real y aparente, porcentaje de porosidad y textura en los distintos horizontes del perfil de suelo de “El Aguaje”, ranchería “La Cuadrilla”, Temascalcingo, Estado de México.....	32

Figura 13	Características químicas pH, conductividad eléctrica, materia orgánica en los distintos horizontes del perfil de suelo de “El Aguaje”, ranchería “La Cuadrilla”, Temascalcingo, Estado de México.....	33
Figura 14	Características químicas: capacidad de intercambio catiónico, iones intercambiables (Na, K, Ca y Mg) y porcentaje de saturación de bases en los distintos horizontes del perfil de suelo de “El Aguaje”, ranchería “La Cuadrilla”, Temascalcingo, Estado de México.....	34
Figura 15	Metales pesados totales: cobalto, cromo y cobre en los distintos horizontes del perfil de suelo de “El Aguaje”, ranchería “La Cuadrilla”, Temascalcingo, Estado de México.....	35
Figura 16	Metales pesados totales: níquel, plomo y zinc en los distintos horizontes del perfil de suelo de “El Aguaje”, ranchería “La Cuadrilla”, Temascalcingo, Estado de México.....	36
Figura 17	Características físicas: densidades real y aparente, porcentaje de porosidad y textura en los distintos horizontes del perfil de suelo de El Cerrillo “Vista Hermosa”, Toluca, Estado de México.....	38
Figura 18	Características químicas pH, conductividad eléctrica, materia orgánica en los distintos horizontes del perfil de suelo de El Cerrillo “Vista Hermosa”, Toluca, Estado de México.....	37 39
Figura 19	Características químicas: capacidad de intercambio catiónico, iones intercambiables (Na, K, Ca y Mg) y porcentaje de saturación de bases en los distintos horizontes del perfil de suelo de El Cerrillo “Vista Hermosa”, Toluca, Estado de México.....	40
Figura 20	Metales pesados totales: cobalto, cromo y cobre en los distintos horizontes del perfil de suelo de El Cerrillo “Vista Hermosa”, Toluca, Estado de México.....	42
Figura 21	Metales pesados totales: níquel, plomo y zinc en los distintos horizontes del perfil de suelo de El Cerrillo “Vista Hermosa”, Toluca, Estado de México.....	43
Figura 22	Características físicas: densidades real y aparente, porcentaje de porosidad y textura en los distintos horizontes del perfil de suelo del rancho “Los Compadres”, Hacienda Solis, Temascalcingo, Estado de México.....	46
Figura 23	Características químicas pH, conductividad eléctrica, materia orgánica en los distintos horizontes del perfil de suelo del rancho “Los Compadres”, Hacienda Solis, Temascalcingo, Estado de México.....	47
Figura 24	Características químicas: capacidad de intercambio catiónico, iones intercambiables (Na, K, Ca y Mg) y porcentaje de saturación de bases en los distintos horizontes del perfil de suelo del rancho “Los Compadres”, Hacienda Solis, Temascalcingo, Estado de México.....	48
Figura 25	Metales pesados totales: cobalto, cromo y cobre en los distintos horizontes del perfil de suelo del rancho “Los Compadres”, Hacienda Solis, Temascalcingo, Estado de México.....	49
Figura 26	Metales pesados totales: níquel, plomo y zinc en los distintos horizontes del perfil de suelo del rancho “Los Compadres”, Hacienda Solis, Temascalcingo, Estado de México.....	50
Figura 27	Características físicas: densidades real y aparente, porcentaje de porosidad y textura en los distintos horizontes del perfil de suelo de “Manto del Río”, Atlacomulco, Estado de México.....	52
Figura 28	Características químicas pH, conductividad eléctrica, materia orgánica en los distintos horizontes del perfil de suelo de “Manto del Río”, Atlacomulco, Estado de México.....	53

Figura 29	Características químicas: capacidad de intercambio catiónico, iones intercambiables (Na, K, Ca y Mg) y porcentaje de saturación de bases en los distintos horizontes del perfil de suelo de “Manto del Río”, Atlacomulco, Estado de México.....	54
Figura 30	Metales pesados totales: cobalto, cromo y cobre en los distintos horizontes del perfil de suelo de “Manto del Río”, Atlacomulco, Estado de México.....	55
Figura 31	Metales pesados totales: níquel, plomo y zinc en los distintos horizontes del perfil de suelo de “Manto del Río”, Atlacomulco, Estado de México.....	56
Figura 32	Características físicas: densidades real y aparente, porcentaje de porosidad y textura en los distintos horizontes del perfil de suelo de El Cerrillo “Piedras Blancas”, Toluca, Estado de México.....	58
Figura 33	Características químicas pH, conductividad eléctrica, materia orgánica en los distintos horizontes del perfil de suelo de El Cerrillo “Piedras Blancas”, Toluca, Estado de México.....	59
Figura 34	Características químicas: capacidad de intercambio catiónico, iones intercambiables (Na, K, Ca y Mg) y porcentaje de saturación de bases en los distintos horizontes del perfil de suelo de El Cerrillo “Piedras Blancas”, Toluca, Estado de México.....	60
Figura 35	Metales pesados totales: cobalto, cromo y cobre en los distintos horizontes del perfil de suelo de El Cerrillo “Piedras Blancas”, Toluca, Estado de México.....	61
Figura 36	Metales pesados totales: níquel, plomo y zinc en los distintos horizontes del perfil de suelo de El Cerrillo “Piedras Blancas”, Toluca, Estado de México.....	62
Figura 37	Porcentaje de las fracciones de cobalto en los distintos horizontes de los perfiles “El aguaje”, “Manto del Río” y El Cerrillo “Piedras Blancas”.....	64
Figura 38	Porcentaje de las fracciones de cromo en los distintos horizontes de los perfiles “El aguaje”, “Manto del Río” y El Cerrillo “Piedras Blancas”.....	65
Figura 39	Porcentaje de las fracciones de cobre en los distintos horizontes de los perfiles “El aguaje”, “Manto del Río” y El Cerrillo “Piedras Blancas”.....	66
Figura 40	Porcentaje de las fracciones de níquel en los distintos horizontes de los perfiles “El aguaje”, “Manto del Río” y El Cerrillo “Piedras Blancas”.....	67
Figura 41	Porcentaje de las fracciones de plomo en los distintos horizontes de los perfiles “El aguaje”, “Manto del Río” y El Cerrillo “Piedras Blancas”.....	68
Figura 42	Porcentaje de las fracciones de zinc en los distintos horizontes de los perfiles “El aguaje”, “Manto del Río” y El Cerrillo “Piedras Blancas”.....	69
Figura 43	Diagrama de cajas y bigotes para los parámetros determinados, en el que se muestran los puntos extremos.....	70

1.4 INTRODUCCIÓN

El sistema hidrológico Lerma-Santiago es uno de los más importantes del país; se caracteriza por concentrar una población urbana, industrial y agrícola de las más significativas de México (Gobierno del Estado de México, 1993). El incremento en la actividad económica, así como el crecimiento demográfico y urbano, han propiciado un elevado aprovechamiento de los recursos de la cuenca, alterando las condiciones naturales de los cauces, degradando la calidad del agua, aumentando la erosión en la zona y afectando el sistema con distintas fuentes de contaminación, entre las que destacan descargas industriales, municipales y escurrimientos de las tierras cultivadas (Hansen *et al.*, 1995).

En general, las poblaciones humanas habitan a lo largo de las vías fluviales, de las cuales obtienen el agua para consumo y riego, depositando en ellas los desechos de la población. Estos desechos no pueden ser eliminados con facilidad, debido a los ciclos del propio cuerpo de agua (WRI, 1994), pudiendo generar problemas ambientales de contaminación de agua, aire y suelo.

Entre los principales contaminantes ambientales se encuentran los metales pesados, que se definen como los metales de peso molecular mayor que el sodio y que cuentan con una gravedad específica de 5.0 mg/m^3 . Esta definición incluye cerca de 70 elementos metálicos, de los cuales sólo unos pocos son potencialmente tóxicos. En la lista de los principales contaminantes publicada por la Environmental Protection Agency (EPA) se consideran ocho: arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel y zinc (Hughes, 1985). Estos elementos pueden afectar la salud de los organismos, además de ser bioacumulables y tener la capacidad de integrarse a los ciclos biogeoquímicos. Aunque existen de manera natural en los ecosistemas, la principal fuente de metales es antropogénica, y de manera especial son liberados por las industrias (Triefl, 1981; Wild, 1989 y Holmgren *et al.*, 1993). Algunos de estos elementos son esenciales en el metabolismo de plantas y animales; sin embargo, cuando se presentan en cantidades muy elevadas son tóxicos para la flora, fauna y el ser humano (Simmons, 1982; Brus y Jansen, 2004). Una forma de conocer el riesgo ambiental es determinar la cantidad de metales pesados presentes en el suelo que pueden ingresar en las cadenas tróficas y aguas subterráneas (Breummer *et al.*, 1986).

Los metales pueden ser incorporados al suelo directamente con desechos sólidos de origen municipal e industrial o a través de prácticas agrícolas, e indirectamente, por precipitación atmosférica de emisiones de contaminantes industriales y automotrices. Estos elementos pueden contaminar aguas subterráneas por lixiviación (Evans, 1989).

El comportamiento y contenido de metales pesados en los suelos depende, entre otros, de propiedades químicas y físicas, como son la textura, pH, capacidad de intercambio catiónico, contenido de materia orgánica, así como las condiciones climáticas de la región (Loué, 1988); mientras que su transferencia a través del suelo, está determinada por los procesos químicos que ocurren en el mismo, por lo que es importante determinar la fuerza a la que se encuentran ligados a la matriz y su distribución en las diferentes especies químicas que la componen (Keller y Védy, 1994; Predrag y Petar, 1994).

En este trabajo se determinó la presencia de metales pesados en perfiles de suelo de sitios que se han diagnosticado previamente como contaminados por estos elementos (Balderas, 1998), con el fin de conocer su riesgo ambiental. Estos suelos son regados con aguas residuales provenientes del corredor industrial Lerma-Toluca, las cuales son transportadas por el río Lerma, por lo que pueden representar riesgos para la salud de los habitantes del área ya que al haber migración de metales pesados a través del perfil de suelo, se integrarían a los cultivos y serían consumidos por la población de manera directa o bien, a través de una cadena trófica.

ANTECEDENTES

La cuenca del río Lerma

El sistema Lerma-Chapala (Fig. 1), es uno de los más importantes del país, tiene una superficie de aproximadamente 52 000 km². Ocupa amplias porciones del Estado de México, Norte de Michoacán, Sureste de Querétaro, la mayor parte de Guanajuato y Este de Jalisco. La Secretaría de Recursos Hidráulicos la establece como la Región Hidrográfica Núm. 12, drenada por el río Lerma como colector principal, que vierte su caudal al Lago Chapala después de 705 Km de recorrido. El río Lerma se divide en cuenca alta, media y baja, nace al este de la ciudad de Toluca y se dirige hacia el oeste para verter sus aguas en el lago Chapala, atravesando el bajo guanajuatense. Los límites de la cuenca comprenden el área que corresponde a la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, incluyendo las subprovincias de Mil Cumbres al oeste y la de lagos y volcanes de Anáhuac, que abarca la mayor parte del Estado de México (C.N.A., 1991).



Figura 1. Ubicación de la Cuenca Lerma Santiago en la República Mexicana (INEGI, 2004)

El área se encuentra en una zona de actividad volcánica, constituida por una secuencia de rocas formadas por derrames piroclásticos y, en menor proporción, por derrames continentales. Las rocas que afloran son andesitas, basaltos, materiales piroclásticos, lahares y pequeños lentes de materiales aluviales, tanto del Terciario como del Cuaternario (Gobierno del Estado de México, 1993).

Litológicamente se encuentra formada por rocas ígneas extrusivas de naturaleza intermedia a básica; las primeras predominan en el parteaguas general de la cuenca, las segundas forman corrientes de lava y conos cineríticos; ambas constituyen depósitos piroclásticos que, en su granulometría, varían de tobas finas a bombas y en algunos casos, conglomerados. En las partes bajas existen depósitos de aluvión, como producto derivado de los arroyos. Los procesos de erosión han marcado sus características en el paisaje.

Morfológicamente las rocas volcánicas han formado sierras de gran altura que circundan el límite del área; en el centro también existen grandes elevaciones como el

cerro de Jocotitlán, así como zonas de valles que intersecta el río Lerma. Los materiales piroclásticos presentan lomas suaves. El paisaje muestra estructuras como montañas y aparatos volcánicos, mesetas de lava, acantilados producidos por fallas, estratos horizontales rellenando las partes bajas, planicies de aluvión, etc.

El parteaguas Oriental de la cuenca esta formado por el lineamiento de las crestas y cimas topográficas de la sierra de las Cruces y Monte Alto hasta el cerro de la Bufa y sus estribaciones, que se conectan al piedemonte de la sierra de Chapa de Mota; mientras que el parteaguas Norte lo delimita la región volcánica de San Bartolomé de Morelos, Peña Redonda y Peña Nudo.

La cuenca alta del río Lerma (Fig. 2), en donde se localiza este estudio, tiene su cabecera sobre el parteaguas de cimas y crestas topográficas de estructura volcánica de diferentes edades y características litológicas. El sector Oeste, está formado por los cerros San Antonio y la Calera como contrafuerte noroccidental del Nevado de Toluca de 4,565 m.s.n.m. Este estrato-volcánico poligenético se origina en el Terciario más tardío, constituido por erupciones de lava dacítico-andesíticas, cubiertas por lahares y depósitos pumíticos. La formación superior de Toluca se constituye principalmente de pumitas lapillis y cenizas volcánicas; más al Sur con la falla de Tenango de dirección Este-Oeste, se extiende la colada lávica del Basalto Tenango formando una nivelada meseta-lávica. A partir del frente oriental de estas coladas y de las andesitas de Terciario cortados por la falla de Tenango, sobre la sierra Nahuatlaca-Matlazinca se desarrolla un campo de vulcanismos monogenético del Cuaternario tardío.



Figura 2. La cuenca alta del río Lerma en el Estado de México (INEGI, 2004)

En la porción paralela opuesta, se localiza el contrafuerte noroeste del Nevado de Toluca formado por el cerro de Santa Cruz y la Calera otro profuso campo de flujo

basáltico cortado por la falla Perales, que define el escalonamiento tectónico del valle de Ixtlahuaca, delineado además, por el cerro de la Guadalupeana, la sierra del Santuario y el cerro de los Lobos. Este escalonamiento define el límite meridional de la cuenca alta, que contiene los derrames andesíticos y de escombros de avalancha del volcán de Jocotitlán; al Oeste de éste, antiguas estructuras volcánicas dacíticas cubiertas por derrames basálticos del Cuaternario forman la sierra del Garambullo y la Cima del Oro de Hidalgo. El curso bajo de la cuenca alta se define por el fuerte control estructural sobre el curso del río Lerma a partir del cambio de dirección de la falla de Pastores, límite sur de la fosa tectónica Solís-Acambay y que se define estructuralmente por el sistema de fallas Tixmodeje-Acambay

Con relación a su clima presenta variaciones mínimas. El clima predominante es templado, excepto en la porción alta del Nevado de Toluca que presenta un clima frío. De acuerdo a la clasificación de Köppen modificada por García (1988) se presentan los subtipos C(w2) (w), C(E) (m) (w) y C(E) (w2) (w), lo que indica que son climas templados subhúmedos con lluvias en verano y semifríos con lluvias en verano. Con una temperatura media anual de 13.5°C y una precipitación total anual de 785.7 mm.

Dentro del Estado de México la cuenca del río Lerma tiene una superficie de 5,548.54 km²; originalmente nacía en los manantiales que alimentaban la laguna de Almoloya del Río. Junto con la laguna de Lerma y la de San Bartolo encauzaban sus aguas hacia el río. La degradación del río Lerma se ve atenuada por el descenso de los ríos Tejalpa, Verdigel y Santiaguito, que se forman en el Nevado de Toluca. La primera aportación que recibe el cauce principal es a través del río Verdigel; más adelante recibe su primer colector de importancia, el río Otzolotepec; el siguiente aportador es el río Tejalpa, luego el río la Gavia cuya corriente se forma por el excedente del almacenamiento de la presa Ignacio Ramírez; el siguiente aportador de importancia es el río Santo Domingo.

La zona se encuentra ubicada dentro de un área con una fuente de recarga importante. Su funcionamiento es a través de unidades transmisoras que se localizan en el parteaguas, captando parte de la precipitación y haciéndola circular a través de ellas hasta hacerlas llegar a la zona del valle en el acuífero principal; este acuífero, formado por tobas lacustres e interdigitadas con otras unidades, recibe su recarga en forma lateral y no vertical. Esto se observa porque sobre ellas existen varias lagunas que después de diez años de explotación no se han secado; además, esta unidad no permite una infiltración vertical rápida.

En el Estado de México se localizan los acuíferos del alto Lerma, los cuales constituyen una de las principales fuentes de suministro de agua potable a la ciudad de México. Los acuíferos de esta región se encuentran en rocas basálticas y sedimentos tanto aluviales como lacustres del Terciario y Recientes.

De acuerdo con la constitución litológica de la zona en la cuenca sumado a los tipos de clima presentes, se determinan la presencia de los suelos, entre los que dominan el andosol que sustenta la vegetación de bosques templados; litosol, sosteniendo matorrales; histosoles, en áreas inundables; feozem, que domina parte del Valle y vertisoles, de buen uso agrícola alrededor de la presa José Antonio Alzate (Gobierno del Estado de México, 1993).

Problemática de la Cuenca

En las últimas décadas, la calidad del agua de los ríos en México ha sido degradada al incrementar su uso agrícola, residencial e industrial, incluyendo problemas de contaminación (Flores y Návar, 2002).

El Lerma, en particular, ha sido explotado intensamente, lo que ha traído consigo desequilibrios hidrológicos importantes que han ocasionado que el agua en su área de influencia sea insuficiente para todos los usos demandados (Vázquez-Gutiérrez, 1994).

El río Lerma nació en los manantiales que alimentaban la laguna de Almoloya del Río, junto con la laguna de Lerma y la de San Bartolo encauzaban sus aguas hacia el Lerma; sin embargo, actualmente esta zona lacustre se encuentra en un avanzado proceso de senectud, ocasionado por la extracción intensa del agua subterránea, el descenso de la recarga hidrológica y la escorrentía intensa. Esto se debe, en parte, a que se realizaron obras de captación de agua potable de estos manantiales y el acuífero que alimentaba las lagunas para abastecer de agua a la ciudad de México. La primera aportación de agua que recibe el cauce principal es del río Verdigel que es de aguas negras e industriales, de tal manera que la aportación de ríos y manantiales que llega al colector general es casi nula. La sobreexplotación de los acuíferos y el bombeo han causado efectos negativos, tales como hundimientos, agrietamientos, disminución del gasto base de las distintas corrientes, reducción de los niveles freáticos y el desequilibrio hidrológico de la cuenca (Gobierno del Estado de México, 1993).

Aunado a esto, los afluentes que vierten sus aguas al río Lerma (entre los que destacan los cauces que descienden del Nevado de Toluca, como los ríos Tejalpa y Santiaguito), presentan degradación intensa debido al crecimiento explosivo de la industria, que tiene una gran fuerza económica en la zona (Sobrino, 1994).

Entre las principales fuentes de contaminación de este sistema se encuentran:

- ◆ Descargas industriales, procedentes de más de 3 500 industrias de diversos giros: química, petroquímica, destiladora, textil, peletera, alimenticia, maderera, metalúrgica, metal-mecánica, electromecánica, minera y cantera.
- ◆ Descargas municipales, de más de 8 millones de habitantes, y
- ◆ Escurrimientos de tierras cultivadas, que suman aproximadamente 750 000 hectáreas (Hansen *et al.*, 1995).

Dentro de la cuenca alta del río Lerma se han realizado algunos estudios sobre metales pesados, entre los que se pueden mencionar los siguientes:

En 1985, González-Castorena para determinar el nivel óptimo de Cu en el cultivo de jitomate encontró que la concentración total de este elemento en el suelo de El Cerrillo "Piedras Blancas" era de 28.36 mg/kg; mientras que en Temascaltepec fue de 11.0 mg/kg.

En 1996, Mora-Herrera determinó que en Almoloya del Río, el Ni se hallaba en concentraciones de 45.60 ± 29.04 mg/kg; mientras que Hanz-Samano y Leyva Morales (1996) determinaron 40.76 ± 12.7 mg/kg de Pb en Lerma; 40.756 ± 29.036 mg/kg en San Pedro Tultepec y 38.513 ± 15.889 mg/kg.

En sedimentos de la presa "José Antonio Alzate" se encontró que Cd, Cu, Pb y Zn rebasan los límites consultados, mostrando un rango de concentración para Cr de 62 a 145 mg/kg; Ni 27-43 mg/Kg; Cu 15-61 mg/Kg; Zn 92-233 mg/Kg y, Pb 12-30 mg/Kg (Avila-Pérez, 1995; Morquecho-Contreras, 1997); mientras que en pozos de 60 cm de profundidad, dentro de la misma presa no existe un patrón de distribución de los metales, con las mayores concentraciones a distintas profundidades (Morquecho-Contreras, 1997).

También se han realizado estudios sobre especiación de metales pesados en suelos de la cuenca alta del río Lerma, en donde se encontraron poco móviles, asociados a las fracciones residual, óxidos de Fe y Mn, así como a la materia orgánica y sulfuros; aunque todos los sitios muestreados presentaron elevadas concentraciones de Ni y en Ixtlahuaca, también altas concentraciones de Cr (Vaca-Paulín, 1999).

En el estudio presentado por Lugo de la Fuente (2001) menciona que el curso alto muestra altas concentraciones de Mn, Zn, Cu, Pb, Ni, Cd, Co, Cr, y Fe en sedimentos; siendo Cd y Pb los elementos que exceden con más frecuencia los límites consultados. Además, basándose en el índice de geoacumulación, en el curso alto, existen al menos cinco sitios clasificados como fuertemente contaminados para Cd, Cu, Pb, Zn y Cr. Sin embargo, al realizar el fraccionamiento químico, solamente el Cd y Co fueron determinados en fracciones disponibles.

Los Metales Pesados

Generalidades

Entre los principales contaminantes ambientales se encuentran los metales pesados, los cuales son elementos potencialmente tóxicos que pueden afectar la salud de los organismos, además de ser bioacumulables y tener la capacidad de integrarse a los ciclos biogeoquímicos. Aunque estos elementos existen de manera natural en los ecosistemas y pueden ser liberados al ambiente por el intemperismo de las rocas (Nowack *et al*, 2001), la principal fuente de metales es antropogénica, y de manera especial, son liberados por las industrias (Triefl, 1981; Wild, 1989 y Holmgren *et al*, 1993); además, la agricultura actual y la depositación atmosférica pueden incrementar la concentración de metales pesados en el suelo (Keller *et al*, 2002).

Los metales han sido definidos como componentes integrales del ambiente y los organismos; algunos tienen un papel muy importante para estos, por lo que son elementos esenciales. Otros tienen una influencia benéfica sobre los seres vivos cuando se presentan en ciertas concentraciones. Otros más, no tienen efectos positivos evidentes en la biota y sólo se conocen sus impactos dañinos. Sin embargo, los efectos tóxicos pueden presentarse con cualquier metal cuando se excede un nivel de concentración crítico (Simmons, 1982; Hughes, 1985). Una forma de conocer el riesgo ambiental es conocer la cantidad de metales pesados presentes en el suelo, que pueden ingresar en las cadenas tróficas y aguas subterráneas (Breummer *et al*, 1986; Brus y Jansen, 2004).

El suelo es considerado un compartimiento específico de la biosfera que no solo actúa como depósito geoquímico para contaminantes, sino que también actúa como un sistema amortiguador que controla el transporte de elementos y sustancias químicas a la atmósfera, hidrosfera y biota, además de su papel esencial en la producción de alimentos (Kabata-Pendias, 1995). Es el receptor final de la mayoría de los desechos sólidos y líquidos (Korte *et al*, 1976), tiene una capacidad de almacenamiento de contaminantes cercana al 99% (Salomons, 1995); por lo que hay una entrada acumulativa de metales pesados a este sistema, donde su tiempo de residencia es largo (Stigliani *et al*, 1993), y donde se integran concentraciones de estos contaminantes a través del tiempo (Calmano *et al*, 1996).

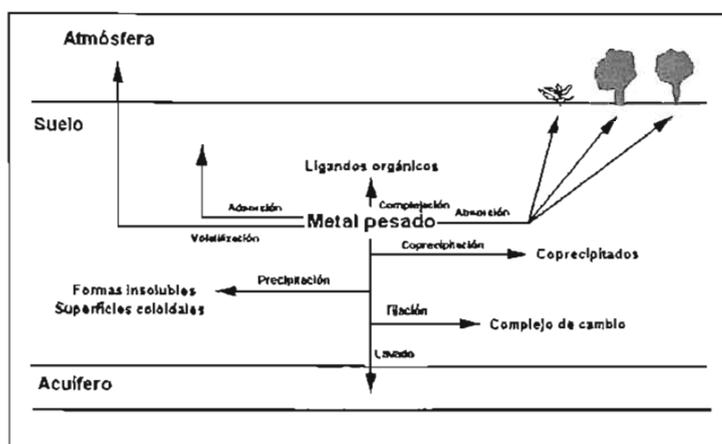


Figura 3. Esquema del comportamiento de los metales pesados en el suelo

Cuando los metales pesados se encuentran en niveles elevados en el suelo pueden ser exportados al ambiente ser tomados por plantas nativas o de importancia agrícola y, subsecuentemente, por animales y humanos, o ser lixiviados hacia los mantos freáticos. El movimiento a plantas o mantos acuíferos depende de la forma química de los metales en suelos contaminados; así como de las propiedades de los suelos (Fig. 3) (Miller y McFee, 1983; Evans, 1989; Salomons, 1995; He *et al.*, 2004).

Concentraciones elevadas de algunos elementos traza pueden afectar negativamente a las plantas y animales. Algunos metales como el cromo, hierro, plomo y mercurio plantean relativamente poco riesgo para las plantas y animales, ya que se convierten en formas de baja solubilidad y asimilabilidad. El manganeso puede constituir un problema en los suelos ácidos por razones de fototoxicidad. Los elementos particularmente peligrosos son Cu, Zn, Ni y Cd. (Wild, 1989).

Las menas metálicas contenidas en las rocas del subsuelo forman parte del material parental y cuando se meteorizan elevan el contenido de los elementos. Sin embargo, el mayor impacto ambiental se produce como consecuencia del aprovechamiento minero o del procesamiento industrial. La liberación de elementos al ambiente puede producirse en todas las etapas del procesamiento, desde la separación de la mena metálica de la roca que la contiene, hasta la obtención del producto final. Los agentes dispersantes son el viento, el agua y la gravedad (Wild, 1989).

Existen otras fuentes de metales en zonas urbanas entre las que destacan escapes de automóviles, uso de neumáticos, corrosión de materiales de construcción, y depositación atmosférica. En zonas agrícolas, también hay fuentes de metales, como erosión, depositación atmosférica y aplicación de agroquímicos (Stigliani *et al.*, 1993). Estas actividades antrópicas pueden modificar en gran parte los ciclos biogeoquímicos naturales de metales pesados tóxicos; su acumulación en la pedosfera y litosfera es de gran preocupación, ya que contrariamente a los compuestos xenobióticos orgánicos, no están sujetos a ningún proceso de degradación (Bourg, 1995).

El mercurio, el arsénico, el flúor y el plomo pueden, en determinadas condiciones, originar problemas para la salud humana por su elevado contenido en, o sobre las plantas. Existe preocupación por la acumulación en el suelo de una serie de metales procedentes de aguas residuales de origen urbano o industrial. Estas aguas contienen metales pesados en concentraciones variables, que dependen de la naturaleza de las industrias locales y de la porción entre residuos domésticos e industriales (Wild, 1989). En general, el contenido de metales está relacionado con la industrialización, debido a que las industrias son las principales fuentes de metales (Sommers, 1976).

Los contaminantes originados de las actividades humanas se han introducido al ambiente subsuperficial a través de prácticas de disposición, vertedero y aplicación agrícola de productos químicos. Muchos contaminantes son rápidamente absorbidos por el acuífero de tal forma que se consideran virtualmente inmóviles dentro de la zona vadosa y representan poco riesgo para el acuífero. Por ejemplo, en el suelo y el material del acuífero, muchos metales y radionucleótidos se unen fuertemente a los componentes minerales. Sin embargo, los coloides en la fase sólida también pueden ser móviles en el ambiente subsuperficial. Debido a que la composición de los coloides es químicamente similar a la del material subsuperficial inmóvil, estas partículas también pueden absorber contaminantes orgánicos e inorgánicos y estabilizarlos en la fase móvil. Los coloides

actúan como una tercera fase que puede incrementar la cantidad de contaminantes que son transportados hacia el acuífero (McCarthy y Zachara, 1989).

Las relaciones entre elementos traza y calidad del ambiente están basadas en la necesidad de mantener y salvaguardar la salud. Los elementos traza están ligados a la salud debido a las funciones que cumplen en los procesos fisiológicos. Así, los metales pesados figuran en forma importante en varios tipos de reacciones de transferencia de electrones. El reemplazo en una enzima de un metal pesado por otro, puede llevar a un mal funcionamiento, por ejemplo: la capacidad de algunas especies de bacterias para fijar nitrógeno está relacionada con la preferencia por ciertos metales pesados en las enzimas para formar compuestos de coordinación con N_2 ; en presencia de una abundancia de otros metales pesados puede cesar la fijación de N_2 y por lo tanto, la síntesis de proteínas. Además, los metales pesados en altas concentraciones pueden precipitar PO_4^{3-} , catalizar la degradación de metabolitos esenciales o alterar la permeabilidad de las membranas celulares. Aunado a esto, los metales pesados se acumulan en los sistemas biológicos aun en los niveles más bajos de desarrollo (Lagerwerff, 1983).

La transferencia de metales a través del suelo, es regida por su naturaleza química y por los procesos que ocurren en el sistema (Fig. 3); por ello, es importante determinar la fuerza con la que se encuentran ligados a la matriz y su distribución, de acuerdo a la afinidad a diferentes especies químicas presentes en el suelo (Keller y Védy, 1994; Predrag y Petar, 1994). Además, la distribución de los metales en el suelo depende de su cantidad, naturaleza y origen (Keller y Védy, 1994).

Se ha considerado que el movimiento de metales pesados en los suelos es muy bajo e incluso inexistente; sin embargo, se ha mostrado que cantidades considerables de estos elementos pueden fluir hacia el subsuelo o más lejos de la zona de raíces en un periodo de décadas con entrada constante de agua que los contenga. El contenido total de metales, particularmente Co, Cu, Ni y Zn puede sugerir un movimiento hacia abajo para producir una distribución uniforme de los metales adicionados en el perfil de suelo. Pequeñas cantidades de metales se mueven en solución sugiriendo que, con grandes volúmenes de agua drenada durante un largo periodo de tiempo pueden hacer migrar cantidades considerables de metales pesados hacia abajo (Schirado *et al.*, 1986; Cruz-Guzmán *et al.*, 2003).

Se estima que para algunos metales pesados como el Zn o el Cu el tiempo requerido para moverse un metro a través de una columna de suelo por lixiviado natural es del orden de miles a diez miles de años. Sin embargo, actividades humanas como la ingeniería civil, el drenaje, cambios en uso del suelo, cambios en el equilibrio entre metales pesados en sedimentos/suelos y aguas puede dar como resultado un incremento en la tasa de transferencia, pudiendo ocurrir en periodos de tiempo cortos en comparación con el tiempo necesario para incrementar la concentración de los contaminantes (Salomons, 1995).

El riesgo potencial de los metales pesados en el ambiente se incrementa con su capacidad para migrar a través del suelo. Si pueden ser retenidos por el suelo, entonces el agua freática no es contaminada. Estos elementos pueden migrar a través del perfil de suelo no solo como componentes solubles sino también en forma particulada. Pueden ser liberados de todos los horizontes, aunque la mayoría tiende a ser inmovilizado en horizontes iluviales (Keller y Domergue, 1996).

El agua es el principal vector para el transporte de metales pesados en la litosfera. Los sólidos presentes en suelos, acuíferos y cuerpos de agua superficiales (por ejemplo sedimentos suspendidos y depositados en ríos, lagos, océanos) pueden atrapar cantidades significativas de metales pesados tóxicos y actuar como reservorios en los diversos ciclos hidrológicos que tienen lugar en la superficie de la tierra (Bourg y Loch, 1995).

Las propiedades de los suelos que afectan las reacciones y el transporte de los metales son: área superficial, temperatura, pH, Eh, porcentaje de materia orgánica, densidad aparente, distribución del tamaño de partículas, tipo y cantidad de arcillas, forma de los metales, composición de la solución del suelo, capacidad de intercambio iónico, tipo y cantidad de óxidos metálicos. Mientras que los procesos de retención y liberación de metales en suelos incluyen las reacciones de intercambio iónico, precipitación/disolución y adsorción/desorción (Amacher *et al.*, 1986; Evans, 1989; Kabata-Pendias, 1995; Salomons, 1995).

Para predecir el riesgo a corto plazo (5 a 10 años) es necesario entender cómo las propiedades del suelo determinan la movilidad y por tanto, la lixiviación y movilidad de los metales pesados. En algunos casos el impacto presente puede ser pequeño; sin embargo, puede incrementar si la capacidad del suelo para la retención de contaminantes cambia o, cuando las variables que controlan la interacción entre el suelo y la solución del suelo cambian. El efecto sobre la concentración de los contaminantes inorgánicos es no lineal y puede dar como resultado grandes incrementos en las concentraciones en cortos períodos de tiempo. Ejemplos de estos cambios son en uso de suelo, en hidrología o en depositación ácida (Salomons, 1995).

Existen irregularidades en cuanto a la movilidad de los elementos en los diferentes suelos; más aún, no se puede utilizar una sola propiedad del suelo para clasificarlo. La movilidad relativa de un elemento con respecto a otro es enorme, por lo que no se pueden generalizar estas relaciones; por lo tanto, la movilidad relativa de los elementos traza a través de los suelos es muy variable (Korte *et al.*, 1976).

Es necesario realizar estudios sobre el fraccionamiento de los metales pesados para obtener sus patrones de distribución, determinar su biodisponibilidad y toxicidad en plantas, animales y humanos; así como evaluar la capacidad del suelo como un compartimiento para almacenarlos y, explicar la manera en que pueden lixivarse de este (Keller y Védy, 1994).

Factores que intervienen en la sorción de los metales pesados

a) Potencial de Hidrógeno: pH

La reacción del suelo es el factor predominante que controla el comportamiento químico de los metales y otros importantes procesos en el suelo. El pH del suelo se aplica a la concentración de iones H^+ presentes en la solución de los poros del suelo, la cual está en equilibrio dinámico con las superficies cargadas negativamente de las partículas del suelo. Los iones hidrógeno están fuertemente unidos a las cargas superficiales negativas y tienen la capacidad de reemplazar a la mayoría de los otros cationes (Alloway, 1990).

El pH del suelo generalmente incrementa con la profundidad en regiones húmedas, donde las bases son lixiviadas hacia abajo del perfil de suelo y puede disminuir en ambientes áridos, donde la evaporación causa que las sales se acumulen en horizontes superiores (Alloway, 1990).

De acuerdo a muchos autores, el pH es el principal factor en la determinación de la capacidad del suelo para adsorber metales pesados (Bourg, 1995); siendo mayor su influencia en suelos arenosos y con bajo contenido de materia orgánica (Shuman, 1975), debido a que el pH y Eh son factores críticos que determinan la naturaleza de la interacción entre las arcillas, metales pesados y algunos iones de transición (Mortland, 1975).

La liberación potencial de metales de suelos contaminados está dada por cambios en las condiciones redox (Eh) y pH principalmente, por lo que su caracterización con respecto a su capacidad amortiguadora es indispensable para pronosticar a mediano y largo plazo los procesos de movilización (Calmano *et al.*, 1996).

La solubilidad y, consecuentemente la movilidad de metales unidos a sólidos, puede ser incrementada al disminuir el pH, ya que mediante este proceso se pueden disolver y/o desorber metales de las fases sólidas (Bourg, 1995). Así se tiene que, con la disminución del pH, aumenta la solubilidad y adsorción de Al, Co, Cu, Fe, Zn y más particularmente de Mn, disminuyendo la del molibdeno (Loué, 1988). La sorción del Cd es mas dependiente del pH que la del Pb (Appel y Ma, 2002).

En suelos ácidos se ha reportado un incremento de la lixiviación sobre la depositación de Mn y Zn (Kabata-Pendias, 1995). La adsorción de Zn se modifica rápidamente con pequeños cambios en el pH. A pH de 8.0 tiene lugar una precipitación química del Zn y entonces es retenido como sólido en el sistema (Shuman, 1975).

La forma precipitada de Cu predomina en suelos con pH alto; sin embargo, al disminuir 1.2 el pH, puede incrementar la concentración de formas fácilmente solubles hasta en un 20% (Alva *et al.*, 2000).

b) Condiciones redox

La disponibilidad de oxígeno (condiciones redox) en suelos y sedimentos determina la movilidad de los contaminantes y parámetros que controlan la presencia o ausencia de hidróxidos de Fe y Mg.

Las condiciones redox influyen sobre la movilidad de los metales de dos formas:

- 1) Cambia directamente la valencia de ciertos metales (por ejemplo bajo condiciones reductoras el Fe^{+3} es transformado en Fe^{+2}). Por ser los iones reducidos más solubles, se ha observado un incremento en la concentración de Mn, Fe y As en ambientes reductores.
- 2) Cambios redox también pueden afectar indirectamente a los metales. Bajo condiciones reductoras puede tener lugar la reducción de sulfatos a sulfuros metálicos pasando a su fase estable.

El efecto indirecto también se puede dar, cuando los contaminantes están asociados con componentes sujetos a cambios redox; es el caso de los metales asociados a óxidos e hidróxidos de Fe y Mn. El Fe es un parámetro controlador importante. La inundación y

acidificación son ejemplos de impactos que pueden causar inestabilidad en los hidróxidos de Fe, cuando esto ocurre, se movilizan los metales asociados con hidróxidos de Fe y Mn (Salomons, 1995; Lee y Saunders, 2002).

c) Materia orgánica

La materia orgánica juega un papel importante en la regulación del comportamiento de los contaminantes del suelo. Tiene una alta capacidad de almacenamiento de metales y microcontaminantes orgánicos; además, es la interfase entre el suelo y la atmósfera, así como entre el suelo y las plantas. Es la parte del suelo directamente expuesta a prácticas agrícolas y a la entrada atmosférica de contaminantes. El incremento en la concentración de materia orgánica causa una elevación en la retención de contaminantes. Para suelos agrícolas el cambio en la concentración de materia orgánica en la superficie del suelo puede ser drástico. El contenido de materia orgánica no es un parámetro constante de la capacidad controladora. Cambios en el uso del suelo pueden afectar su capacidad de retención de químicos. Además, bajos contenidos de materia orgánica pueden afectar la distribución de elementos químicos sobre el suelo y la solución del suelo. Mientras la materia orgánica es capaz de retener químicos en suelo y sedimento, los productos de su ruptura son capaces de movilizar metales pesados y microcontaminantes orgánicos. El ciclo de la materia orgánica en los suelos cambia debido a la acidificación, cambios en la hidrología y cambios en el uso del suelo. Estos cambios se reflejan en contenidos más altos de materia orgánica disuelta e incremento en el lixiviado de la materia orgánica disuelta en aguas superficiales. La materia orgánica disuelta no solo moviliza los metales pesados, sino que también afecta su biodisponibilidad (Salomons, 1995).

Cuando los metales pesados son adicionados a suelos, experimentan una complejación con ligandos, que pueden ser constituyentes químicos orgánicos que se combinan con los metales en complejos químicos (Novotny, 1995). La materia orgánica desempeña un papel importante en la energía de unión con los metales pesados (Mc Laren *et al.*, 1986).

La concentración de carbono orgánico es uno de los factores más importantes involucrados en la solubilización y subsecuente migración de los metales a través del suelo (Bourg, 1995). La materia orgánica adsorbe cantidades considerables de cationes inorgánicos (Boekhold y VanderZee, 1992; Novotny, 1995). Sin embargo, su efectividad para adsorber metales pesados depende de sus propiedades de *quelación* (Petruzzelli *et al.*, 1978).

Los metales pesados fácilmente móviles, como Zn y Cd, generalmente están unidos a compuestos orgánicos, lo mismo que Cu y Mo (Kabata-Pendias, 1995). Estas uniones son importantes en la transferencia de estos elementos a los sistemas biológicos, ya que los sustratos orgánicos están involucrados en los procesos metabólicos y por tanto, podrían constituir los principales acarreadores para que los metales sean transferidos dentro de la cadena trófica (Förstner, 1995).

El Cu y el Pb están muy relacionados con la materia orgánica, por lo que su solubilidad está fuertemente relacionada con el desarrollo de ésta (Miller y McFee, 1983; Bourg, 1995). El Co forma complejos orgánicos, principalmente con ácidos fúlvicos; de

esta manera es móvil durante un corto período. Estas asociaciones son inestables y no pueden migrar grandes distancias (Bourg, 1995).

Además, las raíces liberan CO₂ y exudados de compuestos orgánicos, los cuales son responsables de la intensa actividad microbiana en la zona interfacial entre las raíces y el suelo llamada "rizosfera". Las raíces de las plantas modifican las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo que los rodea y esto influye en la biodisponibilidad de algunos elementos químicos (Alloway, 1990).

d) Textura

Las variaciones en textura, composición y mineralogía pueden ser usadas para diagnosticar propiedades en la identificación de la fuente del material y la historia de su transporte. Así, cuando se presenta un alto contenido de arcilla tipo montmorillonita, se trata de un material químicamente activo que actúa como depósito de nutrimentos y metales pesados (Vaithiyathana *et al.*, 1992).

Las diferencias en el tamaño de arena, limo y arcilla influyen en la cantidad y fuerza de la unión de los elementos. La retención de metales pesados se incrementa al disminuir el tamaño de la partícula. Los metales pesados son transportados rápidamente al manto freático en suelos arenosos al ser transportados en partículas finas suspendidas (Zhang *et al.*, 2003)

Las fracciones granulométricas más finas derivan de minerales de fácil intemperización, los cuales son las principales fuentes de microelementos; por ejemplo, los minerales de los basaltos que son ricos en Fe, Mn, Cu y Zn; mientras que las fracciones residuales están compuestas por minerales más resistentes y pobres en microelementos (Loué, 1988).

Los sedimentos arcillosos contienen mayores cantidades de metales pesados que los arenosos. Esto se relaciona con un incremento general en la concentración de metales pesados de las fracciones gruesas a las finas. Los elementos Fe, Mn, Pb, Cu, Zn, Ni, Cr, Co y As se presentan principalmente en partículas menores a 20 µm, con una concentración aproximadamente 50% más alta que en las fracciones de sedimentos gruesos y arena (Saeki *et al.*, 1993). El aumento en la concentración de metales en el sedimento fino se debe al incremento del área superficial específica y las propiedades superficiales de los minerales de arcilla. La concentración y relación entre elementos, refleja la composición mineralógica de fracciones con diferente tamaño de partícula (Vaithiyathana *et al.*, 1992).

El tamaño de la partícula está íntimamente relacionado con su capacidad de depositación y con la superficie disponible para las reacciones químicas. (Vaithiyathana *et al.*, 1992). Una gran área superficial incrementa los procesos como la separación de elementos traza por adsorción superficial, formación de quelatos y coprecipitación, como respuesta a las fracciones geoquímicas activas de los elementos traza liberados por fuentes antropogénicas (Colman y Sanzolone, 1992).

El limo atenúa al Pb y al Zn; Ni, Cr y Cd migran rápidamente a través de suelos arenosos, mientras que en suelos con mucha arcilla lo hacen muy lentamente. El Pb y Cu son móviles en suelos arenosos. El movimiento hacia diferentes profundidades de la

columna de suelo está relacionado con la textura. Esta relación no parece ser un reflejo de la C.I.C., sino más bien está relacionada con el área superficial y el porcentaje de óxidos de hierro libres. La superficie de adsorción es un importante mecanismo de atenuación para los cationes divalentes, mientras que los óxidos de hierro libres lo son para los elementos presentes como aniones (Korte *et al.*, 1976).

e) Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico es la propiedad de los minerales de arcilla y la materia orgánica, para adsorber cationes de la fase líquida del suelo, desadsorbiendo al mismo tiempo, cantidades equivalentes de otros cationes. Entre las mayores repercusiones de esta propiedad se tiene el papel del suelo como depurador natural, al permitir la retención de elementos contaminantes incorporados al suelo (Porta *et al.*, 1990); de tal manera que, al hablar de arcilla y materia orgánica, se refiere implícitamente a la capacidad de intercambio catiónico; sin embargo, es necesario remarcar que la interacción de los cationes metálicos con arcillas incluye también adsorción por intercambio iónico (Mortland, 1975). Por ejemplo, para Cd se ha determinado que existe un efecto directo de la capacidad de intercambio catiónico sobre la adsorción de este elemento (Basta *et al.*, 1993).

Para los contaminantes inorgánicos se debe tomar en cuenta la capacidad de adsorción tanto de las partículas orgánicas como de las inorgánicas. La capacidad de adsorción está relacionada con el área y propiedades superficiales de las partículas, las pequeñas partículas como los minerales de arcilla tienen una alta capacidad de adsorción. Las arcillas y otros compuestos como granos de cuarzo y feldespato generalmente están relacionados con hidróxidos de Fe y Mn, y con sustancias orgánicas. Estas uniones, regulan la concentración de la solución (Salomons, 1995).

Los componentes sólidos tienen la capacidad de absorber iones, pero esto difiere entre materiales, estando fuertemente influenciada por las condiciones prevalecientes de pH y redox, así como por las concentraciones relativas de los iones presentes en la solución acuosa del suelo. La mayoría de los metales pesados existen principalmente como cationes en la solución del suelo y su adsorción, por tanto, dependen de la densidad de cargas negativas en la superficie de los coloides del suelo (Alloway, 1990).

El Cd es el elemento más móvil, seguido por Zn y Cu; mientras que el Pb es poco móvil o inmóvil (Pueyo *et al.*, 2003)

OBJETIVOS

Caracterizar algunos perfiles de la planicie aluvial de la cuenca alta del río Lerma, incluyendo propiedades físicas y químicas.

Determinar la concentración de Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en los horizontes de dichos perfiles para establecer su distribución a lo largo del perfil.

Definir la distribución de los metales en las diferentes fracciones del suelo a través de una extracción secuencial.

Inferir la adsorción y movilidad de los metales en el suelo relacionando su concentración con las características físicas y químicas del suelo.

JUSTIFICACIÓN

Con el acelerado desarrollo industrial del Estado de México (Fig. 4), se ha incrementado la cantidad de desechos industriales liberados hacia el río Lerma, trayendo como consecuencia, un alto grado de contaminación de este cuerpo de agua. Existe una gran cantidad de contaminantes que tienen repercusiones sobre el sistema, el presente trabajo se enfoca a los metales pesados y su distribución, debido a que son considerados como elementos tóxicos que pueden ser bioacumulables, integrarse a la red trófica o a los ciclos biogeoquímicos, con lo que en un momento determinado pondrían en peligro la salud humana, además de alterar de manera irreversible al ecosistema al que se integren.

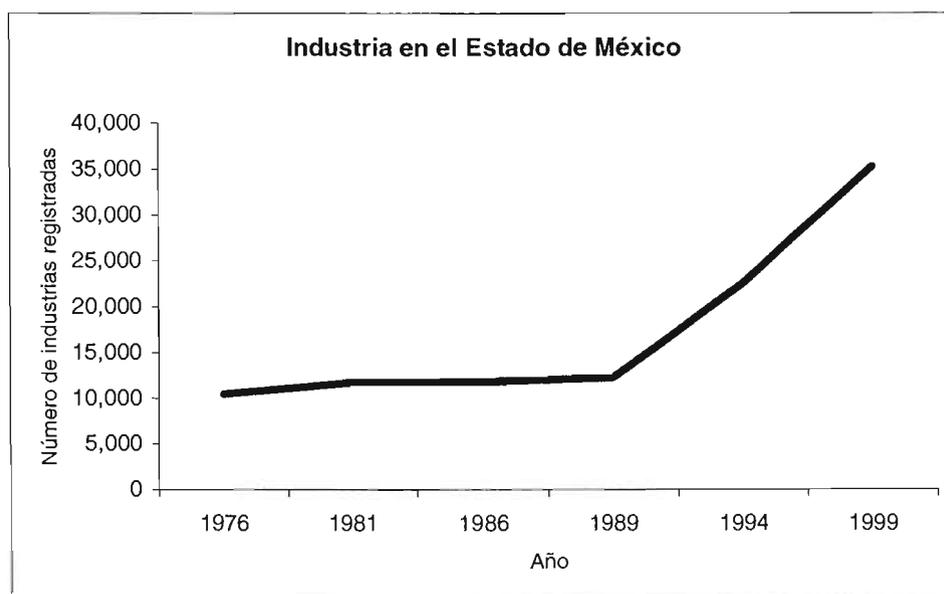


Figura 4. El crecimiento industrial del Estado de México desde 1976 a 1999 (Elaboración propia con base en los censos económicos realizados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática).

Al utilizar el agua del río Lerma como fuente importante para el riego de cultivos, puede haber una migración de contaminantes hacia el suelo, los cuales se integrarían a redes tróficas o bien a cuerpos de agua subterránea. Por tanto, es importante conocer la distribución de estos elementos en el suelo, así como las características de éste que se considera tienen un control sobre su disposición para así inferir la vía que siguen los contaminantes y el riesgo potencial dentro de la cuenca.

METODOLOGÍA

Muestreo

Con base en el trabajo “Caracterización de metales pesados en suelos irrigados en la cuenca alta del río Lerma” (Balderas, 1998) se eligieron las siguientes zonas: el Cerrillo “Vista Hermosa”, Ixtlahuaca, Temascalcingo, Solís y Atlacomulco, Estado de México, para la realización de un perfil de suelo en cada una de ellas, teniendo como factor común la ubicación de todos ellos en la terraza aluvial de la cuenca alta del río Lerma. En él se menciona a estos sitios con concentraciones de al menos uno de los metales a analizar que rebasan límites consultados en muestras de suelo superficial. Además, se eligió una zona “testigo” dentro de la misma cuenca, en los terrenos del campus El Cerrillo “Piedras Blancas” de la Universidad Autónoma del Estado de México (Fig.6).

Los perfiles se realizaron a una profundidad máxima de 2 m, en sitios con presencia de cultivos. Se realizó la descripción de cada perfil, considerando inicialmente la ubicación y factores ambientales del sitio; se definieron los horizontes del perfil, para posteriormente realizar el estudio de la morfología de cada uno de ellos (Fig. 5) y finalmente se colectó una muestra con un peso aproximado de 2 Kg para cada horizonte descrito.

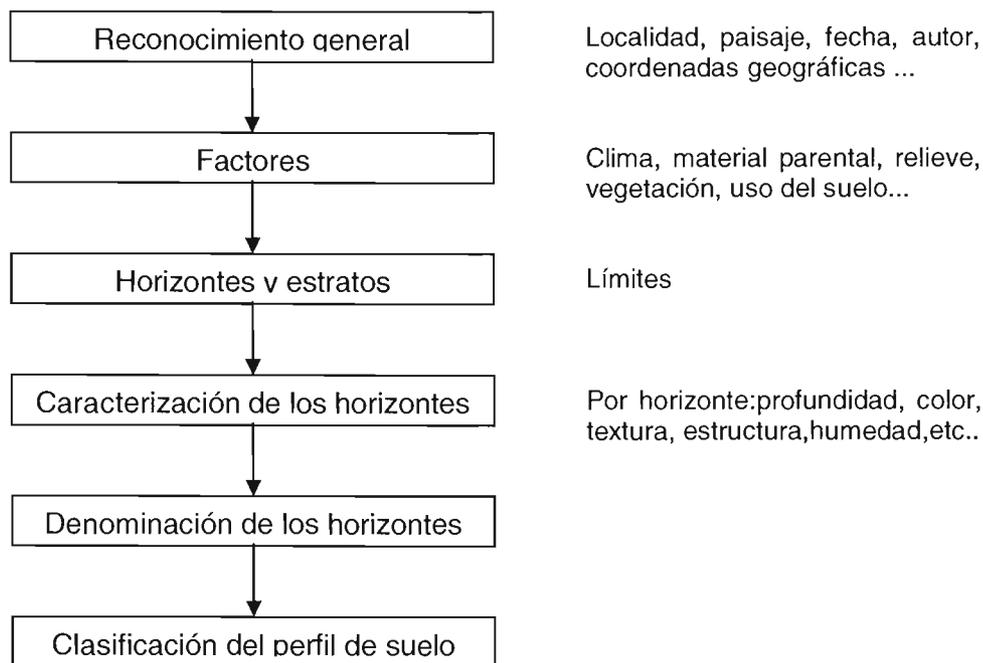


Figura 5. Diagrama de flujo del procedimiento a seguir para la descripción de un perfil de suelo (Siebe *et al.*, 1996).

Análisis de laboratorio

Las muestras se secaron al aire, fueron homogenizadas, molidas y tamizadas con una malla de 2 mm para las determinaciones de los análisis físicos y químicos; mientras que para determinar los metales pesados totales se utilizó un tamiz malla 100. Cabe señalar que para todas las determinaciones se utilizó peso constante y que todas se realizaron por duplicado.

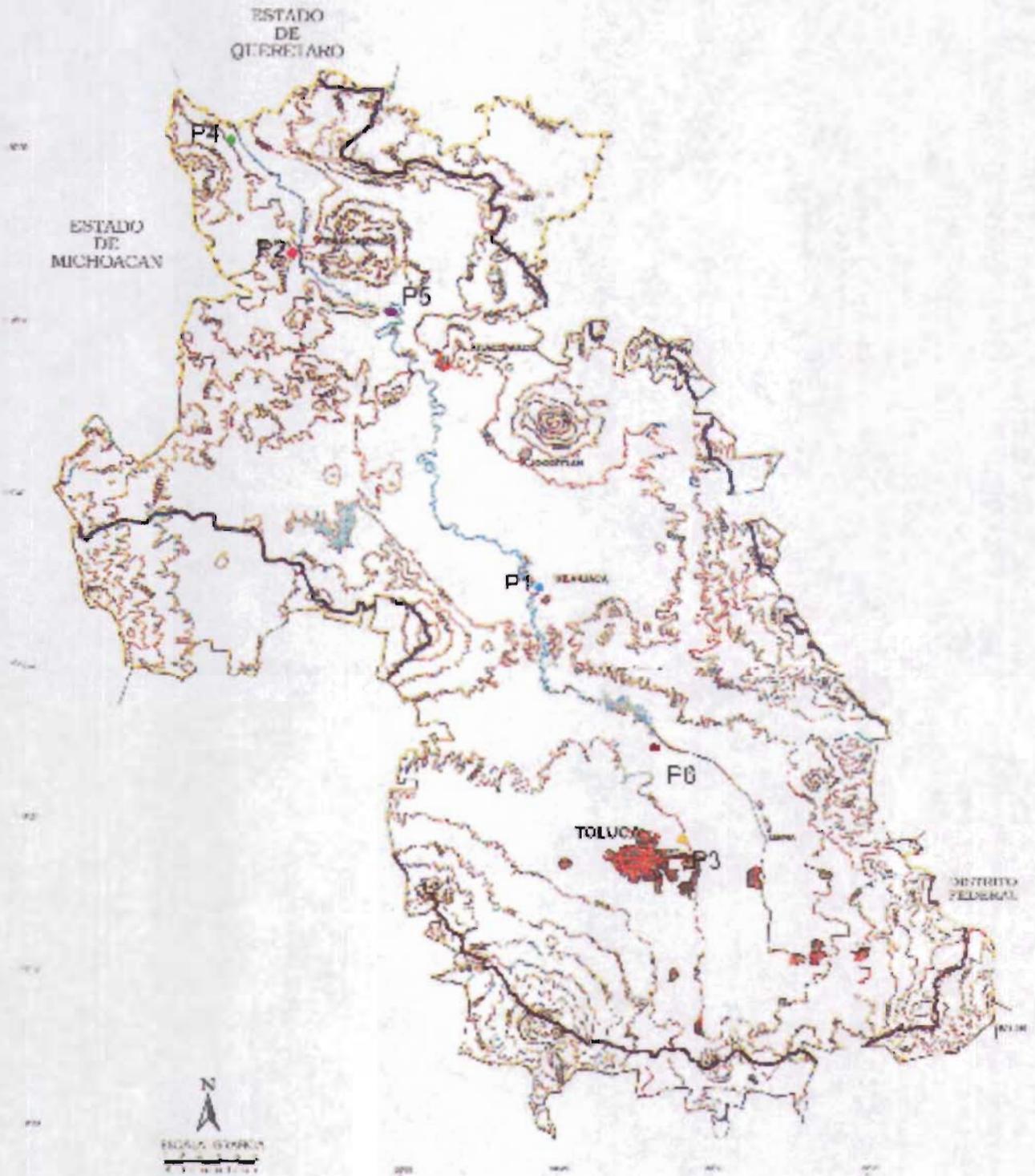


Figura 6. Mapa de la cuenca alta del río Lerma, en el que se localizan los perfiles de estudio.

El análisis de laboratorio fue dividido en dos etapas: i) los análisis físicos y químicos que incluyeron las determinaciones de potencial redox, pH, porcentaje de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, cationes intercambiables, textura, color, densidad aparente, densidad real y porcentaje de porosidad, y ii) el análisis de metales pesados.

La conductividad eléctrica se midió colocando 10 g de suelo a los que se añadieron 50 mL de agua, se agitó la solución y se dejó reposar 24 h. Se determinó la conductividad eléctrica del sobrenadante con un puente de conductividad, calibrado con una solución de KCl 0.01 N a 25°C (Richards, 1990).

Para determinar el pH se pesaron 10 g de suelo a los cuales se les agregaron 25 mL de agua destilada hervida, se agitaron durante 30 minutos y se leyó, empleando un potenciómetro Corning modelo 340 con electrodo de vidrio combinado, al que previamente se había ajustado el pH utilizando patrones de referencia de pH 4, 7 y 10. En el caso del pH potencial se empleó la misma técnica, solo que en lugar de agua destilada se agregó una solución de KCl 1N pH 7 (Jackson, 1982).

El porcentaje de materia orgánica se obtuvo pesando de 0.2 g de muestra, que fue oxidada con dicromato de potasio 1N y H₂SO₄ concentrado, agitando durante un minuto y dejando reposar 30 minutos, para posteriormente ser titulada con sulfato ferroso 0.5 N, obteniendo un vire de naranja a verde esmeralda, de acuerdo con Walkey y Black (1947 in: Jackson, 1982).

Para determinar la capacidad de intercambio catiónico total se pesó 1 g de muestra, a la que se le agregó CaCl₂ 1N pH 7, alcohol etílico y NaCl 1N pH 7, centrifugando 5 veces cada uno, desechando el sobrenadante de los dos primeros y guardando el del último, para después titular el calcio con el método del versenato (EDTA) hasta el vire de púrpura a azul, de acuerdo con Jackson (1982).

Para los cationes intercambiables se empleó el método de Jackson (1982), en el que se pesa 1 g de muestra, se le agregan 10 mL de acetato de amonio 1N pH 7, se centrifuga 5 minutos a 3000 rpm, se guarda el sobrenadante; esto se repite 5 veces. Se titula por el método del versenato (EDTA) para determinar Ca + Mg, a otra alícuota se le agrega NaOH y murexida, se titula con EDTA hasta un vire de rosa a morado para determinar Ca. El Na y K se leyeron en un flamómetro Corning modelo 410.

En el caso de la textura se empleó el método de Bouyoucos (1963), que consiste en pesar 50 g de muestra, se agrega metasilicato de sodio, oxalato de sodio y agua de la llave, se agita durante 10 minutos en un eskimo, se afora a 1000 mL, se agita durante 1 minuto, dejando reposar 40 seg., se toma la temperatura y la primer lectura con un hidrómetro Bouyoucos, se deja reposar durante 2 h y se toma la segunda lectura. Se realizaron los cálculos correspondientes para determinar la granulometría y se llevaron al triángulo de texturas para obtener la clase textural.

Las concentraciones totales de metales pesados fueron determinadas pesando 0.5 g de muestra a los que se agregaron 8 mL de HNO₃ y 2 mL de HCl concentrados, se pusieron a digerir en un bloque de digestión Büchi durante 4 h para que posteriormente el líquido fuera pasado a través de papel filtro del número 5 y se aforara a 50 mL con agua desionizada; después de lo cual se realizó la determinación de los metales en un equipo de absorción atómica Perkin Elmer modelo 3110.

En las muestras de suelo que se encontraron mayores concentraciones de metales pesados totales se realizó la extracción secuencial, mediante la técnica de Tessier *et al.* (1979), modificada por Vaca-Paulín (1999), la cual consiste en pesar 2 g de suelo tamizado, colocados en tubos de polipropileno; se agregaron 16 mL de $MgCl_2$ 1M pH 7, agitando 1 h a 150 rpm con temperatura de 25°C, posteriormente se centrifugó a 3500 rpm durante 30 minutos para obtener la fracción intercambiable; para la fracción ligada a carbonatos se agregaron 16 mL de CH_3COONa 1M pH5 en CH_3COOH agitando 5 h a 150 rpm, para luego centrifugar a 3500 rpm durante 30 minutos, guardando el sobrenadante para su posterior determinación por espectrofotometría de absorción atómica. Posteriormente, se agregaron 40 mL de $NH_2OH \cdot HCl$ 1 M en CH_3COOH 25% pH 2, se agitó 5 h a 150 rpm con temperatura de 85°C, y se centrifugó a 3500 rpm durante 30 minutos, obteniendo el sobrenadante para determinar la fracción ligada a óxidos de Fe y Mn. Para obtener la fracción orgánica y los sulfuros, se agregaron 6 mL de HNO_3 0.02 M, 16 mL de H_2O_2 30% pH 2 y 10 mL de CH_3COONH_4 1M en HNO_3 6%, se agitó durante 5 h a 150 rpm con temperatura de 85°C y se centrifugó a 3500 rpm durante 30 minutos.

Por último, se realizó la determinación de los metales en un equipo de absorción atómica Perkin Elmer modelo 3110, realizando las curvas de calibración de los metales usando como matriz los diferentes extractantes manejados. Cabe mencionar que los límites de detección del equipo utilizado se muestran en la Tabla 1.

Elemento	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Límite de Detección	0.028	0.12	0.078	0.17	0.14	0.19	0.018

Tabla 1. Límite de detección de metales pesados ($\mu g/g$, peso seco).

Análisis estadístico.

La distribución en sentido vertical en los diferentes sitios de muestreo de los metales pesados y factores fisicoquímicos se comparó mediante estadística descriptiva (Montgomery, 1991).

Se realizó un análisis de correlación múltiple con el objeto de establecer relaciones entre los parámetros físicos y químicos medidos con las concentraciones de los metales pesados totales en el suelo y otro, considerando el fraccionamiento de los metales (Steell y Torrie, 1988; Wayne, 1991; Hair *et al.*, 2000).

También se llevó a cabo un análisis de componentes principales entre las características físicas y químicas del suelo, y los metales pesados totales, con el fin de establecer las variables más importantes (Steell y Torrie, 1988; Wayne, 1991)

Todos los análisis se realizaron utilizando el programa STATGRAPHICS Plus for Windows Version 2.0 (1/5/96).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características de los perfiles de suelo

En general, se trata de suelos de cultivo cercanos al río Lerma. Desarrollados, profundos, en los que han existido procesos pedogenéticos importantes. Todos son de origen aluvial, por lo que el material parental se encuentra intemperizado, facilitando el desarrollo del suelo. En la mayoría de estos perfiles el manto freático se encuentra a menos de 2 m de profundidad.

Perfil 1

1. Descripción en campo

Se localiza en el Rancho "El Puente", municipio de Ixtlahuaca, Estado de México, fue descrito el 12 de marzo de 1998. Se trata de un perfil relativamente homogéneo, en el que se encuentra un horizonte A mólico y un B árgico, por lo que fue clasificado como Phaeozem lúvico. En él existe saturación de agua del subsuelo, ya que mientras se realizaba la descripción entraba agua al perfil desde la parte inferior, en donde se observaron algunas condiciones de oxido reducción, como son manchas que reaccionan con H_2O_2 , que pueden ser de óxidos de manganeso y la coloración olivácea en húmedo del último horizonte. Las características generales descritas para este perfil son las siguientes:

Fecha: 12 de marzo de 1998	Cultivos: avena, trigo, maíz, cebada, trébol.
Localidad: rancho "El Puente", Ixtlahuaca, Estado de México	Factores limitantes: inundación, manto freático, heladas y contaminación
Coordenadas geográficas: 19°34'19" latitud norte y 99°46'43" longitud oeste	Tipo de tecnología: herbicidas, pesticidas, rotación de cultivos
Altitud: 2520 m	Nivel de manejo: alto
Geología: aluvión	Tenencia: propiedad privada
Geoforma: terraza aluvial deposicional actual	Clase de tecnología: riego, sin drenaje, en láminas (río, anual)
Pendiente: menor al 1%	Suelo: Phaeozem lúvico
Posición del perfil en la geoforma: mitad	Profundidad: 143 cm
Relieve: plano	Horizontes:7
Litología: aluvión	
Litología superficial: < 0.01%	
Tamaño que domina: gravilla	
Grietas superficiales: 1cm de ancho (por contracción del material de origen)	
Afloramientos rocosos: <2%	
Erosión: ligera en surcos	
Drenaje superficial: moderado	
Manto freático: 3 m	
Material parental: muy alterado (transportado)	
Edad estratigráfica: Cuaternario	
Uso del suelo: agrícola-praticola	
Intensidad de uso: anual	
Años de uso: más de 100	

A continuación se detalla la descripción de cada uno de los horizontes definidos:

Ap	0 – 30 cm	Color gris muy oscuro en húmedo (7.5 YR 3/1) y grisáceo pardo en seco (10 YR 5/2), textura franca, estructura migajosa, consistencia muy friable, no adhesivo, plástico, húmedo, reacción débil a H ₂ O ₂ , sin manchas, límite claro y uniforme.
Ag1	30 – 44 cm	Color pardo oscuro en húmedo (7.5 YR 3/2) y pardo pálido en seco (10 YR 6/3), textura franca, estructura en bloques subangulares débil, consistencia friable, ligeramente adhesiva, plástico, húmedo, reacción fuerte al H ₂ O ₂ y débil al NaF, manchas abundantes, límite difuso y ondulado.
Btg1	44 – 67 cm	Color pardo oscuro en húmedo (7.5 YR 3/2) y pardo pálido (10YR 6/3), textura franco limosa, estructura en bloques angulares moderada, consistencia friable, ligeramente adhesiva, ligeramente plástico, húmedo, reacción fuerte al H ₂ O ₂ y débil al NaF, manchas abundantes, límite difuso y plano.
Btg2	67 – 90 cm	Color negro rojizo en húmedo (2.5 YR 2.5/1) y gris pardo pálido en seco (10YR 6/2), textura franco limo arcillosa, estructura en bloques angulares débil, consistencia friable, ligeramente adhesiva, ligeramente plástico, húmedo, reacción débil al H ₂ O ₂ , manchas abundantes, límite difuso y plano.
Bg1	90 – 116 cm	Color rojizo oscuro en húmedo (5 YR 3/2) y gris en seco (7.5 YR 5/1), textura franco limo arenosa, estructura en bloques angulares débil, consistencia friable, ligeramente adhesiva, plástico, húmedo, reacción débil al H ₂ O ₂ , manchas escasas, límite difuso y plano.
Bg2	116 – 143 cm	Color gris muy oscuro en húmedo (5 Y 3/1) y gris en seco (10 YR 5/1), textura franco areno limosa, estructura en bloques angulares débil, consistencia muy friable, adhesivo, ligeramente plástico, saturado, reacción moderada al H ₂ O ₂ , sin manchas, límite abrupto y plano.
CR	> 143 cm	Color olivo pálido en húmedo (2.5 Y 5/3) y pardo muy pálido en seco (10 YR 8/3), textura franco areno limosa, estructura en bloques angulares débil, consistencia muy friable, muy adhesivo, ligeramente plástico, saturado, reacción moderada al H ₂ O ₂ , sin manchas, límite en forma de lenguas.

2. Características Físicas

a) Densidad aparente

La densidad aparente es menor para el horizonte con mayor contenido de materia orgánica y es relativamente homogénea para el perfil, va de 1.15 a 1.32 gr/cm³, (Fig.7). Lo que nos indica que se trata de horizontes con algún contenido de arcilla y una estructura desarrollada (Aguilera y Martínez, 1986).

b) Densidad real

Los valores obtenidos son en general más bajos que los esperados en suelos minerales, ya que van de 2.6 a 2.175 gr/cm³. Esto es determinado por los minerales y la cantidad de sustancias orgánicas que integran el suelo (Hillel, 1982). Los valores obtenidos son relativamente constantes (Fig.7), por lo que todos los horizontes tienen composición mineralógica similar, derivados del intemperismo del aluvión de origen ígneo, el cual en clima templado da como resultado minerales secundarios como las illitas, vermiculitas, esmectitas y caolinitas. En el caso del horizonte superficial, la presencia de un mayor porcentaje de materia orgánica da como resultado una menor densidad real. (Birkeland, 1999).

c) Porosidad

En general, la porosidad es cercana a 50% (Fig.7), lo cual indica que existe un flujo relativamente adecuado de agua y aire a través del perfil de suelo.

d) Textura

Este perfil muestra una textura franca en los horizontes A; el horizonte Bt es arcilloso, (Fig.7; Tabla 2), lo cual indica procesos de iluviación de arcillas, que a su vez nos llevan a suponer un desarrollo del suelo relativamente alto (Thompson y Troeh, 1980). Entre los procesos que favorecen esta distribución se encuentran el intemperismo dentro del perfil, posterior movimiento en solución a través del agua percolada y precipitación en el horizonte B (Birkeland, 1999).

Por su parte, el agua fluye muy despacio por los horizontes B, por lo que la mayor parte del desarrollo radicular tiene lugar en suelo superficial (Thompson y Troeh, 1980).

Los suelos francos poseen buena penetración, retienen bien el agua y los nutrientes; su fertilidad natural va de media a alta; pierden poca agua y nutrientes por lixiviación; los mejores suelos agrícolas quedan dentro de este rango. Mientras que los suelos franco arcillosos tienen poca penetración de agua, retienen grandes cantidades de humedad, parte de la cual no está disponible para la planta; casi no existe pérdida de nutrientes por percolación (SEP, 1991).

Horizonte	Textura
Ap	Franca
Ag ₁	Franca
Btg ₁	Arcillosa
Btg ₂	Franco arcillosa
Bg ₁	Franco arenosa
Bg ₂	Franco arenosa
CR	Franco arcillosa

Tabla 2. Clases texturales en los distintos horizontes del perfil de suelo del rancho “El Puente”, Ixtlahuaca, Estado de México.

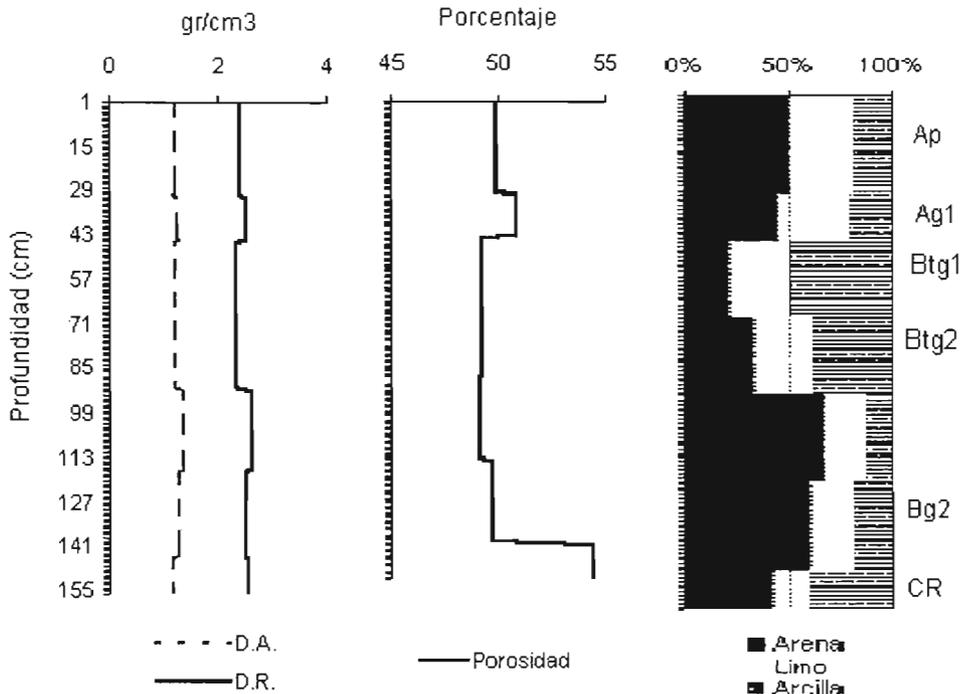


Figura 7. Características físicas: densidades real y aparente, porcentaje de porosidad y textura en los distintos horizontes del perfil de suelo del rancho “El Puente”, Ixtlahuaca, Estado de México.

3. Características Químicas

a) Potencial de hidrógeno (pH)

En todos los horizontes este perfil 1 el pH real, determinado en agua, es **neutro**, con valores que van de 6.99 a 7.31 (Fig. 8), lo cual indica que el suelo está esencialmente saturado con bases y no se encuentra aluminio intercambiable (Boul *et al.*, 1988). El pH_{KCl} es de 0.5 a 1 unidad de pH inferior al pH_{Agua} , y lo que mide es la acidez potencial o de cambio (Porta, 1999). Cabe mencionar que el parámetro que se empleó para clasificar los valores de pH fue el de la USDA (Tabla 3).

pH	Evaluación
< 4.5	Extremadamente ácido
4.5 – 5.0	Muy fuertemente ácido
5.1 – 5.5	Fuertemente ácido
5.6 – 6.0	Medianamente ácido
6.1 – 6.5	Ligeramente ácido
6.6 – 7.3	Neutro
7.4 – 7.8	Ligeramente básico
7.9 – 8.4	Medianamente básico
8.5 – 9.0	Fuertemente básico
9.1 – 10.0	Muy fuertemente básico
> 10.0	Extremadamente básico

Tabla 3. Clasificación del suelo a partir del pH de acuerdo a la USDA (Porta, 1999)

b) Conductividad Eléctrica (CE)

Con respecto a la conductividad eléctrica, se observa que en todos los casos se obtuvieron valores positivos (Fig.8), lo cual indica que se trata de suelos no salinos (Porta, 1999) lo cual concuerda con los valores de pH obtenidos. Al no existir una alta saturación de sales disminuye la posibilidad de movilizar los metales pesados por un incremento en la salinidad (Alloway, 1990).

c) Porcentaje de materia orgánica

El porcentaje de materia orgánica es más alto en el horizonte Ap (3.91%) (Fig. 8), ya que en éste se incorporan los residuos de plantas y animales que la forman (Porta, 1999; INPOFOS, 1997). Aunque no son valores considerados muy altos, debido a la puesta en cultivo que implica una aceleración de la mineralización, de tal manera que la materia orgánica preexistente disminuye en forma exponencial (Rasmussen y Collins, 1991).

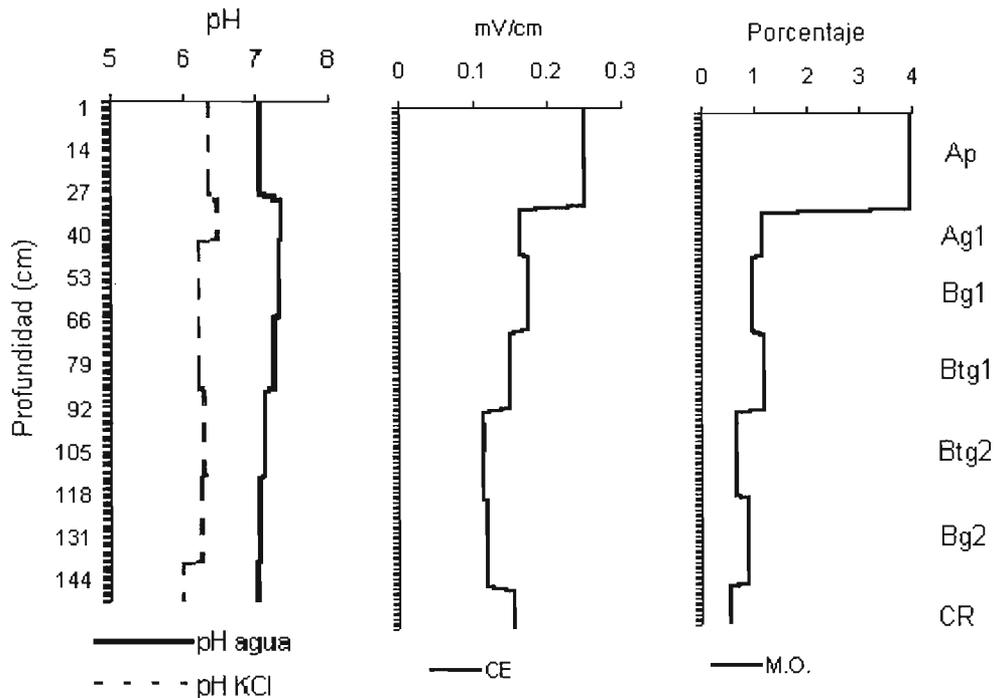


Figura 8. Características químicas: pH, conductividad eléctrica y materia orgánica en los distintos horizontes del perfil de suelo del rancho “El Puente”, Ixtlahuaca, Estado de México.

d) Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.) determinada va de 13 a 30 cmol/kg, y se encuentra en el rango descrito para un Phaeozem, que es de 10 a 50 cmol/kg (Fitzpatrick, 1984). Además, se observa que en los horizontes con mayor contenido de materia orgánica y arcilla la C.I.C. es mayor (Fig. 9), lo cual se debe a que en ambas se encuentran los sitios de cambio (Porta, 1999; INFOPOS, 1997)

De acuerdo con la C.I.C. obtenida, el grado de intemperismo del suelo es bajo y contiene minerales intemperizables primarios. Los minerales arcillosos presentes pueden ser del grupo de la esmectita e illita (Boul *et al.* 1988), reafirmando con ello su existencia en este suelo.

e) Iones intercambiables

El catión dominante es el Ca^{+2} (Fig. 9), que actúa como cementante coloidal al aumentar la cohesión del suelo, frena la dispersión de los agregados y modera la de los coloides, permitiendo la floculación (proceso de naturaleza electrocinética estable mientras se encuentran agentes floculantes: cationes divalentes o trivalentes) (Gaucher, 1971; Baver *et al.*, 1991; Birkeland, 1999).

El contenido de los iones incrementa con la profundidad hasta el horizonte B, debido a que en las partes superiores existe mayor movimiento de agua. Así las arcillas pueden ser dispersadas en la superficie y floculadas en la profundidad, originando el horizonte iluvial (Birkeland, 1999).

f) Porcentaje de saturación de bases

En todos los casos es mayor del 50% (Fig.9), lo cual indica que más de la mitad de los sitios de cambio están ocupados por cationes (INFOPOS, 1997; Porta, 1999). Esta característica del suelo es utilizada para diferenciar el epipedión mólico (Boul *et al.* 1988)

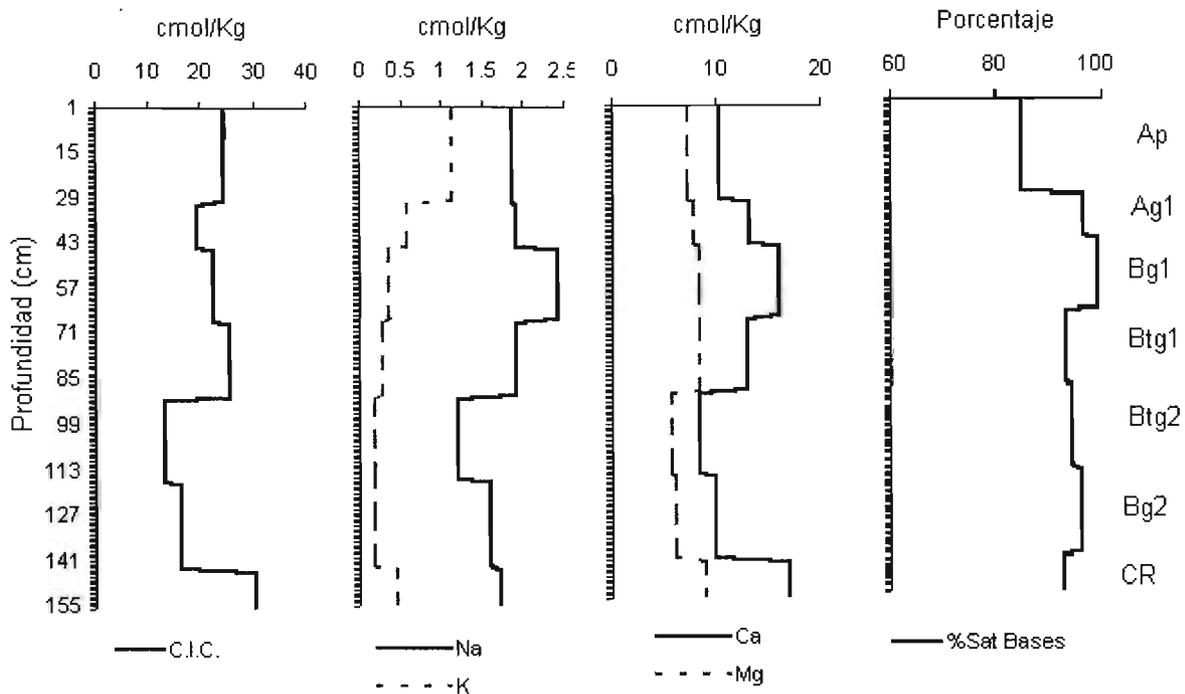


Figura 9. Características químicas: capacidad de intercambio catiónico, iones intercambiables (Na, K, Ca y Mg) y porcentaje de saturación de bases en los distintos horizontes del perfil de suelo del rancho “El Puente”, Ixtlahuaca, Estado de México.

Considerando tanto la descripción del perfil como las características físicas y químicas determinadas, se considera que el **horizonte A** de este perfil presenta características **mólicas**, debido a que su estructura es migajosa, con lo cual no es masivo ni duro, ni tiene estructura secundaria; su color es 7.5 YR 3/1 en húmedo y 10 YR 5/2 en seco, con lo cual se cumple una intensidad menor a 3.5 y una luminosidad mayor a 3.5 en húmedo; su porcentaje de materia orgánica es de 3.91% y el porcentaje de saturación de bases mayor del 50% (84.78%), con una profundidad de 30 cm; con lo cual cumple con los requisitos necesarios para ser clasificado como un horizonte A mólico.

El horizonte Bt1 se describe como un horizonte árgico; es decir, un horizonte subsuperficial en el que existe un incremento en el contenido de arcilla con respecto al horizonte superior. En este caso el porcentaje de arcilla en el horizonte Bt es de 49.2%, incrementando en un 27% con respecto al horizonte anterior, cambiando de una textura franca en el horizonte anterior a arcillosa en el Bt.

De acuerdo con estos horizontes diagnóstico, se trata de un Pheozem, los cuales son suelos con un horizonte A mólico y una saturación de bases del 50% o más y una matriz libre de carbonato de calcio al menos hasta 100 cm de profundidad, o una capa de contraste (contacto lítico o paralítico) entre 25 y 100 cm; y no presenta horizontes de diagnóstico albico, cámbico o vértico. Al presentar un horizonte árgico, se determina que es un **Pheozem lúvico**.

4. Metales Pesados Totales

Los distintos segmentos de la superficie de la tierra tienen diferentes cantidades de elementos traza. Las deficiencias y toxicidades de estos elementos son el resultado de una combinación específica de factores causales, cuya importancia varía con el problema específico y la localización geográfica. Entre los factores involucrados se encuentran: i) el material parental, ya que la mayor parte de elementos traza encontrados en el suelo, se originó de las rocas a partir de las que se formó; ii) agotamiento y contaminación del suelo (Kubota y Allaway, 1983) por emisión de metales al ambiente, como resultado de las actividades humanas, entre las que destacan las industriales y la disposición de residuos domésticos (Wild, 1993).

En la Tabla 4 se comparan diferentes fuentes para cotejar si los metales pesados totales se encuentran en concentraciones mayores a las reportadas como límites.

	Valor típico	Intervalo	Máximo permitido			Rep.Fed. Alemana	Gran Bretaña	Rocas ígneas
			PROY-NOM-005-ECOL-2000	UE, 2002	Swedish EPA, 2002	(Cala-Rivero <i>et al.</i> , 1985)		(Rankama, 1954)
	(Bohn <i>et al.</i> , 1993; Kabata-Pendias, 1995)					(Cala-Rivero <i>et al.</i> , 1985)		(Rankama, 1954)
Cd	0.006	0.01 – 7	39	3	4	3	0.6	0.3
Co	8	1 – 40	-	-	-	—	—	40
Cr	20	5 – 1000	3000	-	-	100	150	250
Cu	20	2 – 100	1500	140	120	100	40	68
Ni	40	10 – 100	-	75	-	50	40	150
Pb	10	2 – 200	300	300	160	100	45	14
Zn	50	10 – 300	2800	300	300	300	75	150

Tabla 4. Valores típicos e intervalo de metales pesados en el suelo (Bohn *et al.*, 1993; Kabata-Pendias, 1995), Valores máximos permitidos para metales pesados dentro del PROY-NOM-005-ECOL-2000, la Unión Europea (2002) y por la Swedish EPA (2002); límites tolerables en suelos tratados con aguas residuales para la República Federal Alemana y para Gran Bretaña (Cala-Rivero *et al.*, 1985), y concentración promedio de metales pesados en rocas ígneas (Rankama y Sahama, 1954). **Nota: Todos los valores están dados en $\mu\text{g g}^{-1}$**

a) Cadmio

El límite de detección de este metal en el espectrofotómetro 0.28; así, aplicando el factor de dilución la concentración de Cd fue menor a $2.8 \mu\text{g g}^{-1}$

b) Cobalto

El cobalto es utilizado por las bacterias en los nódulos de las leguminosas para fijar N atmosférico (Kubota y Allaway, 1983; INPOFOS, 1997). Ninguno de las horizontes del perfil 1 rebasa los límites consultados, con valores de $16.65 \mu\text{g g}^{-1}$ a $33.95 \mu\text{g g}^{-1}$, en donde se observa una ligera tendencia a disminuir la concentración al incrementar la profundidad, encontrando que la mayor concentración se encuentra en el horizonte Ap rico en materia orgánica (Fig. 10), lo que podría deberse a la formación de quelatos, principalmente con ácidos fúlvicos (Bourg, 1995) o bien a que es el horizonte con menor concentración de Ca^{+2} y este elemento es antagónico del Co (McLaren *et al.* 1986).

b) Cromo

Los valores van de 14.60 a $32.60 \mu\text{g g}^{-1}$, observando una tendencia a disminuir la concentración al incrementar la profundidad en los primeros cuatro horizontes, aunque la concentración más alta se encuentra en el horizonte CR, sin rebasar los límites consultados (Fig. 10).

c) Cobre

Este metal es indispensable en suelos ya que se trata de un micronutriente necesario para la formación de clorofila y para catalizar otras reacciones en la planta (INFOPOS, 1997). En general, se observa una tendencia a disminuir la concentración de Cu al incrementar la profundidad del perfil, ya que este metal en particular, presenta una fuerte relación con la materia orgánica (Alva *et al.*, 2000; Vulkan *et al.* 2002), que se hace evidente al encontrar la mayor concentración de Cu en el horizonte más rico en materia orgánica. Las concentraciones determinadas para el perfil 1 van de 42.40 a $7.00 \mu\text{g g}^{-1}$ (Fig. 10).

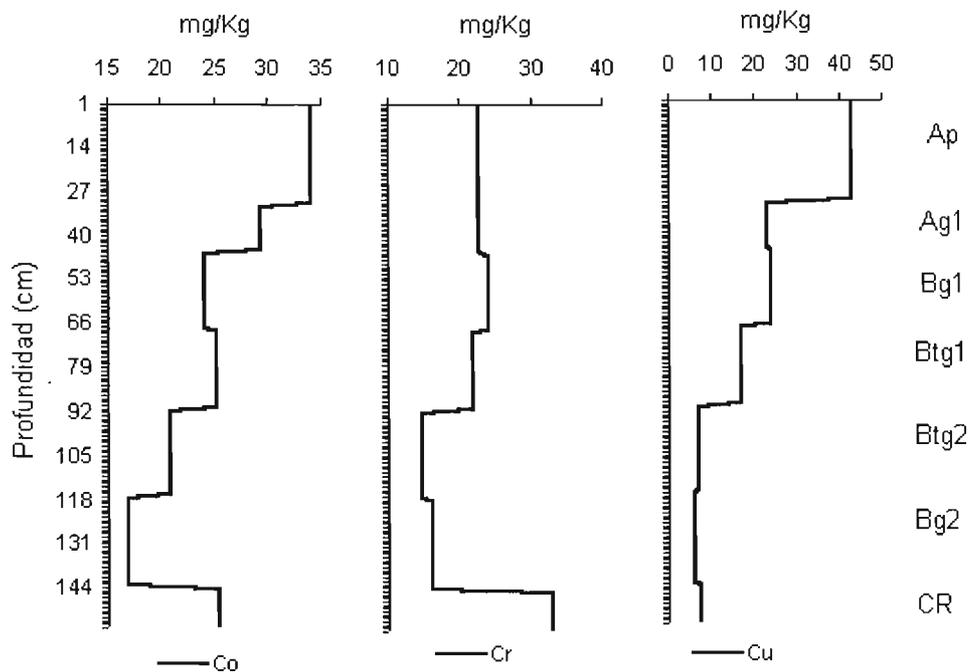


Figura 10. Metales pesados totales: cobalto, cromo y cobre en los distintos horizontes del perfil de suelo del rancho “El Puente”, Ixtlahuaca, Estado de México.

d) Níquel

La mayor concentración de Ni fue determinada en el horizonte A relacionándose también con el mayor porcentaje de materia orgánica, mostrando una tendencia a disminuir a lo largo del perfil, yendo de 22.75 a 37.55 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Fig. 11). El Ni puede reemplazar metales esenciales en las metalo-enzimas y causar alteraciones en los procesos metabólicos (Alloway, 1990).

e) Plomo

El plomo es el más pesado de los metales, no se considera un nutrimento fisiológico debido a que no se le conoce función biológica y por tanto, su acumulación en suelos puede causar contaminación y sus principales efectos se dan sobre la salud animal y humana sin presentar fitotoxicidad (Wild, 1993; Badawy *et al.*, 2002). Sin embargo, en el perfil 1 los valores van de 40.5 a 62.5 $\mu\text{g g}^{-1}$, por lo que no rebasan los límites consultados y se mantienen relativamente constantes dentro del perfil (Fig. 11).

f) Zinc

El Zn es un micronutriente esencial para las plantas que ayuda en la síntesis de sustancias que permiten su crecimiento y la de varios sistemas enzimáticos, entre los que destacan los necesarios para la producción de clorofila y carbohidratos (INPOFOS, 1997). Sin embargo, este elemento también pertenece al grupo de los metales potencialmente más peligrosos para la biosfera; normalmente se desprende de fuentes antropogénicas como son las aguas residuales industriales y agroquímicos (Alloway, 1990).

En el perfil 1 hay mayores concentraciones en el horizonte Ap (80.15 $\mu\text{g g}^{-1}$) y en el Bt₁ (83.60 $\mu\text{g g}^{-1}$), mientras la menor se encuentra en el horizonte Btg₂(46.10 $\mu\text{g g}^{-1}$) (Fig.11), en el primero debido a la tendencia de los metales pesados a permanecer en mayores concentraciones cerca de la superficie del suelo y en el caso de Btg₂, por su relación con los suelos ricos en arcilla (Murray *et al.*, 2004).

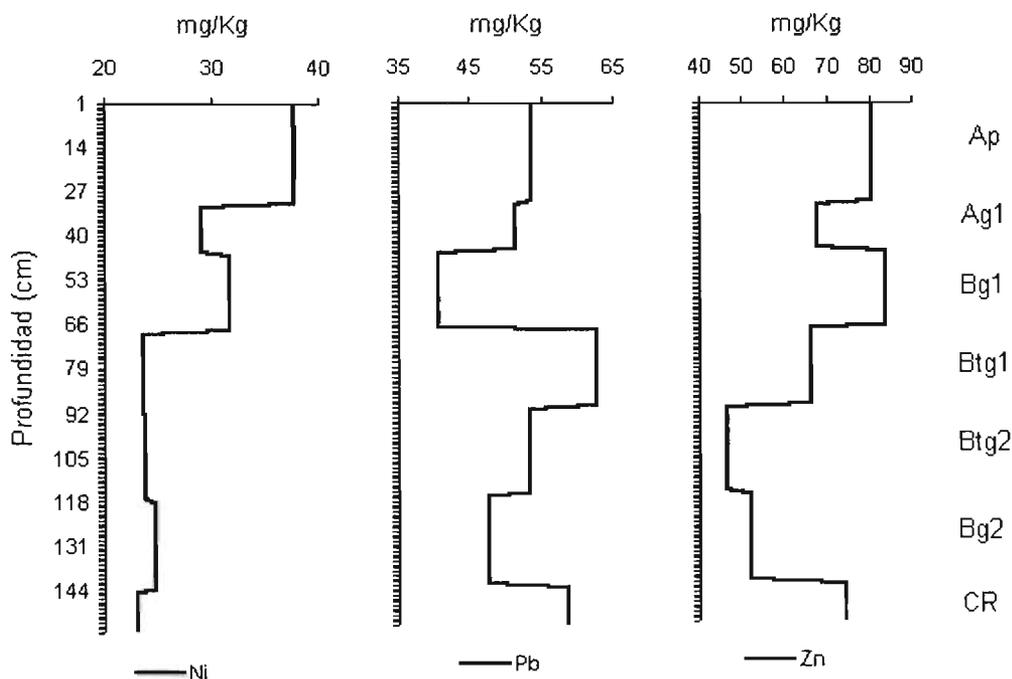


Figura 11. Metales pesados totales: níquel, plomo y zinc en los distintos horizontes del perfil de suelo del rancho "El Puente", Ixtlahuaca, Estado de México.

Perfil 2

1. Descripción en campo

El **perfil 2**, denominado “El Aguaje” y localizado en la ranchería “La Cuadrilla”, Temascalcingo, Estado de México, fue descrito el 13 de marzo de 1998. Se trata de un perfil profundo, homogéneo, de coloración oscura, con un horizonte B cámbico. Al realizar la descripción, también existió entrada de agua desde la parte inferior del perfil, además de existir algunas manchas de óxidos de hierro que podrían sugerir condiciones de oxidoreducción en la parte inferior del perfil. Las características generales del perfil son las siguientes

Fecha: 13 de marzo de 1998	Material parental: muy alterado (transportado)
Localidad: “El Aguaje”, ranchería “La Cuadrilla”, Temascalcingo, Estado de México	Edad estratigráfica: cuaternario
Coordenadas geográficas: 19°55'32" latitud norte y 100°01'38" longitud oeste.	Uso del suelo: agrícola-praticola
Geología: aluvión	Años de uso: 25 años de pradera
Geoforma: terraza aluvial deposicional actual	Cultivos: pastos, maíz, haba.
Pendiente: menor al 1%	Factores limitantes: nivel freático, heladas y contaminación
Relieve: casi plano	Tipo de tecnología: abono
Litología: coluvión	Nivel de manejo: mediano
Litología superficial: < 0.01%	Tenencia: ejido
Tamaño que domina: gravilla	Clase de tecnología: riego en surco cada 15 días, sin drenaje.
Afloramientos rocosos: <2%	Rendimiento: 6 cortes al año
Erosión: ligera en surcos	Suelo: Cambisol eútrico
Drenaje superficial: lento	Horizontes: 6
Manto freático: 110 cm	

Considerando cada horizonte, las características descritas son las siguientes:

Ap	0 – 7 cm	Color negro en húmedo (5 Y 2.5/1) y gris oscuro en seco (5 YR 4/1), textura franca, estructura en bloques angulares desarrollada, consistencia muy friable, no adhesivo, ligeramente plástico, mojado, reacción fuerte a H ₂ O ₂ , sin manchas, límite claro y uniforme.
Bw	7 – 46 cm	Color pardo grisáceo muy oscuro en húmedo (10 YR 3/2) y pálido en seco (10 YR 6/3), textura franco arcillosa, estructura en bloques angulares débil, consistencia friable, no adhesiva, ligeramente plástico, mojado, reacción moderada al H ₂ O ₂ y débil al NaF, manchas escasas de FeO y MnO ₂ , límite difuso y plano.
	B cámbico	
Bu1	46 – 64 cm	Color pardo oscuro en húmedo (10 YR 3/3) y pardo grisáceo en seco (10YR 5/2), textura franco arcillo arenosa, estructura en bloques angulares débil, consistencia friable, no adhesiva, plástico, mojado, reacción débil al H ₂ O ₂ y débil al NaF, manchas escasas de FeO y MnO ₂ , límite difuso y plano.

Bu2	64 – 71 cm	Color pardo oscuro en húmedo (10 YR 3/3) y pálido en seco (10 YR 6/3), textura franco arcillosa, estructura en bloques angulares desarrollada, consistencia muy friable, adhesivo, plástico, saturado, reacción moderada al H ₂ O ₂ y débil al NaF, manchas escasas de FeO, límite difuso y plano.
Bu3	71 – 87 cm	Color pardo grisáceo oscuro en húmedo (10 YR 4/2) y parduzco seco (10 YR 6/2), textura franco arcillosa, estructura en bloques angulares débil, consistencia muy friable, adhesivo, ligeramente plástico, saturado, reacción moderada al H ₂ O ₂ , débil al NaF, manchas escasas de FeO, límite difuso y plano.
Bu4	> 87 cm	Color pardo grisáceo oscuro en húmedo (10 YR 4/2) y gris parduzco pálido en seco (10 YR 6/2), textura franco arenosa, sin estructura, consistencia muy friable, adhesivo, ligeramente plástico, saturado, reacción débil al H ₂ O ₂ y débil al NaF, manchas escasas de FeO, límite difuso y plano.

2. Características Físicas

a) Densidad aparente

La densidad aparente es de 0.75 gr/cm³ para el horizonte Ap, incrementándose en el Bw para luego mantenerse relativamente homogénea para el perfil, yendo de 1.19 a 1.23 gr/cm³, (Fig.12).

b) Densidad real

Los valores obtenidos en los primeros horizontes se mantienen constantes de 2.03 a 2.40 gr/cm³. Sin embargo, en el horizonte Bu3 disminuyen hasta 1.59 gr/cm³, para aumentar drásticamente a 4.49 gr/cm³ en el horizonte Bu4 (Fig.12) Esto puede indicar que en los primeros horizontes la composición mineralógica es similar; encontrando minerales más pesados en el Bu4 lo que podría indicar menor intemperización de estos (Baver *et al.*, 1991).

c) Porosidad

La porosidad en los primeros cuatro horizontes es cercana a 50%, pero disminuye en el horizonte Bu3 hasta 24%, lo que podría implicar una capa en la que es más difícil el flujo de agua y aire, aún cuando en el horizonte Bu4 vuelve a incrementarse hasta un 73% (Fig. 12)

d) Textura

El horizonte Ap muestra una textura franco arenosa, mientras que los horizontes Bw, B₁, B₂ y B₄ son franco arcillosos y el horizonte Bu₃ es franco limoso (Fig. 12; Tabla 5), lo cual implica que la formación de arcilla puede darse *in situ*, debido a que el material parental se encuentra parcialmente intemperizado o bien que se acumule en los diferentes horizontes a través del movimiento del agua tanto por percolado como por movimientos ascendentes desde el manto freático, excepto en el horizonte con menor porosidad, donde el flujo de agua es menor (Boul *et al.*, 1988; Bremen y Buurman, 1998; Birkeland, 1999).

Horizonte	Textura
Ap	Franco arenosa
Bw	Franco arcillosa
Bu ₁	Franco arcillosa
Bu ₂	Franco arcillosa
Bu ₃	Franco limosa
Bu ₄	Franco arcillosa

Tabla 5. Clases texturales para los distintos horizontes del perfil de suelo de “El Aguaje”, ranchería “La Cuadrilla”; Temascalcingo, Estado de México.

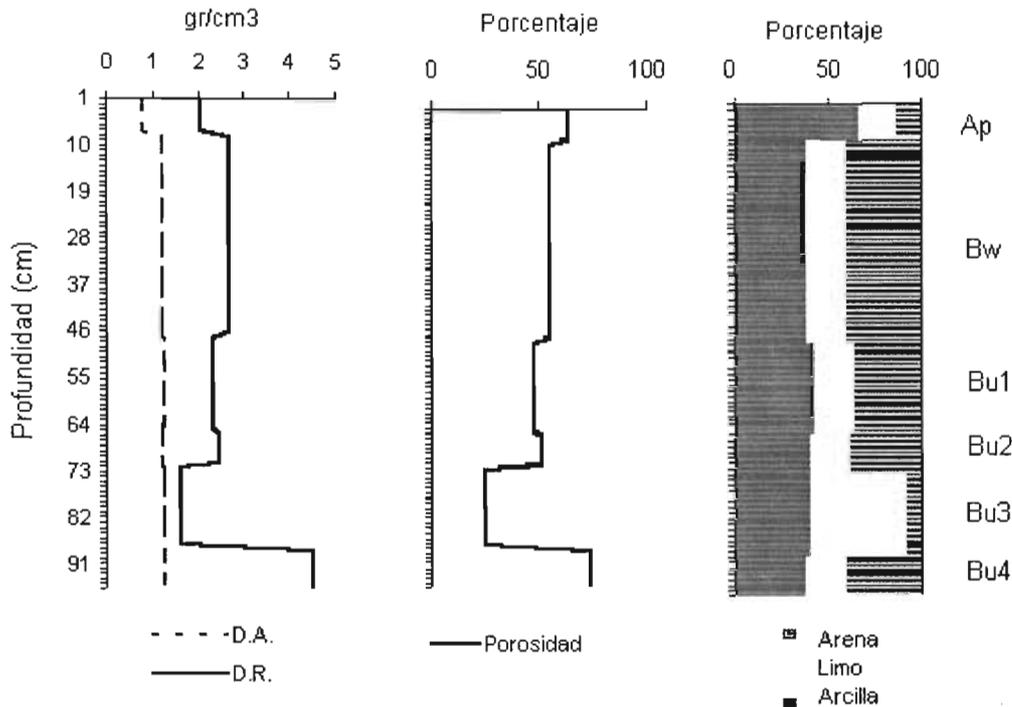


Figura 12. Características físicas: densidades real y aparente, porcentaje de porosidad y textura en los distintos horizontes del perfil de suelo de “El Aguaje”, ranchería “La Cuadrilla”; Temascalcingo, Estado de México.

2. Características Químicas

a) Potencial de hidrógeno (pH)

En el perfil 2, los primeros dos horizontes tienen pH real neutro (6.8, 7.2) y el resto medianamente básico (7.43 – 7.6). El pH potencial es de 6.22 y 6.11 para los horizontes Ap y Bw respectivamente, mientras que para el resto va de 6.26 a 6.14 (Fig. 13). Esto indica que se trata de un suelo saturado en bases, por lo que no existe un fuerte lavado ni migración de materiales (Boul *et al.*, 1988)

b) Conductividad Eléctrica (CE)

En este perfil también se trata de valores positivos (Fig.13), con una tendencia similar a la de la materia orgánica.

c) Porcentaje de materia orgánica

El porcentaje de materia orgánica es más alto en el horizonte Ap: 10.87% (Fig.13), lo cual podría deberse a que es un sitio en donde la vegetación sustentada son pastos, con un sistema radicular muy distribuido en el primer horizonte y por tanto la cantidad de residuos depositados es mayor; además, es importante considerar que el perfil se encuentra en un clima templado por lo que la tasa de descomposición es baja (Duchaufour, 1973; Boul, 1988; Rasmussen y Collins, 1991). Es posible observar que los valores de pH potencial presentan una tendencia inversa a la del porcentaje de materia orgánica, lo cual está dado por la característica ácida de esta última (Bohn *et al.*, 1985).

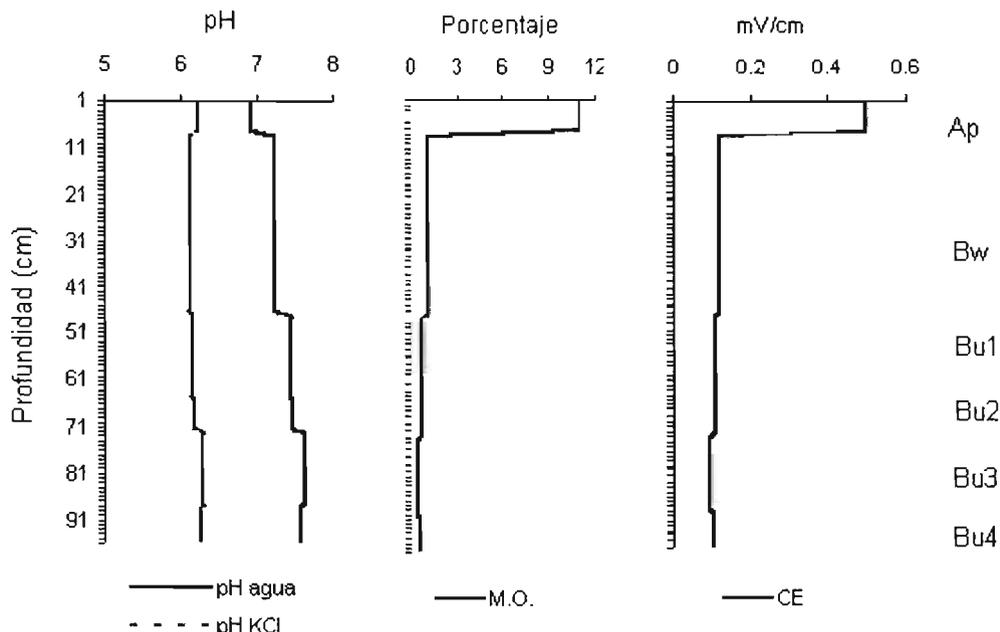


Figura 13. Características químicas: pH, conductividad eléctrica y materia orgánica en los distintos horizontes del perfil de suelo de “El Aguaje”, ranchería “La Cuadrilla”; Temascalcingo, Estado de México.

d) Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.) determinada va de 25 a 35 cmol/kg (Fig. 14), observando que la mayor C.I.C. se encuentra en el horizonte Ap, en el que el porcentaje de materia orgánica es más alto, lo cual es debido a la presencia de sitios de cambio en ésta (Bohn *et al.*, 1985)

e) Iones intercambiables

En este caso también el catión predominante es el Ca^{+2} con valores que van de 13.96 a 14.96 cmol/kg, seguido por el Mg^{+} de 5.91 a 7.03 cmol/kg (Fig. 14), por lo que existe floculación y bajas probabilidades de migración de arcillas (Birkeland, 1999).

f) Porcentaje de saturación de bases

El porcentaje de saturación de bases es mayor del 50% en todos los horizontes, con valores que van desde 69% hasta 93% (Fig. 14) siendo mayores para los horizontes más arcillosos. El alto porcentaje de saturación de bases, además de utilizarse en la clasificación del suelo, indica que la lixiviación es relativamente baja, lo cual es controlado en parte por el clima templado (Boul *et al.*, 1988).

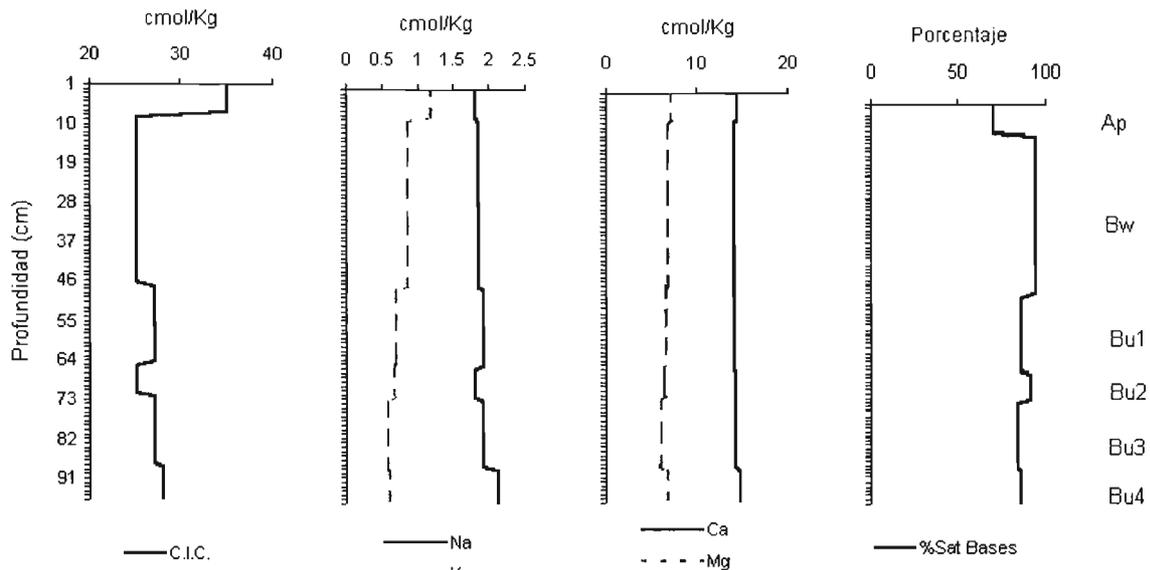


Figura 14. Características químicas: capacidad de intercambio catiónico, iones intercambiables (Na, K, Ca y Mg) y porcentaje de saturación de bases en los distintos horizontes del perfil de suelo de “El Aguaje”, ranchería “La Cuadrilla”, Temascalcingo, Estado de México.

Para el caso del perfil 2, el horizonte A es muy delgado, por lo que se considera un horizonte A ócrico. El **horizonte Bw** es descrito como un horizonte **cámbico** debido a que es un horizonte subsuperficial que muestra evidencia de alteración con respecto a horizontes inferiores. Para su diagnóstico se consideró que presenta una textura franco-arcillosa con un 39.2% de arcilla la cual es más fina que la textura areno-limosa requerida y mayor que el 13.2% del horizonte Ap; además, presenta una estructura angular débil y una C.I.C de 25 cmol/kg.

Considerando estos horizontes diagnóstico, se trata de un **Cambisol eútrico**, que son suelos con un horizonte B cámbico y ningún otro horizonte de diagnóstico mas que un horizonte A ócrico o úmbrico con un grado de saturación de bases mayor del 50%.

4. Metales Pesados Totales

En general, en el horizonte Ap de este perfil no existe acumulación de metales pesados, aun cuando presenta un alto contenido de materia orgánica (10.87%) y se esperaría la formación de quelatos al menos con Cu. Esto podría deberse a que es un horizonte ócrico muy delgado (7 cm),

a) Cobalto

En el perfil 2 se encuentra en concentraciones mayores de cobalto, que van de $20.55 \mu\text{g g}^{-1}$ a $42.70 \mu\text{g g}^{-1}$ (Fig. 15), este último valor rebasa el límite propuesto por Kabata-Pendias (1995), así como el valor promedio de este elemento en las rocas ígneas (Ramkana, 1954) y lo presenta el horizonte Bw, que es el horizonte más rico en arcilla, por lo que podría relacionarse con ésta debido a su enorme área superficial específica (Vaithyanatha *et al.*, 1992; Saeki *et al.*, 1993) y su carga eléctrica negativa (Porta, 1999). Ninguna de las muestras restantes rebasa límites consultados. Esta acumulación en Bw

podría estar relacionada con el agua que percola para llevar material a este horizonte, aun cuando la migración hacia este horizonte es baja (Bremen y Buurman, 1998; Birkeland, 1999).

b) Cromo

En el caso del segundo perfil, la concentración de Cr va de 14.10 a 20.40 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Fig. 15), manteniéndose relativamente constante a lo largo del perfil, encontrando la mayor concentración en el horizonte Bu2, lo cual puede deberse a que este elemento se encuentre en el material parental (Alloway, 1990).

c) Cobre

Para el cobre, las concentraciones van de 22.65 a 13.70 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Fig. 15), encontrando un ligero incremento de la concentración en el horizonte Bu1, el cual muestra el mayor porcentaje de saturación de bases, que podría estar determinado una mayor retención de cobre relacionada con la CIC, ya que el Cu muestra tendencia a concentrarse sobre superficies arcillosas, donde la CIC es mayor; además, puede existir intercambio entre Cu y Ca (Aguirre, 2001; Vogeler, 2001).

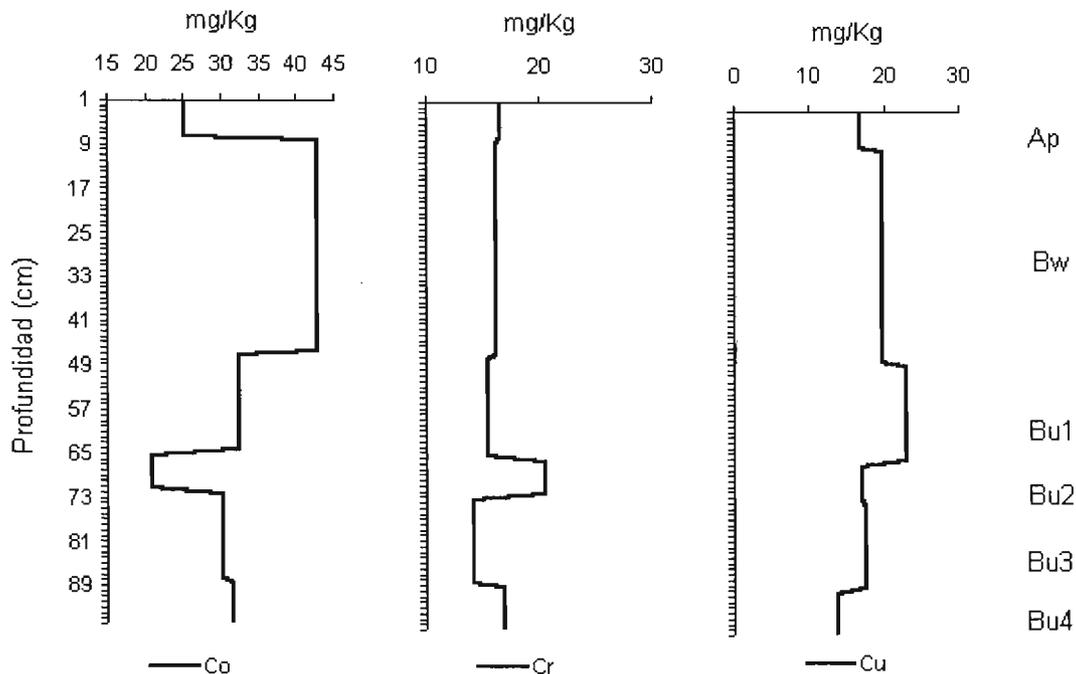


Figura 15. Metales pesados totales: cobalto, cromo y cobre en los distintos horizontes del perfil de suelo de "El Aguaje", ranchería "La Cuadrilla"; Temascalcingo, Estado de México.

d) Níquel

Los valores de níquel determinados de van 29.5 a 37.5 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Fig. 16), registrando un incremento en el horizonte Bu1 al igual que el cobre, por lo que también se une a las arcillas mediante su CIC (Zemberyová *et al.*, 1998; Sowder *et al.*, 2003).

e) Plomo

Las concentraciones de plomo más altas fueron determinadas para el perfil 2, en el que se observa una tendencia a incrementar la concentración con la profundidad, encontrando el valor más alto (116.5 $\mu\text{g g}^{-1}$) en el horizonte Bu₄ y el más bajo (71 $\mu\text{g g}^{-1}$)

en el horizonte Bw (Fig. 16), lo cual puede sugerir migración de este metal hacia el manto freático moviéndose en suspensión con el agua que percola (McCarthy y Zachara, 1989; Karathanasis,1999; Donrronsoro *et al*, 2002).

f) Zinc

El mayor contenido de Zn se encuentra en el horizonte Bw (87.30 $\mu\text{g g}^{-1}$), por lo que sugiere relación con las arcillas y por consiguiente con su migración y posterior acumulación en Bw (Vaithiyathana, 1992; Birkeland, 1999; Karathanasis,1999; Murray *et al*. 2004) y la menor concentración está en el horizonte Ap (70.40 $\mu\text{g g}^{-1}$) (Fig. 16) por su delgado grosor.

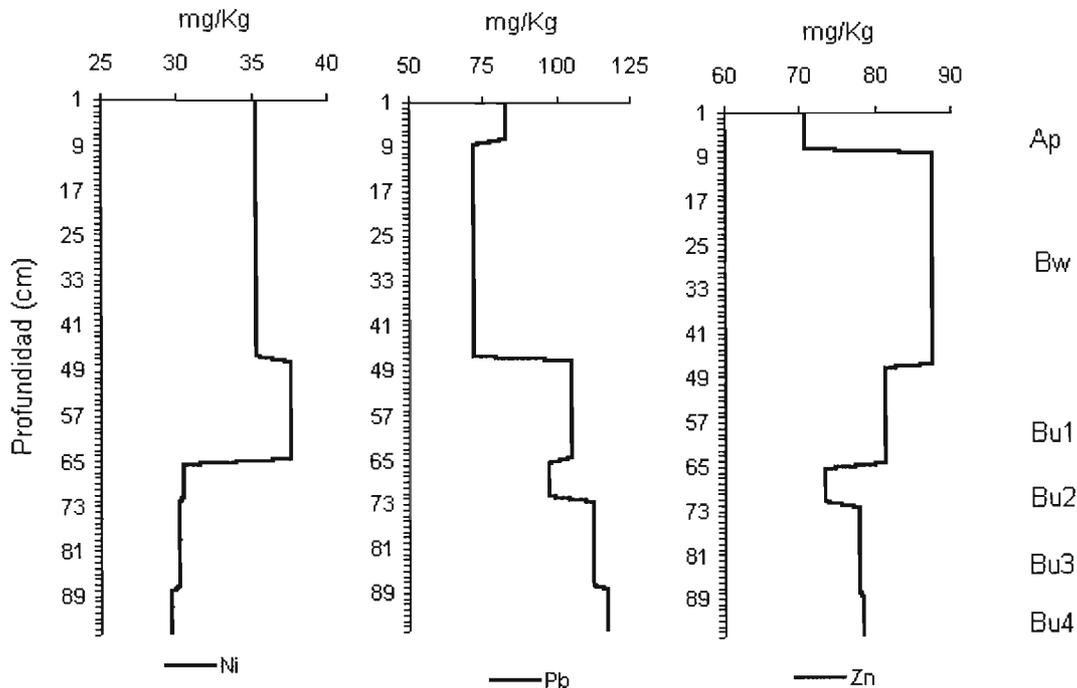


Figura 16. Metales pesados totales: níquel, plomo y zinc en los distintos horizontes del perfil de suelo de “El Aguaje”, ranchería “La Cuadrilla”; Temascalcingo, Estado de México.

Perfil 3

1. Descripción en campo

El **perfil 3**, ubicado dentro del corredor industrial Toluca-Lerma, específicamente en la localidad denominada “El Cerrillo Vista Hermosa”, municipio de Toluca, Estado de México, se describió el 15 de mayo de 1998. También es un perfil relativamente homogéneo, de coloración oscura, friable, con estructura granular débil, poco adhesiva, en este caso con poca humedad, no existen manchas, se observa un horizonte A mólico y un B árgico por acumulación de arcilla, por lo que se clasifica como Phaeozem lúvico. Sus características generales son:

Fecha: 15 de mayo de 1998	Drenaje superficial: rápido
Localidad: El Cerrillo "Vista Hermosa", Toluca, Estado de México	Inundación: ocasional
Coordenadas geográficas: 19°18'57" latitud norte y 99°32'49" longitud oeste.	Manto freático: aproximadamente a 3 m
Geología: aluvión	Material parental: aluvión
Geoforma: valle	Edad estratigráfica: Cuaternario
Pendiente: menor al 1%	Uso del suelo: agrícola
Relieve: plano	Cultivos: maíz, trigo, haba, calabaza, frijol
Litología: aluvión	Factores limitantes: heladas, vientos.
Litología superficial: < 0.1%	
Tamaño de rocas: menor a 5 cm.	Suelo: Phaeozem lúvico
Afloramientos rocosos: nulos	Horizontes: 6
Erosión y depositación: nula	
Las características descritas para cada horizonte son:	

Ap	0 – 12 cm	Color negro en húmedo (10 YR 2/1) y pardo grisáceo oscuro en seco (10 YR 4/2), textura franca, estructura granular débil, consistencia friable, poco adhesiva, ligeramente plástico, seco, reacción fuerte a H ₂ O ₂ , sin manchas, límite difuso y plano.
	A mólico	
Ag1	12 – 35 cm	Color gris muy oscuro en húmedo (10 YR 3/1) y gris oscuro en seco (10 YR 4/1), textura franca, estructura granular débil, consistencia friable, poco adhesiva, poco plástico, seco, reacción fuerte al H ₂ O ₂ , sin manchas, límite difuso y plano.
Btg	35 – 52 cm	Color gris muy oscuro en húmedo (10 YR 3/1) y gris oscuro en seco (10YR 4/1), textura franco arcillosa, estructura granular débil, consistencia friable, adhesiva, ligeramente plástico, húmedo, reacción fuerte al H ₂ O ₂ , sin manchas, límite difuso y ondulado.
	B árgico	
Bu1	25 – 69/93 cm	Color negro en húmedo (10 YR 2/1) y gris oscuro en seco (10 YR 4/1), textura franca, estructura granular débil, consistencia friable, ligeramente adhesiva, moderadamente plástico, húmedo, reacción débil al NaF, manchas escasas de FeO, límite difuso y quebrado.
BC	69/93 – 102 cm	Color gris muy oscuro en húmedo (10 YR 3/1) y gris en seco (10 YR 5/1), textura franco arenosa, estructura granular débil, consistencia muy friable, no adhesivo, no plástico, húmedo, reacción débil al NaF, sin manchas, límite difuso y ondulado.
CR	102 – 115 cm	Color pardo grisáceo en húmedo (10 YR 5/1) y gris claro en seco (10 YR 7/1), textura limo arenosa, estructura granular débil, consistencia suelta, no adhesivo, no plástico, húmedo, reacción débil al H ₂ O ₂ , sin manchas, límite claro.

2. Características Físicas

a) Densidad aparente

Los valores de densidad aparente para el tercer perfil van de 1.07 a 1.28 gr/cm³ (Fig. 17) y aumentan con la profundidad. La densidad aparente es inversa al porcentaje de materia orgánica ya que ésta, al tener espacios porosos la disminuye (Aguilera y Martínez, 1986).

b) Densidad real

Con respecto a la densidad real, existe una ligera disminución al incrementar la profundidad, con valores que van de 2.62 a 1.97 gr/cm³ (Fig. 17), lo cual indica un mayor intemperismo en horizontes profundos, que podría ser el resultado de los ciclos de inundación y sequía a través del manto freático (Boul *et al.*, 1988; Birkeland, 1999).

c) Porosidad

Para determinar la porosidad se consideran tanto los valores de densidad aparente como los de densidad real, por lo que también tiende a disminuir con la profundidad. El porcentaje de porosidad va de 55.73% en Ap a 34.01 en CR (Fig. 17), esto da como resultado un flujo menor de agua y aire en horizontes inferiores, lo cual favorece condiciones reductoras (Birkeland, 1999).

d) Textura

En el perfil 3 se observa una tendencia a la textura franca, aun cuando existen variaciones que van desde franco arenosa hasta franco arcillosa (Tabla 6). En cuanto a los valores obtenidos para cada una de las fracciones granulométricas, el perfil 3 tiene un mayor contenido de arena que el resto de los perfiles, disminuyendo el porcentaje de limo (Fig. 17). El horizonte Btg es el resultado de un proceso de iluviación de arcillas, tanto de los horizontes superficiales, como de los inferiores (Boul *et al.*, 1988; Breemen y Buurman, 1998; Birkeland, 1999).

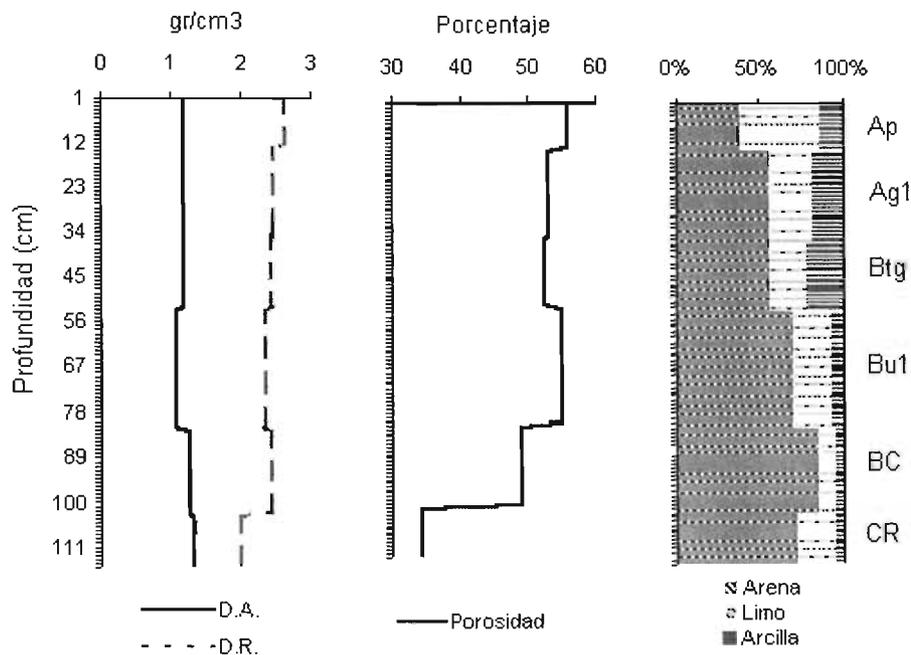


Figura 17. Características físicas: densidades real y aparente, porcentaje de porosidad y textura en los distintos horizontes del perfil de suelo de El Cerrillo "Vista Hermosa", Toluca, Estado de México.

Horizonte	Textura
Ap	Franca
Ag ₁	Franco arenosa
Btg	Franco arcillo limosa
Bu ₁	Franco arenosa
BC	Areno franca
CR	Franco arcillosa

Tabla 6. Clases texturales en los distintos horizontes del perfil de suelo de El Cerrillo “Vista Hermosa”, Toluca, Estado de México.

3. Características Químicas

a) Potencial de hidrógeno (pH)

Para este perfil, el primer horizonte es fuertemente ácido (5.4), los dos siguientes medianamente ácidos (5.61 y 6.02) y los restantes neutros (6.6 – 6.91) (Fig. 18). Esto implica que en el horizonte A existen pocas bases, las cuales se lixivian hacia Btg (Boul *et al.*, 1988).

b) Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica es mayor para el horizonte Ap con un valor de 0.138, disminuyendo en A₁ para mantenerse relativamente constante con valores de 0.061 a 0.05 (Fig. 18).

c) Porcentaje de materia orgánica

La materia orgánica en el perfil 3 muestra un decremento en los horizontes inferiores, teniendo el mayor porcentaje en el horizonte Ap con 2.46% hasta llegar a CR con 0.10% (Fig. 18). El potencial de hidrógeno muestra una tendencia inversa al porcentaje de materia orgánica, debido a que los grupos positivamente cargados de la materia orgánica incrementan la concentración de iones hidrógeno (Bohn *et al.*, 1985)

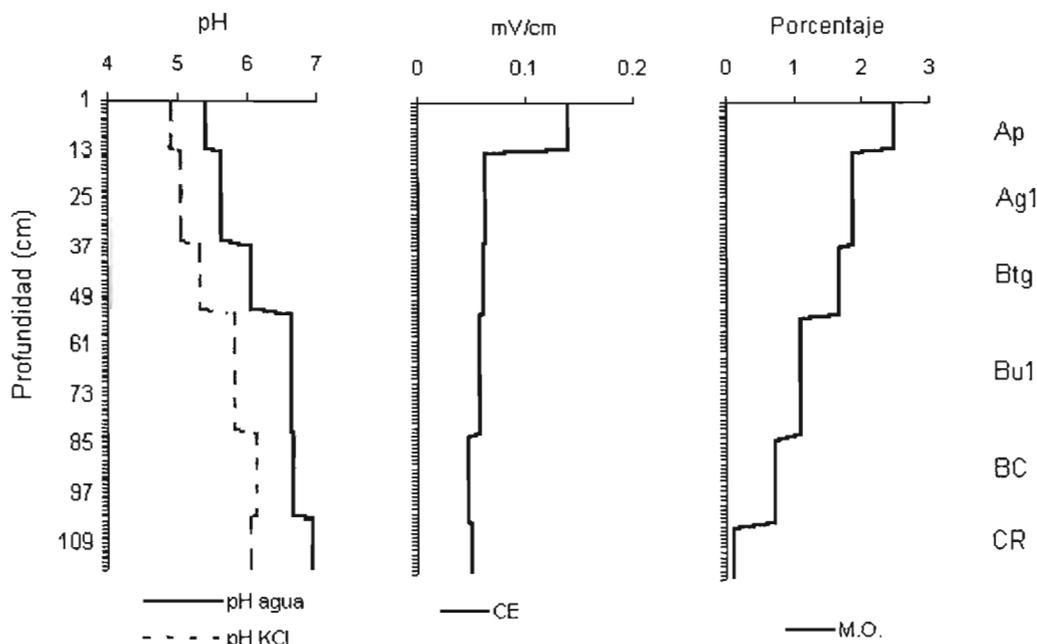


Figura 18. Características químicas: pH, conductividad eléctrica y materia orgánica en los distintos horizontes del perfil de suelo de El Cerrillo “Vista Hermosa”, Toluca, Estado de México.

d) Capacidad de intercambio catiónico

Para la capacidad de intercambio catiónico se determinaron valores que van de 28 cmol/kg en el horizonte Ap hasta 16 cmol/kg en Ag1 y CR (Fig. 19). La alta C.I.C. en Ap está determinada por la presencia del mayor porcentaje de materia orgánica en este horizonte unido a un pH ácido, por lo que se generan cargas dependientes de pH (Bohn *et al.*, 1985).

e) Iones intercambiables

Los iones intercambiables se encuentran en el siguiente orden: $Ca^{+2} > Mg^{+2} > Na^{+} > K^{+}$, donde los valores determinados para Ca^{+2} van de 11.89 a 8.36 cmol/kg, para Mg^{+2} de 5.44 a 4.27 cmol/kg, para Na^{+} de 3.19 a 1.71 cmol/kg y para K^{+} de 0.51 a 0.25 cmol/kg (Fig. 19). La concentración de sodio es mayor en el horizonte CR e incrementa al ascender, lo cual puede propiciar la dispersión de las arcillas, dejándolas libres para ascender con el agua procedente del manto freático. Al incrementar la concentración de calcio y disminuir la de sodio en Btg las arcillas floculan y se acumulan (Breemen y Buurman, 1998; Birkeland, 1999).

f) Porcentaje de saturación de bases

El porcentaje de saturación de bases en el perfil 3 va de 81.77 % a 98.47%, siendo en todos los casos mayor del 50% (Fig. 19), encontrando el mayor porcentaje en Btg, lo cual confirma la lixiviación en este horizonte (Boul *et al.*, 1988).

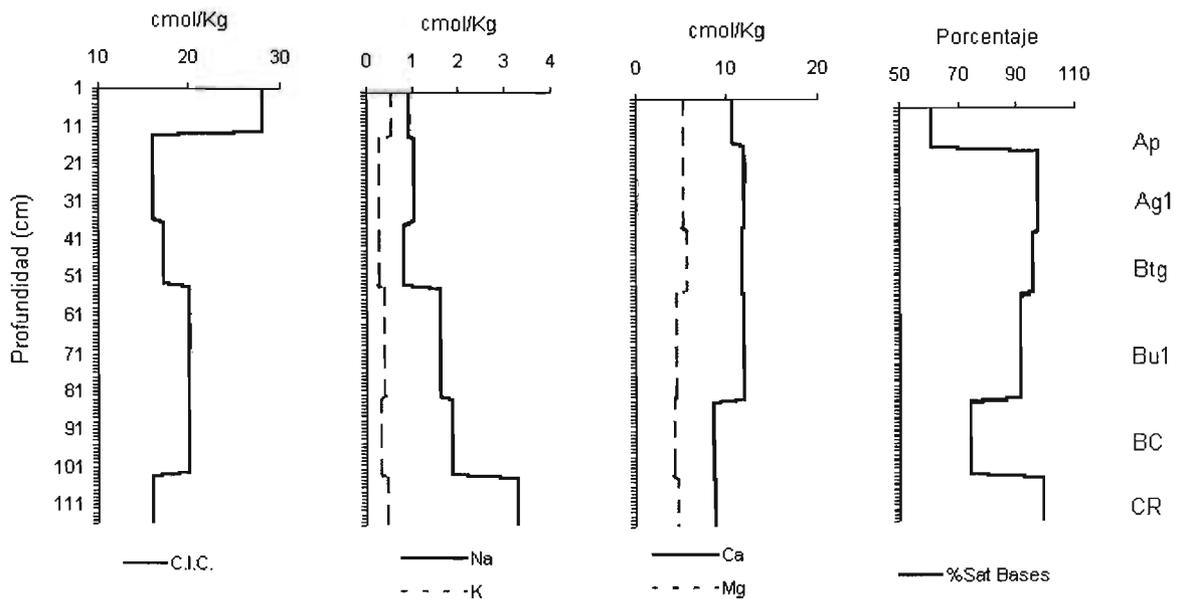


Figura 19. Características químicas: capacidad de intercambio catiónico, iones intercambiables (Na, K, Ca y Mg) y porcentaje de saturación de bases en los distintos horizontes del perfil de suelo de El Cerrillo "Vista Hermosa", Toluca, Estado de México.

En el perfil 3, se encontró que el horizonte Ap presenta estructura granular, color 10YR 2/1 y 10YR4/2 en seco y húmedo respectivamente comparados con 10YR5/1 y 10YR7/1 del horizonte CR. Además, tiene 1.48% de carbono orgánico (2.46 % MO.), su porcentaje de saturación de bases es del 60.46% e incluyendo al horizonte Ag1 mide 35 cm, con lo que califica como un horizonte **A mólico**.

El horizonte Btg se consideró como un **horizonte árgico** por presentar una textura franco-arcillo-limosa con un 22.4% de arcilla, que al ser comparada con el porcentaje de arcilla de Ag1 de 18.4%, la diferencia es de 4% por lo que la relación de arcilla entre Btg/Ag1 es de 1.22; además de presentarse a una profundidad de 35 cm y tener 17 cm de grosor.

Por lo tanto, de acuerdo con los horizontes diagnóstico nuevamente se trata de un **Pheozem lúvico**.

4. Metales Pesados Totales

En general, los metales pesados determinados para el perfil 3 muestran una tendencia a disminuir su concentración al incrementar la profundidad encontrando, en todos los casos, las mayores concentraciones en los primeros 35 cm de profundidad, por lo que se acumulan en esta zona. Co, Cu y Zn muestran los valores más altos en el horizonte Ap (superficial), mientras que para Cr, Ni y Pb las concentraciones más altas están en el horizonte Ag1; es decir, antes del horizonte más arcilloso (Bt), por lo que en este caso la arcilla podría estar actuando como una barrera para impedir la migración de los metales a lo largo del perfil. Además, en el horizonte Bt se incrementa el pH 0.41 unidades, pasando de medianamente ácido a ligeramente ácido, lo cual también puede estar influyendo en impedir la migración de los metales (Alloway, 1990; Kabata-Pendias y Pendias, 1992).

a) Cobalto

En el perfil 3 la tendencia a disminuir es abrupta, ya que va de 18.05 $\mu\text{g g}^{-1}$ en el horizonte Ap a 2.00 $\mu\text{g g}^{-1}$ en el horizonte B₂ (Fig. 20). Observando una tendencia inversa al pH, debido a que la sorción del Co es mayor en un rango de 4.5 a 7.0 (McLaren *et al.*, 1986).

b) Cromo

Las mayores concentraciones de Cr se encontraron en este perfil, con un valor máximo de 40.65 $\mu\text{g g}^{-1}$, que no rebasa los límites consultados, por lo cual las concentraciones en los perfiles podrían ser consideradas dentro de los valores normales. En el perfil 3 se observa tendencia a disminuir la concentración al incrementar la profundidad, con un valor máximo de 40.65 $\mu\text{g g}^{-1}$ en el horizonte A₁, hasta 5.5 $\mu\text{g g}^{-1}$ en el horizonte CR (Fig. 20). En los tres primeros horizontes existe mayor concentración de este elemento, lo cual se relaciona con la lenta velocidad de migración del Cr en horizontes arcillosos, como es Btg (Korte *et al.*, 1976).

c) Cobre

En el perfil 3 se determinaron concentraciones de cobre que van de 24.85 a 2.35 $\mu\text{g g}^{-1}$, encontrando que las mayores concentraciones en el horizonte Ap y en Btg (Fig. 20), por lo que este elemento podría estar formando quelatos con la materia orgánica (Petruzzelli *et al.*, 1978; Miller y McFee, 1983; Bourg, 1995; Kabata-Pendias, 1995); además de ser adsorbido por las arcillas debido a su superficie disponible para las reacciones químicas (Loué, 1988; Vaithiyathana *et al.*, 1992; Saeki *et al.*, 1993).

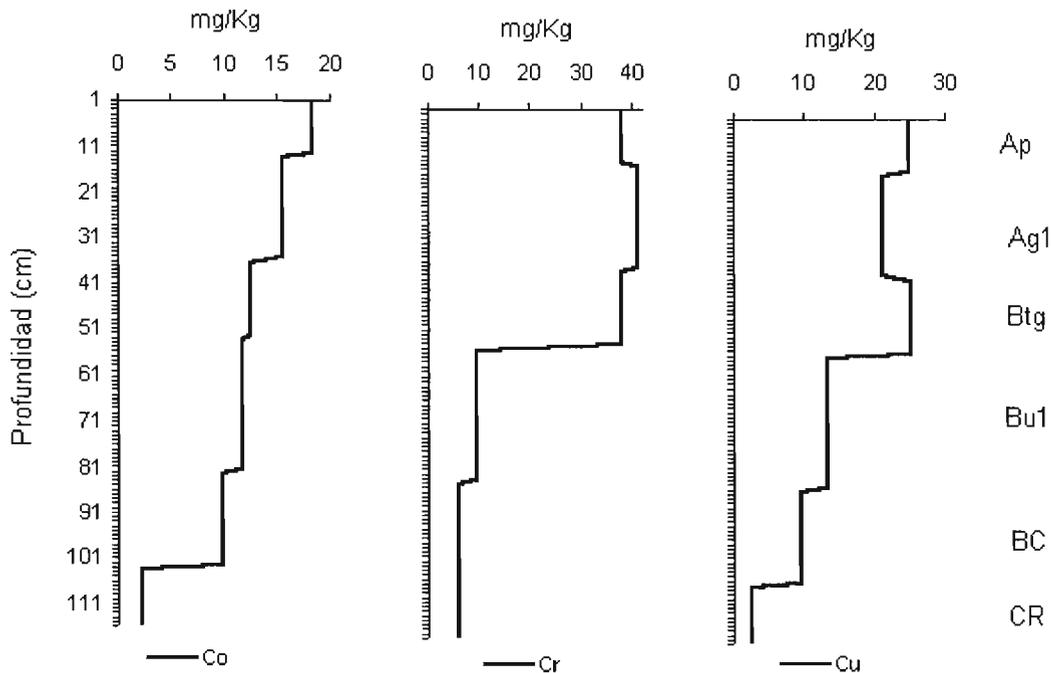


Figura 20. Metales pesados totales: cobalto, cromo y cobre en los distintos horizontes del perfil de suelo de El Cerrillo "Vista Hermosa", Toluca, Estado de México.

d) Níquel

Las concentraciones de níquel en el perfil 3 van de 16.05 a 34.05 $\mu\text{g g}^{-1}$, siendo mayores en Ag1 y Bu1, por lo que no existe una relación clara ni con materia orgánica ni con arcillas.

e) Plomo

Para el perfil 3 disminuye la concentración al incrementar la profundidad, con valores que van de 104 a 71 $\mu\text{g g}^{-1}$, aunque la mayor concentración fue determinada en el horizonte Ag1 (Fig. 21), por lo que en este caso el horizonte Btg podría estar actuando como una barrera para impedir su migración hacia horizontes inferiores debido a que su sorción depende principalmente de la mineralogía del suelo (Appel y Ma, 2002). Además, al ser un elemento que adsorbe la materia orgánica, lo que impide su migración hacia horizontes inferiores pobres en MO. (Kabata-Pendias y Pendias, 1992; Lim *et al.*, 2002)

f) Zinc

En el caso del zinc, se determinó que el horizonte Ap presenta mayor concentración de Zn (95.00 $\mu\text{g g}^{-1}$) y el B_{w2} tiene la menor concentración (50.75 $\mu\text{g g}^{-1}$) (Fig. 21) por lo que podría estar relacionado positivamente con la materia orgánica y

negativamente con las arcillas. La relación entre Zn y materia orgánica se da a través de un proceso de reciclaje entre la absorción por la planta y la deposición en residuos agrícolas (Nowack *et al.*, 2001). También se relaciona con el horizonte Btg y por consiguiente con las arcillas y su iluviación (Loué, 1988; Saeki *et al.*, 1993).

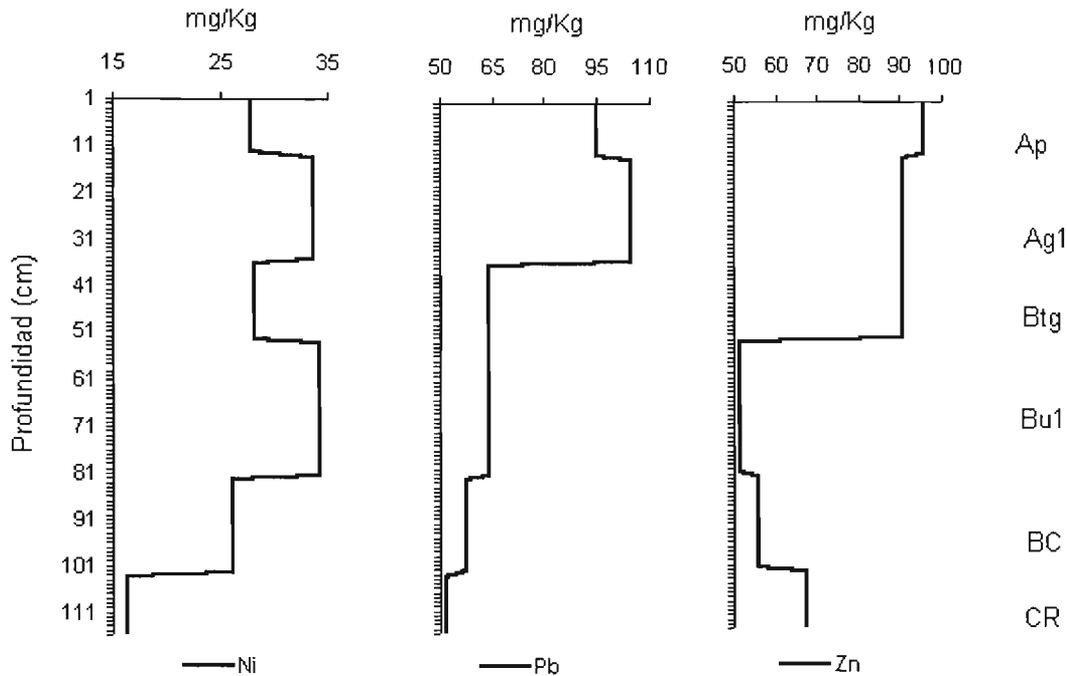


Figura 21. Metales pesados totales: níquel, plomo y zinc en los distintos horizontes del perfil de suelo de El Cerrillo “Vista Hermosa”, Toluca, Estado de México.

Perfil 4

1. Descripción en campo

El perfil 4 se localiza hacia el final de la cuenca, en el rancho “Los Compadres”, dentro de la localidad conocida como hacienda Solís, en el municipio de Temascalcingo, Estado de México; fue descrito el 20 de noviembre de 1998, después de la temporada de lluvias, debido las inundaciones de los terrenos cercanos al río no fue posible continuar los muestreos en los meses de abril a noviembre. La superficie del **perfil 4** se encontró compactada (los primeros 2 cm aproximadamente), es un perfil profundo con coloración oscura, poca humedad excepto en el horizonte de acumulación de arcilla (B árgico), en el que existen concreciones de óxidos de manganeso que incrementan con la profundidad, lo cual indica condiciones de óxido-reducción hacia la parte inferior del perfil. El horizonte A es caracterizado como mólico, por lo que se clasifica como Phaeozem lúvico. Sus características generales son:

Fecha: 20 de noviembre de 1998	Erosión: ligera en surcos
Localidad: rancho "Los Compadres", hacienda Solís, Temascalcingo, Estado de México	Drenaje superficial: lento
Geología: aluvión	Material parental: muy alterado (transportado)
Geoforma: base aluvial de piedemonte	Edad estratigráfica: Cuaternario
Pendiente: 3 %	Uso del suelo: agrícola-praticola
Relieve: casi plano	Cultivos: pastos, maíz, haba.
Litología: aluvión	Tenencia: propiedad privada
Pedregosidad superficial: < 0.01%	Suelo: Phaeozem lúvico
Tamaño que domina: gravilla	Profundidad: 103 cm
Afloramientos rocosos: <2%	Horizontes: 7

En cuanto a las principales características descritas para cada horizonte son:

Ap	0 – 7 cm	Color negro en húmedo (10 YR 2/1) y pardo grisáceo oscuro en seco (10 YR 4/2), textura franco arcillosa, estructura granular moderada, consistencia muy friable, ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, seco, reacción fuerte a H ₂ O ₂ y débil al NaF, sin manchas, límite difuso y plano.
	A mólico	
A1	7 – 31 cm	Color muy oscuro en húmedo (10 YR 2/2) y pardo grisáceo en seco (10 YR 5/2), textura franco arcillosa, estructura en bloques angulares moderada, consistencia friable, adhesivo, plástico, fresco, reacción moderada al H ₂ O ₂ y débil al NaF, sin manchas, límite difuso y plano.
Bt	31 – 63 cm	Color pardo grisáceo muy oscuro en húmedo (10 YR 3/2) y pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2), textura arcillosa con presencia de cutanes (argilanes) muy delgados en la cara de los agregados, estructura en bloques angulares moderada, consistencia friable, muy adhesivo, muy plástico, mojado, reacción débil al H ₂ O ₂ , sin manchas, límite difuso y plano.
	B árgico	
Bs1	63 – 73 cm	Color oscuro grisáceo en húmedo (10YR 4/1) y gris en seco (10YR 5/1), textura arcillo limosa, estructura en bloques angulares desarrollada, consistencia friable, adhesivo, plástico, mojado, reacción débil al H ₂ O ₂ , 5% de manchas de MnO ₂ , límite difuso y plano.
Bs2	73 – 87 cm	Color pardo grisáceo en húmedo (10YR 5/2) y pardo pálido en seco (10YR 6/3), textura arcillo limosa, estructura en bloques angulares moderada, consistencia muy friable, adhesivo, plástico, mojado, reacción débil al H ₂ O ₂ , 10% de manchas de MnO ₂ , límite difuso y plano.
Bsr	87 – 96 cm	Color pardo grisáceo oscuro en húmedo (10YR 4/2) y pardo muy pálido en seco (10YR 7/3), textura franco limosa, estructura en bloques subangulares moderada, consistencia muy friable, ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, húmedo, reacción débil al H ₂ O ₂ , 20 % de manchas de MnO ₂ , límite difuso y plano.

CR 96 – 103 cm Color pardo en húmedo (10YR 4/3) y pardo muy pálido en seco (10YR 7/3), textura franco limosa, estructura en bloques subangulares moderada, consistencia muy friable, ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, húmedo, reacción moderada al H₂O₂, 40% de manchas de MnO₂.

2. Características Físicas

a) Densidad aparente

La densidad aparente en el perfil 4 es relativamente homogénea con valores que van de 1.07 a 1.28 gr/cm³ (Fig. 22), siendo menor en Ap donde el porcentaje de materia orgánica es mayor (Aguilera y Martínez, 1986).

b) Densidad real

La densidad real se ve incrementada en el horizonte CR, lo cual indica que los minerales que lo conforman son más pesados que en el resto del perfil (Fig. 22) y menos intemperizados (Birkeland, 1999).

c) Porosidad

En general, la porosidad es cercana al 50%, lo cual indica que existe un buen flujo de agua y aire a través del perfil de suelo. Sin embargo, en el horizonte Bsr del perfil 4 el porcentaje de porosidad es de 26% (Fig.22), por lo que en dicho horizonte disminuiría considerablemente la aereación y el flujo de agua (Baver *et al.*, 1991; Breemen y Buurman, 1998).

d) Textura

La textura es franco arcillo limosa para los horizontes A, arcillosa para Bt, franco arcillosa para Bs1, franca para Bs2 y franco arenosa para Bsr y CR (Tabla 7). El horizonte Bt presentó 53.2% de arcilla, siendo el valor más alto de esta fracción en todas las muestras analizadas (Fig. 22), lo cual implica un proceso de iluviación de arcillas para formar el horizonte Btg (Boul *et al.*, 1988).

Horizonte	Textura
Ap	Franco arcillo limosa
A ₁	Franco arcillo limosa
Bt	Arcilla
Bs ₁	Franco arcillosa
Bs ₂	Franca
Bsr	Franco arenosa
CR	Franco arenosa

Tabla 7. Clases texturales en los distintos horizontes del perfil de suelo del rancho “Los Compadres”, Hacienda Solis, Temascalcingo, Estado de México.

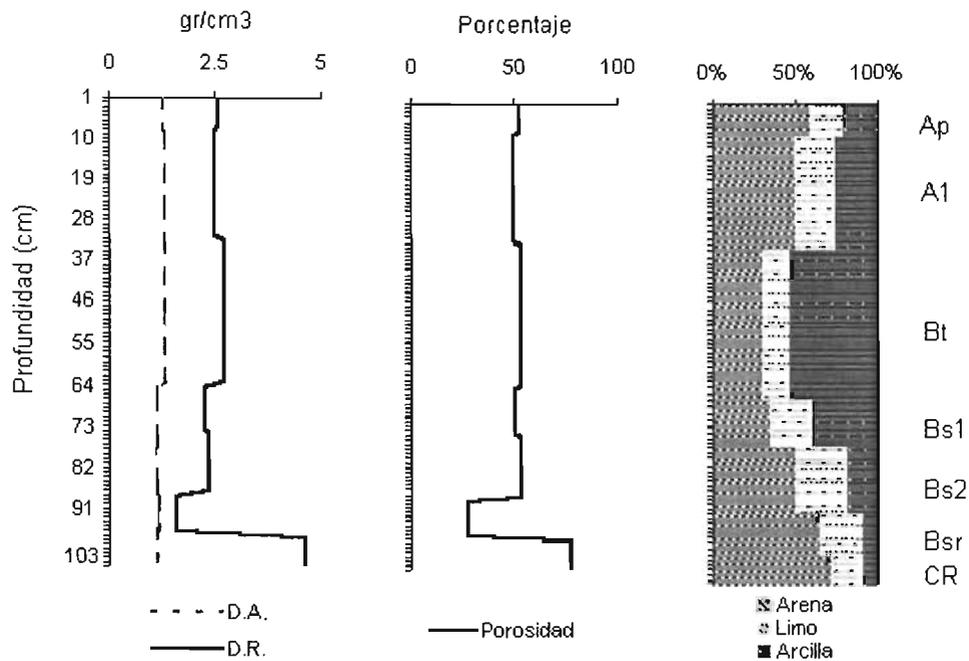


Figura 22. Características físicas: densidades real y aparente, porcentaje de porosidad y textura en los distintos horizontes del perfil de suelo del rancho "Los Compadres", Hacienda Solis, Temascalcingo, Estado de México.

3. Características Químicas

a) Potencial de hidrógeno (pH)

En cuanto al pH del perfil 4, solo el horizonte CR es medianamente básico (7.87) y los demás son neutros (6.71 – 7.37) (Fig. 23), con una tendencia a aumentar el pH a mayor profundidad, lo cual sugiere mayor concentración de bases hacia la profundidad (Boul *et al.*, 1988).

b) Conductividad eléctrica (CE)

Incrementa hasta el horizonte Bs1, para después disminuir (Fig. 23).

c) Porcentaje de materia orgánica

En este perfil se determinaron los menores porcentajes de materia orgánica de todos los perfiles analizados, mostrando una tendencia a disminuir con la profundidad, encontrando un valor de 1.66% en Ap y de 0.07% en Bsr y CR (Fig. 23). Estos bajos porcentajes de materia orgánica están determinados por la acelerada mineralización de la materia orgánica debida a la puesta en cultivo (Rasmussen y Collins, 1991; Salomons, 1995).

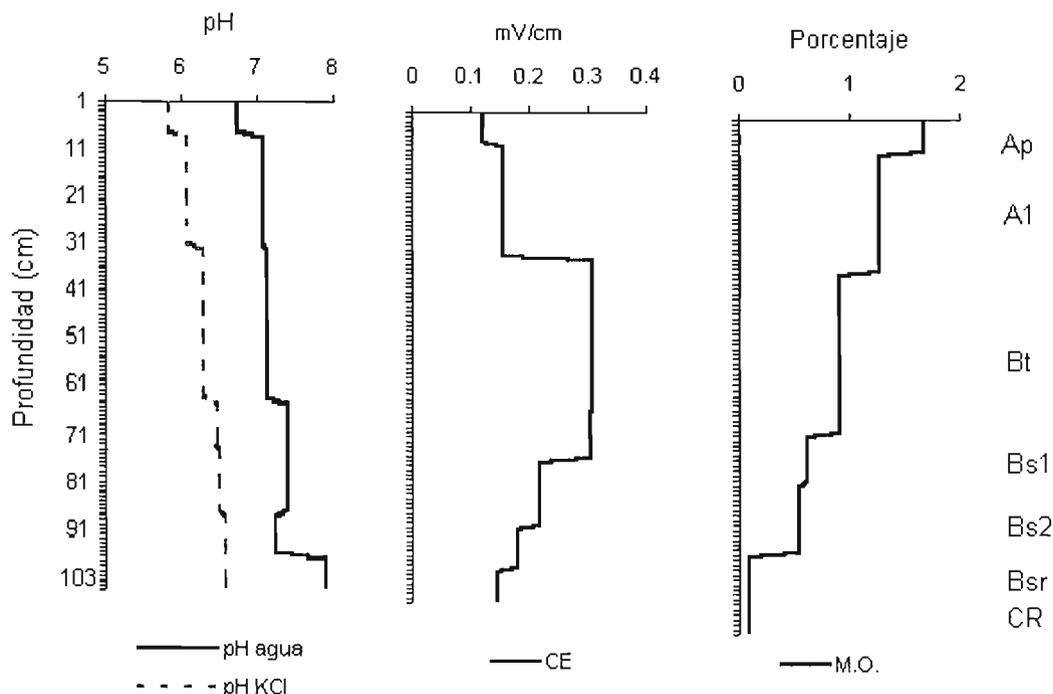


Figura 23. Características químicas: pH, conductividad eléctrica y materia orgánica en los distintos horizontes del perfil de suelo del rancho “Los Compadres”, Hacienda Solís, Temascalcingo, Estado de México.

d) Capacidad de intercambio catiónico

El horizonte con mayor capacidad de intercambio catiónico es el Bt, por lo que la CIC estaría determinada por los sitios de cambio incluidos en la arcilla (Ford, 1984; Bohn *et al.*, 1985); mientras que el menor valor se encuentra en Ap, probablemente porque el porcentaje de materia orgánica es muy bajo y por tanto existen pocos sitios de intercambio. Los valores van de 15 a 35 cmol/kg (Fig. 24).

e) Iones intercambiables

El calcio es el ión dominante, seguido por magnesio, sodio y finalmente potasio. Se observa que la concentración de los tres primeros aumenta donde existe mayor CIC y disminuye con ésta (Fig. 24); sin embargo, el potasio se encuentra en mayor concentración en el horizonte Ap, lo cual podría estar dado por la fertilización del terreno o bien por una competencia con los otros iones (INFOPOS, 1997).

f) Porcentaje de saturación de bases

El menor porcentaje de saturación de bases fue determinada en el horizonte Bt (81%), el cual presentó la mayor CIC, esto implicaría que no todos los sitios de cambio están saturados; mientras que en el horizonte Ap el 99.8% de los sitios de cambio están ocupados (Fig. 24) (Bohn *et al.*, 1985).

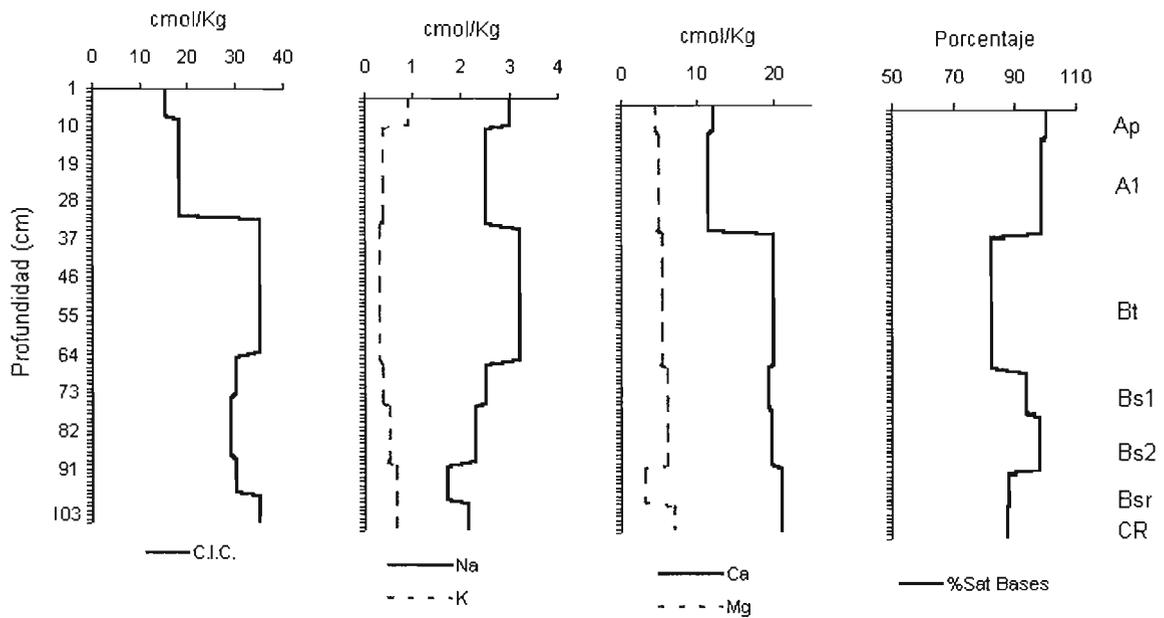


Figura 24. Características químicas: capacidad de intercambio catiónico, iones intercambiables (Na, K, Ca y Mg) y porcentaje de saturación de bases en los distintos horizontes del perfil de suelo del rancho "Los Compadres", Hacienda Solis, Temascalcingo, Estado de México.

Para el perfil 4 se determinó un horizonte **A mólico**, debido a la presencia de una estructura subangular moderada, de color 10YR2/2 en húmedo y 10YR5/2 en seco comparado con el color del horizonte Bg3 que es 10YR3/1 en húmedo y 10YR6/1 en seco; además tiene 1.22% de carbono orgánico (2.04% de materia orgánica), un porcentaje de saturación de bases de 76.8% y una profundidad de 18 cm.

El horizonte Bt se considera un horizonte **B árgico** pues presenta un 35.6% de arcilla, que relacionada con el 23.6% del horizonte Ap resulta en una razón de 1.51. Se localiza a 18 cm de profundidad con un espesor de 25 cm.

Por tanto, se trata de un suelo **Pheozem lúvico**.

4. Metales Pesados Totales

a) Cobalto

Para el perfil 4 los valores de cobalto reportados van de 10.15 a 19.75 $\mu\text{g g}^{-1}$, con tres horizontes en los que se incrementa su concentración (Fig. 25): Ap, donde se encuentra el menor pH determinado para este perfil (6.71), el cual se encuentra en el rango de mayor sorción de Co (McLaren *et al.*, 1986); Bt donde se encuentra la mayor cantidad de arcilla a la que se une debido a su gran área superficial (Vaithiyathatha *et al.*, 1992; Saeki *et al.*, 1993) y, CR donde se reporta un 40% de óxidos de manganeso en los que es fuertemente adsorbido (Perrono, 1999).

b) Cromo

Las concentraciones más bajas de cromo en el perfil 4 se determinaron en los horizontes Ap y A₁ (8.24 y 8.85 $\mu\text{g g}^{-1}$), posteriormente se incrementan hasta 23.8 $\mu\text{g g}^{-1}$ en el horizonte B_t, para

disminuir nuevamente hasta $12.15 \mu\text{g g}^{-1}$ (Fig. 25), por lo que estaría relacionado con las arcillas y sus propiedades superficiales de sorción (Vaithiyathana *et al.*, 1992; Saeki *et al.*, 1993), por consiguiente con la iluviación de ésta (Boul *et al.*, 1988; Alloway, 1990)

c) Cobre

En el caso del cobre, los valores van de 18.30 a $12.70 \mu\text{g g}^{-1}$ (Fig. 25), con la concentración más alta en el horizonte CR, donde existe la mayor cantidad de MnO_2 a los que estaría asociado debido a su alta superficie específica (Hickey y Kittrick, 1984) y, en Bt adsorbido por las arcillas (Loué, 1988; Vaithiyathana *et al.*, 1992; Saeki *et al.*, 1993)

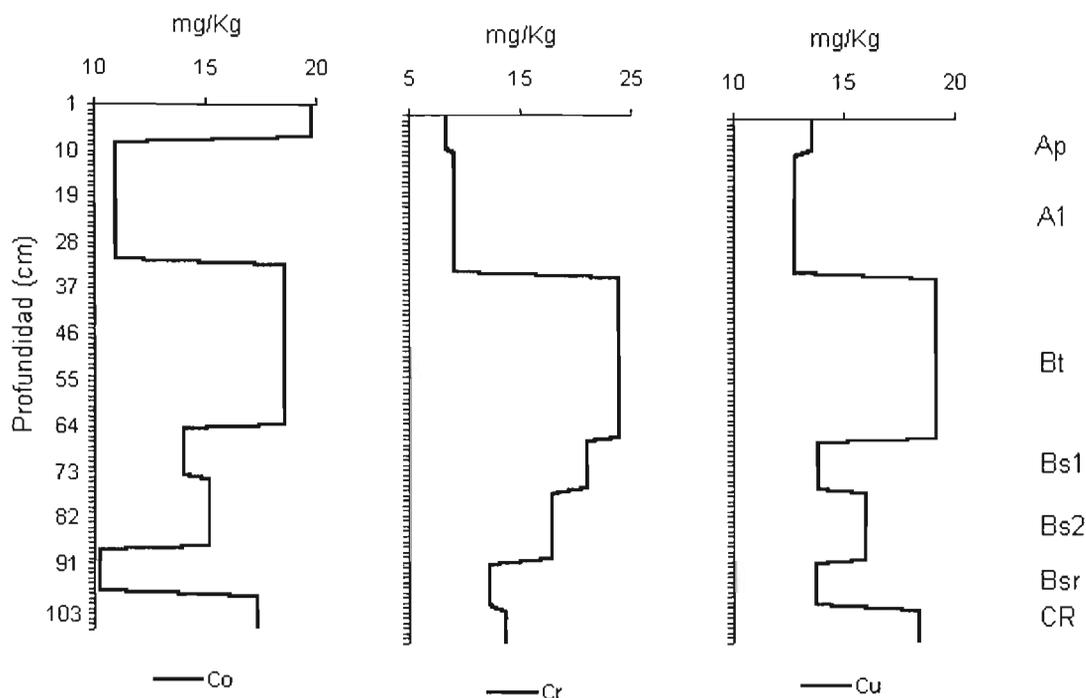


Figura 25. Metales pesados totales: Cobalto, Cromo y Cobre en los distintos horizontes del perfil de suelo del rancho "Los Compadres", Hacienda Solis, Temascalcingo, Estado de México.

d) Níquel

Los valores determinados para níquel van de 21.95 a $54.90 \mu\text{g g}^{-1}$, siendo este perfil en el que se determinó la mayor concentración (Fig. 26). Este último valor se localiza en Bs1 en donde existe MnO_2 por lo que puede estar sustituyendo al Mn en la superficie de los óxidos (Hickey y Kittrick, 1984) y, excede los límites propuestos por la República Federal Alemana y la Gran Bretaña. Con la movilización de éste elemento con los ciclos de óxido-reducción por la entrada de agua desde el manto freático, se induce la movilización del Ni hacia horizontes superiores (Salomons, 1995; Lee y Saunders, 2002).

e) Plomo

Con respecto al perfil 4, es el que presenta las menores concentraciones de Pb, con valores de 23 a $66.5 \mu\text{g g}^{-1}$ con una tendencia a disminuir hasta el horizonte B₁, para después volver a incrementarse (Fig. 26), encontrando una mayor concentración en Ap ($66.5 \mu\text{g g}^{-1}$) lo cual indica que su origen es antropogénico (Stigliani *et al.*, 1993). Otros horizontes donde se encuentra en altas concentraciones ($45 \mu\text{g g}^{-1}$) son Bt, donde se asocia a las arcillas y Bsr donde se asocia a MnO_2 , ambos por su alta superficie específica (Hickey y Kittrick, 1984; Vaithiyathana *et al.*, 1992; Saeki *et al.*, 1993).

f) Zinc

En el perfil 4 se observa que la mayor concentración se encuentra en el horizonte CR ($93.60 \mu\text{g g}^{-1}$) y la menor en el Ap ($43.15 \mu\text{g g}^{-1}$) (Fig. 26), lo que indicaría un origen predominantemente geogénico derivado de rocas ígneas (Loué, 1988).+63

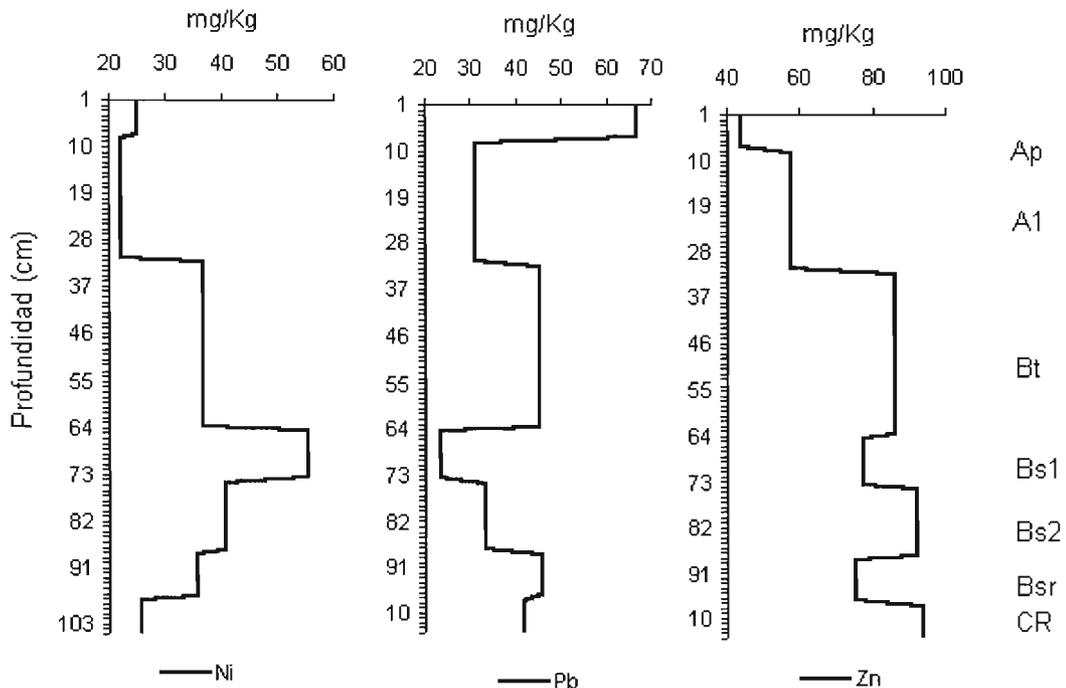


Figura 26. Metales pesados totales: níquel, plomo y zinc en los distintos horizontes del perfil de suelo del rancho “Los Compadres”, Hacienda Solís, Temascalcingo, Estado de México.

Perfil 5.

1. Descripción en campo

En la localidad de “Manto del Río”, municipio de Atlacomulco, Estado de México, se reportó un pH real de 4.99 en suelo superficial (Balderas, 1998), considerado éste como un factor preponderante en la sorción de metales pesados, así como su cercanía con el río Lerma fue elegido este sitio, realizando su descripción el 29 de noviembre de 1998. Se trata de un perfil de coloración oscura, sin manchas, con gran cantidad de lombrices en los tres primeros horizontes, con un horizonte de acumulación de arcilla en el que se observaron facetas de fricción presión y argilanes, en los últimos horizontes se observaron muchas lenguas y sus límites fueron quebrados, en el horizonte más profundo se encontraron evidencias de condiciones de óxido-reducción con la presencia de manchas rojizas. Al encontrar un horizonte A mólico y un B árgico, este perfil fue clasificado como Phaeozem lúvico. Las características generales del perfil son:

Fecha: 29 de noviembre de 1998
 Localidad: “Manto del Río”, Atlacomulco,
 Estado de México

Coordenadas geográficas: 19°50'05” latitud
 norte y 99°55'50” longitud oeste
 Geología: aluvión

Geoforma: terraza aluvial	Edad estratigráfica: cuaternario
Pendiente: 8 %	Uso del suelo: agrícola-práctico
Posición del perfil en la geoforma: mitad	Cultivos: maíz, rosales, trigo.
Litología: aluvión	Tenencia: propiedad privada
Pedregosidad superficial: < 0.01%	
Tamaño que domina: gravilla	Suelo: Phaeozem lúvico
Afloramientos rocosos: <2%	Profundidad: 141 cm
Erosión: ligera en surcos	Horizontes: 5
Material parental: muy alterado (transportado)	

Las principales características descritas para cada horizonte son:

Ap	0 – 18 cm	Color pardo muy oscuro en húmedo (10 YR 2/2) y pardo grisáceo en seco (10 YR 5/2), textura franca, estructura en bloques subangulares moderada, consistencia muy friable, no adhesivo, plástico, fresco, reacción fuerte a H ₂ O ₂ , sin manchas, límite gradual y ondulado.
	A mólico	
Btg	18 – 32/54 cm	Color gris muy oscuro en húmedo (10 YR 3/1) y gris en seco (10 YR 5/1), textura franco arcillosa, estructura en bloques angulares moderada, consistencia friable, ligeramente adhesivo, plástico, fresco, reacción moderada al H ₂ O ₂ , sin manchas, límite gradual e irregular.
	B árgico	
Bg1	32/54 – 61/70 cm	Color negro en húmedo (10 YR 2/1) y gris oscuro en seco (10YR 4/1), textura franco arcillosa, estructura en bloques angulares moderada, consistencia friable, ligeramente adhesivo, plástico, húmedo, reacción fuerte al H ₂ O ₂ y débil al NaF, sin manchas, límite gradual e irregular.
Bg2	61/70 – 80/91 cm	Color gris muy oscuro en húmedo (10 YR 3/1) y gris en seco (10 YR 5/1), textura franco arcillosa con tendencia a arcillosa, estructura en bloques angulares desarrollada, consistencia friable, muy adhesivo, muy plástico, húmedo, reacción moderada al H ₂ O ₂ y moderada al NaF, sin manchas, límite quebrado y en forma de lenguas.
Bg3	80/91 – 141 cm	Color gris muy oscuro en húmedo (10 YR 3/1) y gris en seco (10 YR 6/1), textura franco arcillosa, estructura en bloques angulares moderada, consistencia friable, adhesivo, plástico, húmedo, reacción débil al H ₂ O ₂ y débil al NaF, con pequeñas manchas rojizas, límite quebrado.

2. Características Físicas

a) Densidad aparente

La densidad aparente en el perfil 5 es homogénea, con valores que van de 1.18 a 1.05 gr/cm³ (Fig. 26).

b) Densidad real

El menor valor para densidad real se encuentra en el horizonte Bg1, con un valor de 1.98 gr/cm³; mientras que el horizonte Bt registró el mayor valor (2.52 gr/cm³) (Fig. 27), probablemente debido al mayor porcentaje de arcillas (Boul *et al.*, 1988; Birkeland, 1999).

c) Porosidad

El porcentaje de porosidad en el perfil 5 fluctúa alrededor del 50% (Fig. 27), por lo que existe buena aereación y flujo de agua (Baver *et al.*, 1990).

d) Textura

En todos los horizontes se encuentran texturas francas aunque con variaciones con respecto a la fracción dominante (Tabla 8). En relación a las fracciones granulométricas, el perfil 5 es el que presenta el mayor porcentaje de limo (Fig. 27). Presenta un horizonte de iluviación de arcillas (Btg) y probablemente en Btg exista un proceso de neoformación a partir del material aluvial (Breemen y Buurman, 1998; Birkeland, 1999).

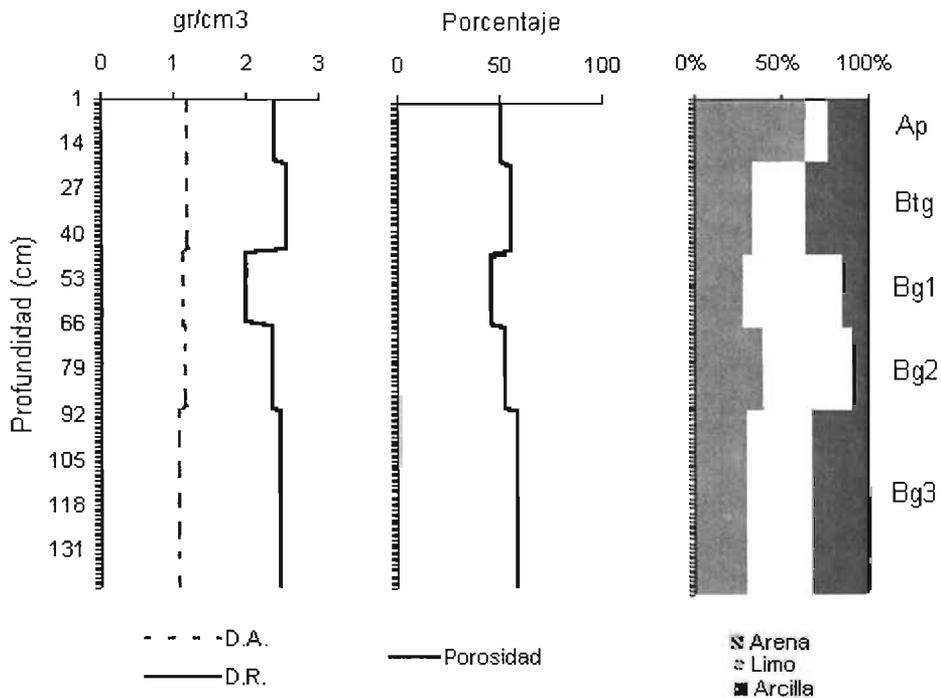


Figura 27. Características físicas: densidades real y aparente, porcentaje de porosidad y textura en los distintos horizontes del perfil de suelo de “Manto del Río”, Atlacomulco, Estado de México.

Horizonte	Textura
Ap	Franco arcillo limosa
Btg	Franco arcillosa
Bg ₁	Franco limosa
Bg ₂	Franco limosa
Bg ₃	Franco arcillosa

Tabla 8. Clases texturales en los distintos horizontes del perfil de suelo de “Manto del Río”, Atlacomulco, Estado de México.

3. Características Químicas

a) Potencial de hidrógeno (pH)

En el perfil 5, elegido por su acidez superficial (Balderas, 1998), el primer horizonte es muy fuertemente ácido (4.97), los tres siguientes son neutros (6.71 – 7.65) y los dos últimos medianamente básicos (7.65 – 7.67) (Fig.28), lo cual indica menor saturación de bases en el horizonte superficial y por tanto lixiviación de éstas hacia Btg, inducida por un mayor flujo de agua en Ap (Boul *et al.*, 1988; Birkeland, 1999).

b) Conductividad eléctrica (CE)

La mayor conductividad se observa en Ap, con un valor de 0.223, disminuyendo considerablemente en el Btg para mantenerse constante (0.124-0.111)(Fig. 28), por lo que existe mayor presencia de sales en la solución del suelo en el epipedión, las cuales pueden lixiviarse (Boul *et al.*, 1988).

c) Porcentaje de materia orgánica

El mayor porcentaje de materia orgánica se encuentra en el horizonte Ap (2.04%) y disminuye con la profundidad hasta 0.07% en Bg3 (Fig. 28). Los valores de materia orgánica corresponden a un suelo agrícola donde la mineralización de la materia orgánica es alta (Rasmussen y Collins, 1991; Salomons, 1995).

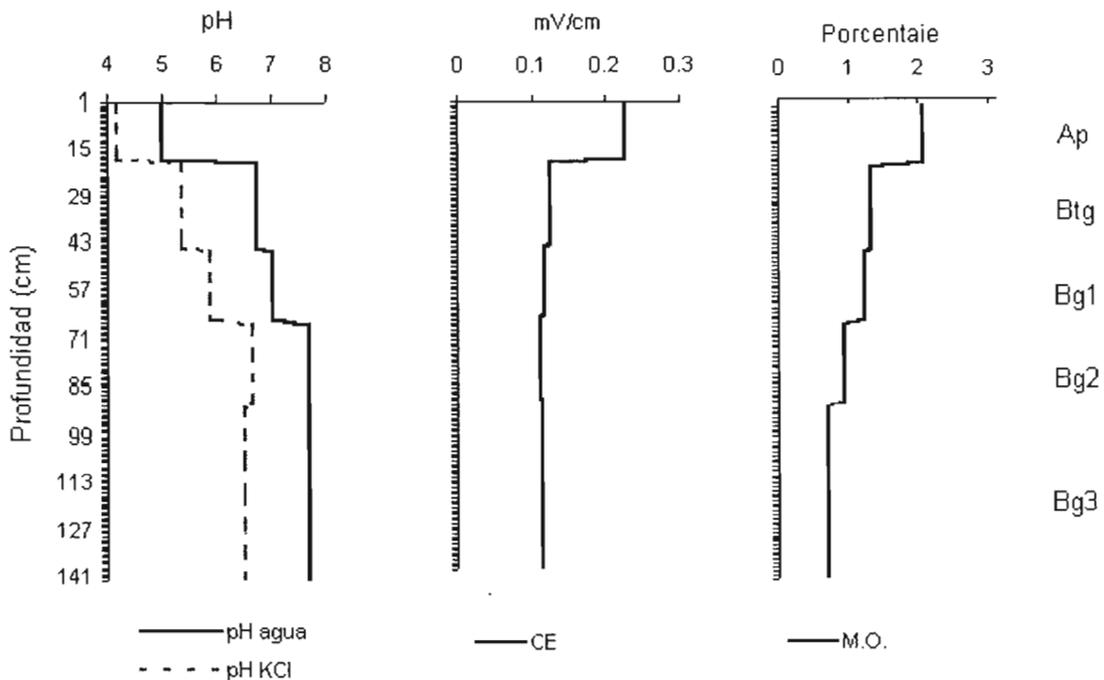


Figura 28. Características químicas: pH, conductividad eléctrica y materia orgánica en los distintos horizontes del perfil de suelo de "Manto del Río", Atlacomulco, Estado de México.

d) Capacidad de intercambio catiónico

La C.I.C. incrementa con la profundidad, va de 15 cmol/Kg en Ap a 25 cmol/Kg en Bg3, lo cual podría estar relacionado con el pH del suelo (Fig. 29), ya que a mayor pH disminuye el número de cargas eléctricas relacionadas a éste factor (Bohn *et al.*, 1985).

e) Iones intercambiables

Los iones intercambiables se encuentran en el siguiente orden decreciente: $Ca > Mg > Na > K$ (Fig. 29), siendo mayor su concentración en Bg, lo cual está determinado por un menor movimiento de agua en este horizonte (Birkeland, 1999).

f) Porcentaje de saturación de bases

En los horizontes Btg y Bg2 se encontraron porcentajes de saturación de bases mayores de 90% (Fig. 29), lo cual confirma la lixiviación de cationes hacia éstos horizontes. Es importante resaltar que Ap presenta un porcentaje de saturación de bases mayor al 50%, por lo que se trata de un epipedón mólico (Boul *et al.*, 1988).

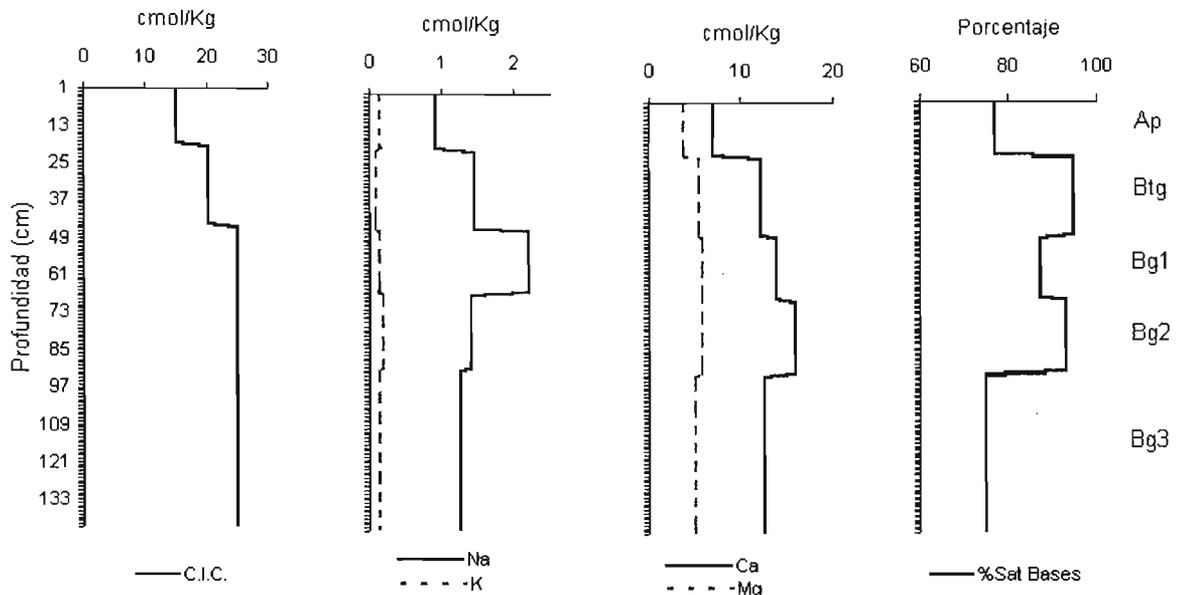


Figura 29. Características químicas: capacidad de Intercambio catiónico, iones intercambiables (Na, K, Ca y Mg) y porcentaje de saturación de bases en los distintos horizontes del perfil de suelo de "Manto del Río", Atlacomulco, Estado de México.

En este perfil se encontró un horizonte **A mólico**, debido a la presencia de una estructura subangular moderada; un color 10YR 2/2 en húmedo y 10YR 5/2 en seco, comparado con el del horizonte Bg3, que es 10YR 3/1 en húmedo y 10YR 6/1; con 1.22% de carbono orgánico (2.04% de materia orgánica), un porcentaje de saturación de bases del 76.8% y un grosor de 18 cm.

Además, presenta un horizonte **B árgico**, ya que el porcentaje de arcilla fue de 35.6%, comparado con el 23.6% de Ap, cuya razón es igual a 1.51: encontrándose a una profundidad de 18cm con un grosor de 25cm.

Por lo cual el suelo del perfil 5 es clasificado como **Phaeozem lúvico**.

4. Metales Pesados Totales

a) Cobalto

En el caso del perfil 5, la tendencia es a incrementar la concentración de cobalto con la profundidad con valores de 9.30 a 14.30 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Fig. 30); encontrando este último valor en el horizonte Bg2, el cual presenta el menor porcentaje de arcilla, por lo que podría existir una relación inversa entre ellos, siendo la arcilla poco importante para la sorción del Co en el suelo (McLaren *et al.*, 1986). También es probable que el bajo pH de los horizontes superiores facilite la migración del Co a través del perfil del suelo hasta un horizonte con un pH mayor, con el consiguiente incremento de la concentración del metal (McLaren *et al.*, 1986; Bourg, 1995) Además, es un horizonte con una reacción moderada al H_2O_2 , que indica la presencia de MnO_2 , en los que podría estar adsorbido (Perrono, 1999).

b) Cromo

Para el cromo también se observa una tendencia a incrementar la concentración al aumentar la profundidad con valores de 7.2 $\mu\text{g g}^{-1}$ en el horizonte Ap, a 20.55 $\mu\text{g g}^{-1}$ en el Bg2, para disminuir posteriormente (Fig. 30), lo cual también podría ser explicado en función del pH (Lake *et al.*, 1984; Bourg, 1995) y la presencia de MnO_2 (Perrono, 1999).

c) Cobre

Las concentraciones de cobre se encuentran entre 9.60 y 15.00 $\mu\text{g g}^{-1}$, elevándose en dos horizontes: Btg y Bg2 (Fig. 30), en los que se determinaron óxidos de manganeso a los que se puede unir por su alta superficie específica (Hickey y Kittrick, 1984).

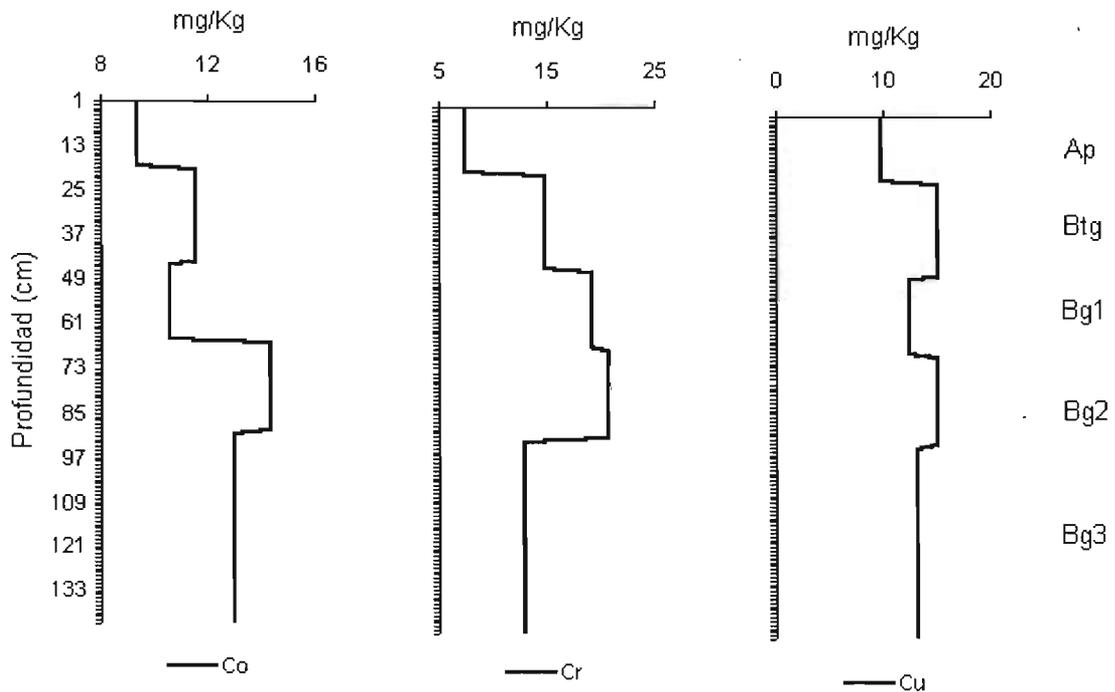


Figura 30. Metales pesados totales: cobalto, cromo y cobre en los distintos horizontes del perfil de suelo de "Manto del Río", Atlacomulco, Estado de México.

d) Níquel

En este perfil, los valores determinados para níquel van de 16.3 a 22.35 $\mu\text{g g}^{-1}$, mostrando la mayor acumulación en Btg y Bg2 (Fig. 31), lo cual esta dado por la sustitución de Ni por Mn en la superficie de los óxidos y su sorción en las arcillas (Hickey y Kittrick, 1984).

e) Plomo

La mayor concentración de plomo es superficial y tiende a disminuir con la profundidad, con valores de 68 a 21.5 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Fig. 31), lo cual indica un origen antropogénico (Stigliani *et al.*, 1993), donde la lixiviación a horizontes inferiores estaría controlada por el pH (Mortland, 1975; Bourg, 1995; Appel y Ma, 2002).

f) Zinc

Las muestras del perfil 5 se encuentran por debajo del límite propuesto por la Gran Bretaña con valores de 42.05 a 57.35 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Fig. 31), cabe resaltar que el resto de los perfiles rebasa este límite. En este caso, el valor mas alto para Zn corresponde al horizonte Bg3, el cual presenta también la mayor capacidad de intercambio catiónico con un porcentaje de saturación de bases relativamente bajo (74%), por lo que existe aproximadamente un 26% de sitios de cambio libres en los que podría sorberse el Zn, por formación de complejos inorgánicos (Al-Wabel *et al.*, 2002).

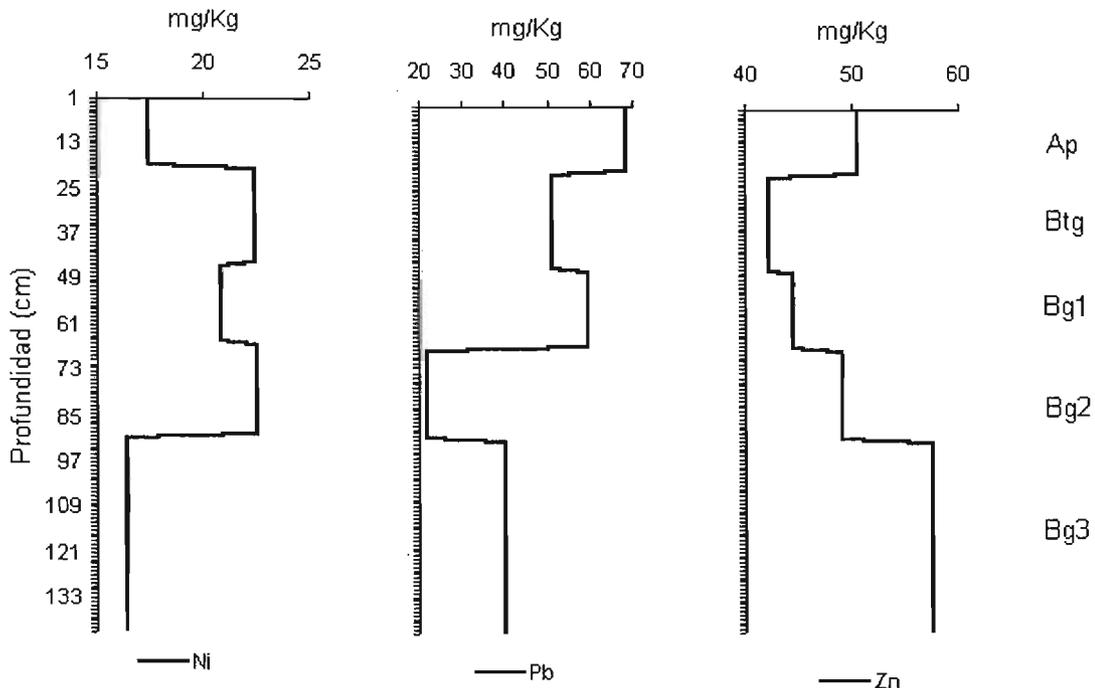


Figura 31. Metales pesados totales: níquel, plomo y zinc en los distintos horizontes del perfil de suelo de “Manto del Río”, Atlacomulco, Estado de México.

Perfil 6

1. Descripción en campo

Finalmente, el **perfil 6** fue descrito el 3 de diciembre de 1998, en el campus El Cerrillo "Piedras Blancas" de la Universidad Autónoma del Estado de México, en el municipio de Toluca, Estado de México. Se trata de un perfil de coloración oscura, friable, sin manchas, estructura en bloques subangulares, en el que existía entrada de agua entre el horizonte Bg₂ y el BC, con un horizonte de acumulación de arcilla en el que se observaron facetas de fricción-presión en la cara de los agregados, el cual fue determinado como B cámbico, y por tanto se trata de un cambisol. Sus características generales son:

Fecha: 3 de diciembre de 1998	Erosión: ligera en surcos
Localidad: El Cerrillo "Piedras Blancas", Toluca, Estado de México	Material parental: muy alterado (transportado)
Geología: aluvión	Edad estratigráfica: cuaternario
Geoforma: valle	Uso del suelo: agrícola-prática
Pendiente: menor al 1%	Cultivos: maíz y cebada.
Relieve: casi plano	Factores limitantes: heladas y vientos
Litología: aluvión	Tenencia: terreno federal donado a la UAEMéx.
Pedregosidad superficial: < 0.01%	Suelo: Cambisol eútrico
Tamaño que domina: gravilla	Profundidad: 120 cm
Afloramientos rocosos: <2%	Horizontes: 5

Para cada horizonte descrito las características son:

Ap	0 – 9 cm	Color negro en húmedo (10 YR 2/1) y pardo grisáceo oscuro en seco (10 YR 4/1), textura franco arcillo arenosa, estructura en bloques subangulares débil, consistencia muy friable, ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, fresco, reacción fuerte a H ₂ O ₂ , sin manchas, límite difuso y plano.
Bw	9 – 23 cm	Color pardo grisáceo oscuro en húmedo (10 YR 4/2) y pardo grisáceo en seco (10 YR 5/2), textura franco limosa fina, estructura en bloques subangulares moderada, consistencia friable, ligeramente adhesivo, plástico, húmedo, reacción fuerte al H ₂ O ₂ , sin manchas, límite difuso y plano.
	B cámbico	
Bg1	23 – 60 cm	Color gris muy oscuro en húmedo (10 YR 3/1) y pardo grisáceo en seco (10YR 5/2), textura franco arcillo limosa, estructura en bloques subangulares débil, consistencia friable, adhesivo, plástico, húmedo, reacción moderada al H ₂ O ₂ , sin manchas, límite difuso y plano.
Bg2	60 – 92 cm	Color gris muy oscuro en húmedo (10 YR 3/1) y pardo grisáceo en seco (10 YR 5/2), textura areno arcillosa, estructura en bloques subangulares muy débil, consistencia friable, adhesivo, plástico, húmedo, reacción moderada al H ₂ O ₂ , sin manchas, límite claro y plano.
BC	92 – 120 cm	Color pardo en húmedo (10 YR 5/3) y gris claro en seco (10 YR 7/2), textura franco areno arcillosa, estructura en bloques subangulares moderada, consistencia muy friable, no adhesivo, no plástico, húmedo, reacción débil al H ₂ O ₂ , sin manchas.

2. Características Físicas

a) Densidad aparente

Los valores determinados en el caso de la densidad aparente van de 0.99 a 1.25 gr/cm³(Fig. 32), donde el menor valor se encuentra en Ap, que es el horizonte con mayor contenido de materia orgánica (Aguilera y Martínez, 1989).

b) Densidad real

Dentro del perfil 6 la densidad real permanece constante, con valores de 2.18 a 2.40 gr/cm³ (Fig. 32), lo cual indica homogeneidad en la composición mineral del suelo, formado principalmente por illitas y vermiculitas (Breemen y Buurman, 1998; Birkeland, 1999).

c) Porosidad

Los porcentajes de porosidad determinados son cercanos al 50%, con 47% en los horizontes Bw y Bg2 (Fig.32), por lo que tienen buen flujo de agua y aire (Hillel, 1982).

d) Textura

En todos los horizontes se presentan las tres fracciones granulométricas representadas aunque en diferentes porcentajes, por lo que en todos los casos se determinó una textura franca, que va desde franco arenosa en el horizonte Ap hasta franco arcillosa en Bw y Bg2 (Tabla 9). Con respecto a las fracciones granulométricas, se observa un incremento de arena y limo en el Bg3; mientras que Bw y Bg2 presentan los mayores porcentajes de arcilla (31.6 y 37.6 %, respectivamente) (Fig. 32), lo cual refiere a un proceso de iluviación de arcillas en Bw y una neoformación en B₂ a partir del aluvión, previamente alterado (Duchaufour, 1978; Breemen y Buurman, 1998; Birkeland, 1999).

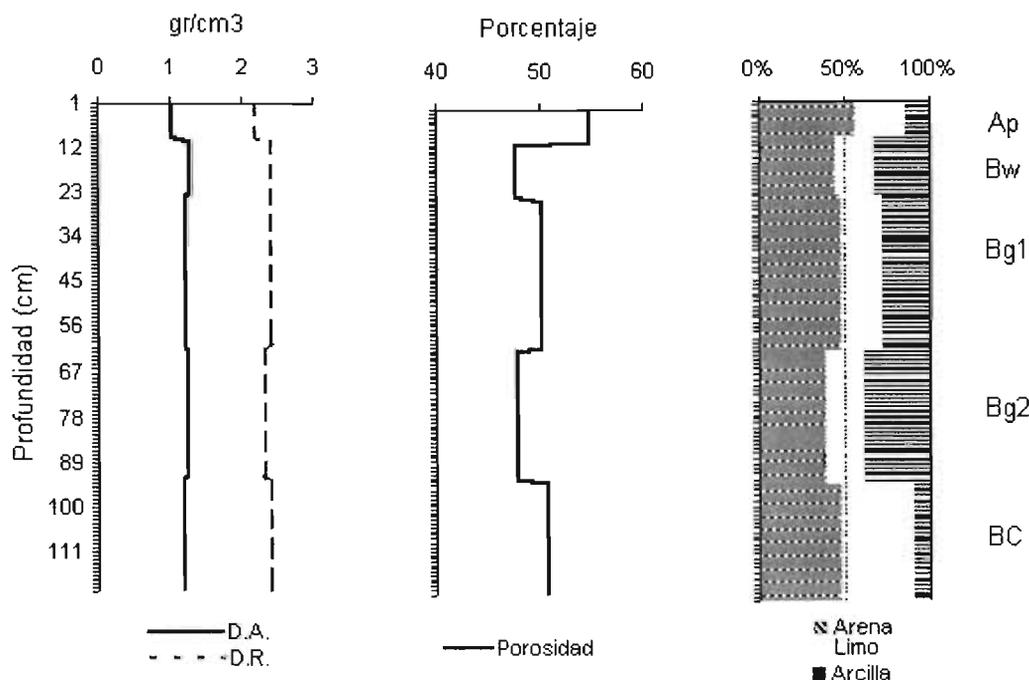


Figura 32. Características físicas: densidades real y aparente, porcentaje de porosidad y textura en los distintos horizontes del perfil de suelo de El Cerrillo “Piedras Blancas”, Toluca, Estado de México.

Horizonte	Textura
Ap	Franco arenosa
B _w	Franco arcillosa
B ₁	Franco arcillo limosa
B ₂	Franco arcillosa
BC	Franca

Tabla 9. Clases texturales en los distintos horizontes del perfil de suelo de El Cerrillo “Piedras Blancas”, Toluca, Estado de México.

3. Características Químicas

a) Potencial de hidrógeno (pH)

Todos los horizontes de este perfil presentan pH neutro (6.6-7.3) (Fig. 33), por lo que es un suelo saturado en bases, en el que no existe un fuerte lavado ni migración de materiales (Boul, 1988).

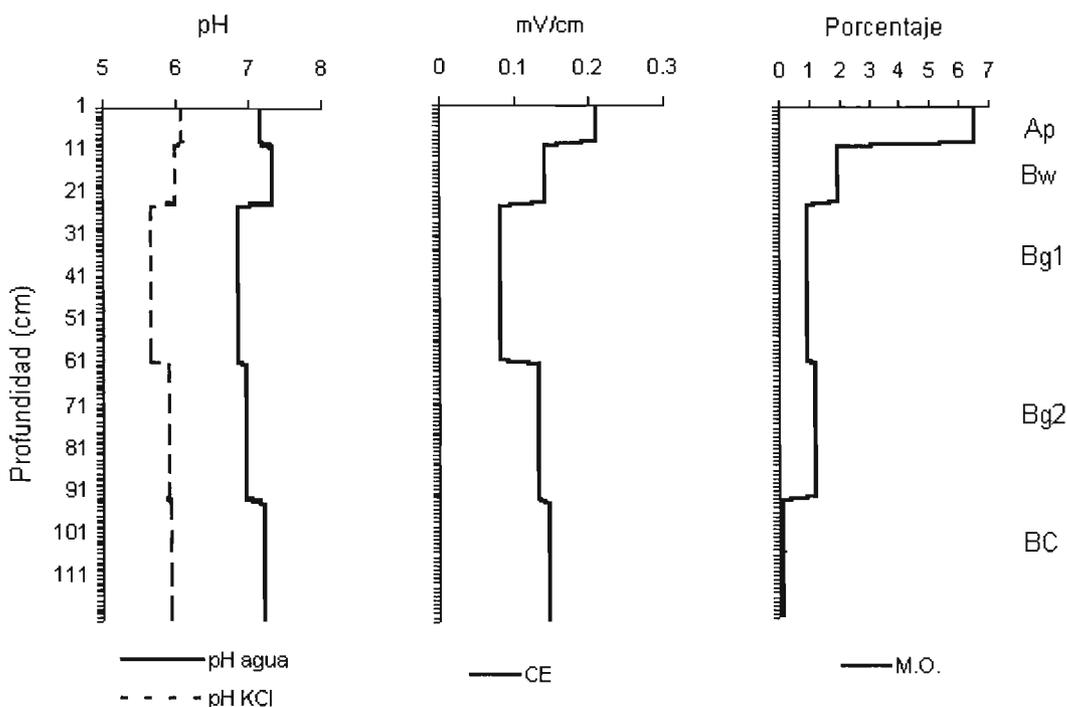


Figura 33. Características químicas: pH, conductividad eléctrica y materia orgánica en los distintos horizontes del perfil de suelo de El Cerrillo “Piedras Blancas”, Toluca, Estado de México.

b) Conductividad eléctrica (CE)

Presenta valores de 2.06 a 0.08, encontrando el valor mas alto en Ap y los más bajos en los horizontes más arcillosos (Fig. 33), por lo que existe mayor acumulación de sales en el epipedión (Boul *et al.*, 1988).

c) Porcentaje de materia orgánica

En el horizonte Ap del perfil 6 el porcentaje de materia orgánica es muy elevado: 6.47%, debido a que la vegetación sustentada son pastos con un sistema radicular muy distribuido en el primer horizonte y por tanto grandes cantidades de residuos depositados; además, de encontrarse en un clima templado donde la tasa de descomposición es baja (Duchaufour, 1973; Boul, 1988; Rasmussen y Collins, 1991).

d) Capacidad de intercambio catiónico

Debido al alto porcentaje de materia orgánica, el horizonte Ap en el que el porcentaje de materia orgánica es más alto, presenta la mayor capacidad de intercambio catiónico con 27 cmol/Kg (Fig. 34), lo cual es debido a la presencia de sitios de cambio en ésta (Bohn *et al.*, 1985). Seguido por Bg2 con 25 cmol/Kg, debido a la acumulación de arcillas, las cuales presentan cargas por sustitución isomorfica ((Bohn *et al.*, 1985).

e) Iones intercambiables

La concentración de los iones intercambiables disminuye hasta el horizonte Bg1 para volver a incrementarse, presentando el siguiente orden descendiente de concentración $Ca^{+2} > Mg^{+2} > Na^{+} > K^{+}$ (Fig. 34). Al ser el calcio el catión dominante, existe floculación y bajas probabilidades de migración de arcillas (Birkeland, 1999).

f) Porcentaje de saturación de bases

Al existir una disminución de la concentración de iones intercambiables en Bg1 el menor valor reportado se encuentra en este horizonte con un valor de 60.95% (Fig. 34), por lo que en todos los casos es mayor al 50%. Estos valores de saturación de bases indican que la lixiviación es baja, particularmente en clima templado como es el caso (Boul *et al.*, 1988).

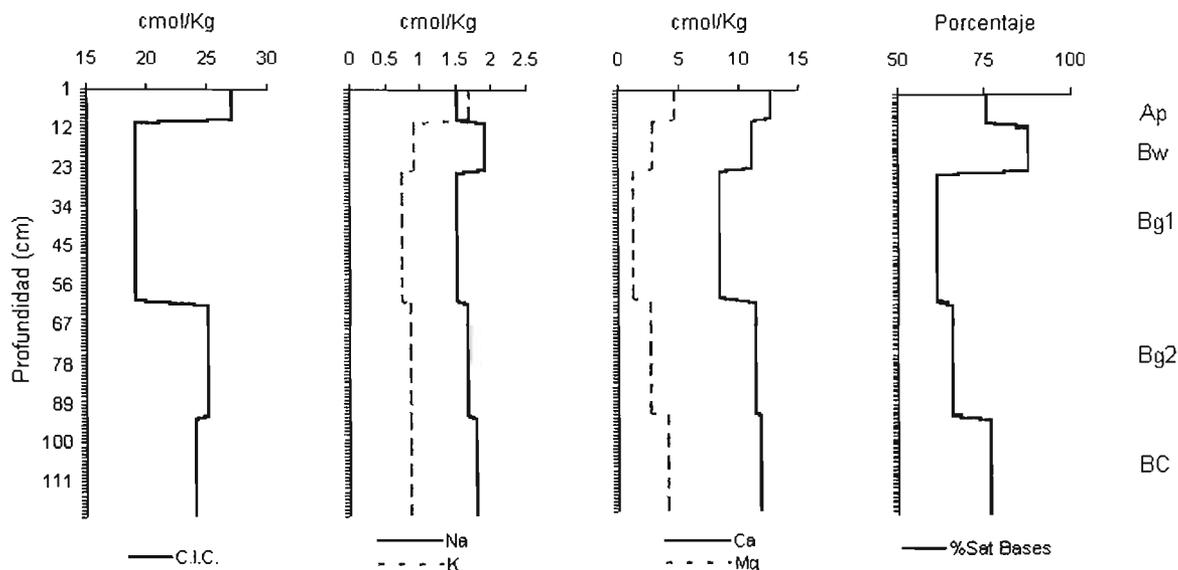


Figura 34. Características químicas: capacidad de intercambio catiónico, iones intercambiables (Na, K, Ca y Mg) y porcentaje de saturación de bases en los distintos horizontes del perfil de suelo de El Cerrillo “Piedras Blancas”, Toluca, Estado de México.

Los horizontes diagnóstico determinados para el perfil 6 son un **A ócrico** debido a que es muy delgado con solo 9 cm de grosor y, un **B cámbico** que presenta una textura franco arcillosa, una estructura subangular débil, un porcentaje de arcilla de 31.6% comparado con el 13.6% del Ap y una capacidad de intercambio catiónico de 19 cmol/Kg. Por lo que se trata de un **Cambisol eútrico**.

4. Metales Pesados Totales

a) Cobalto

Dentro del perfil 6 la concentración de cobalto presenta valores que van de 19.75 a 26 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Fig. 35), este último en el horizonte Ap, por lo que podría estar relacionado con la materia orgánica, formando quelatos (Perrono, 1999; Zhang *et al.*, 2004). Además, se encuentra en una concentración considerable en Bg2, en el que se sugiere neoformación de arcillas, por lo que en parte podría ser de origen geogénico derivado de rocas ígneas (Loué, 1988).

b) Cromo

En el horizonte Bg1, donde existe una disminución de la capacidad de intercambio catiónico, el porcentaje de materia orgánica, el porcentaje de saturación de bases y del porcentaje de arcilla, se encuentra la mayor concentración de cromo para el perfil 6, con un valor de $28.75 \mu\text{g g}^{-1}$ por lo que estaría en relación inversa a dichos parámetros. El menor valor determinado para cromo fue de $15.60 \mu\text{g g}^{-1}$ en el horizonte Bw (Fig. 35).

c) Cobre

La concentración de cobre para el horizonte Ap fue de $30.20 \mu\text{g g}^{-1}$ (Fig.35), siendo éste el mayor valor determinado para este elemento, por lo que se encuentra directamente relacionado con la materia orgánica, al formar quelatos con ella (Chen *et al.*, 1996; Pérez-Cid *et al.*, 1996; Alva *et al.*, 2000; Vulkan *et al.*, 2002). También se encuentra en Bg2, por lo que en parte sería derivado de rocas ígneas (Louè, 1988).

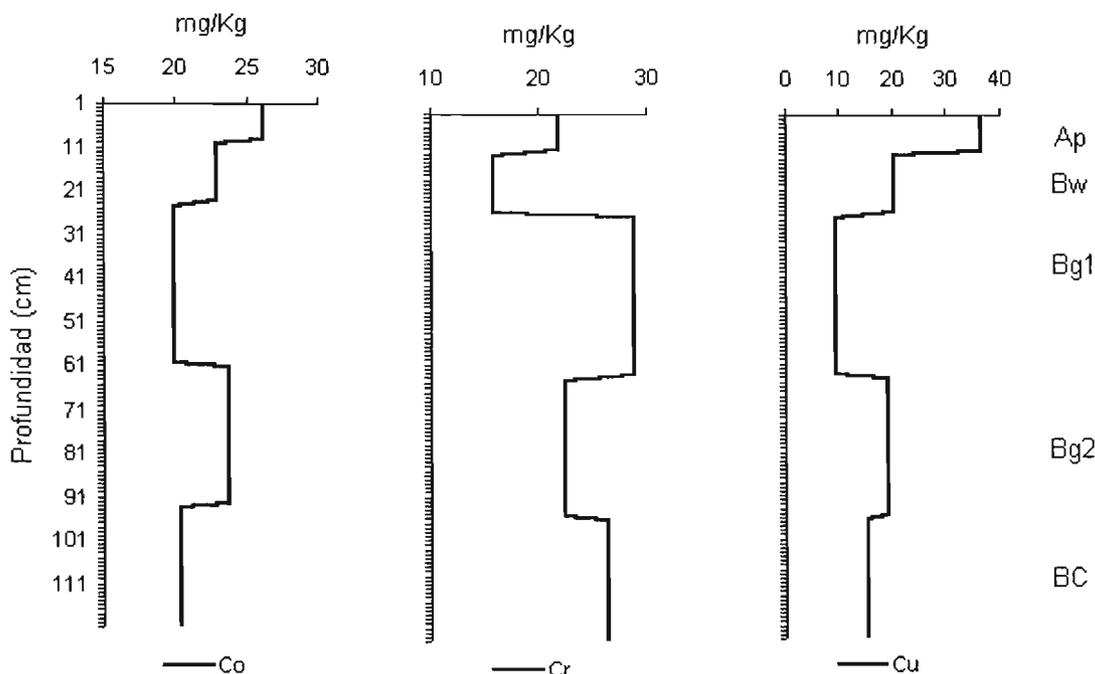


Figura 35. Metales pesados totales: cobalto, cromo y cobre en los distintos horizontes del perfil de suelo de El Cerrillo "Piedras Blancas", Toluca, Estado de México.

d) Níquel

La mayor concentración de níquel se presenta en el horizonte Bg1 con $40.55 \mu\text{g g}^{-1}$, por lo que también estaría inversamente relacionado con la capacidad de intercambio catiónico, el porcentaje de materia orgánica, el porcentaje de saturación de bases y del porcentaje de arcilla, quedando atrapado entre dos horizontes con alto porcentaje de arcilla. Mientras que en el horizonte Ap se determinó la menor concentración, que fue de 26.3 (Fig. 36).

e) Plomo

En el perfil 6 existe una tendencia a incrementar la concentración de plomo con la profundidad, con un valor de $38 \mu\text{g g}^{-1}$ para el horizonte Ap, que incrementa hasta $78.5 \mu\text{g g}^{-1}$ en Bg2, el cual presenta un alto porcentaje de arcilla (Appel y Ma, 2002) y, luego vuelve a disminuir (Fig.36).

f) Zinc

Dentro de este perfil se determinó la muestra con mayor contenido de zinc en el horizonte Ap con $105.30 \mu\text{g g}^{-1}$ y una mínima de $68.65 \mu\text{g g}^{-1}$ en el horizonte Bg1 (Fig.36), que posteriormente se incrementa ligeramente, por lo que podría estar relacionado con el porcentaje de materia orgánica en

el primero y con un incremento en la arcilla en el segundo, ya que el Zn es fácilmente adsorbido por los componentes minerales, principalmente las arcillas y orgánicos (Perrono, 1999; Pueyo *et al.*, 2003).

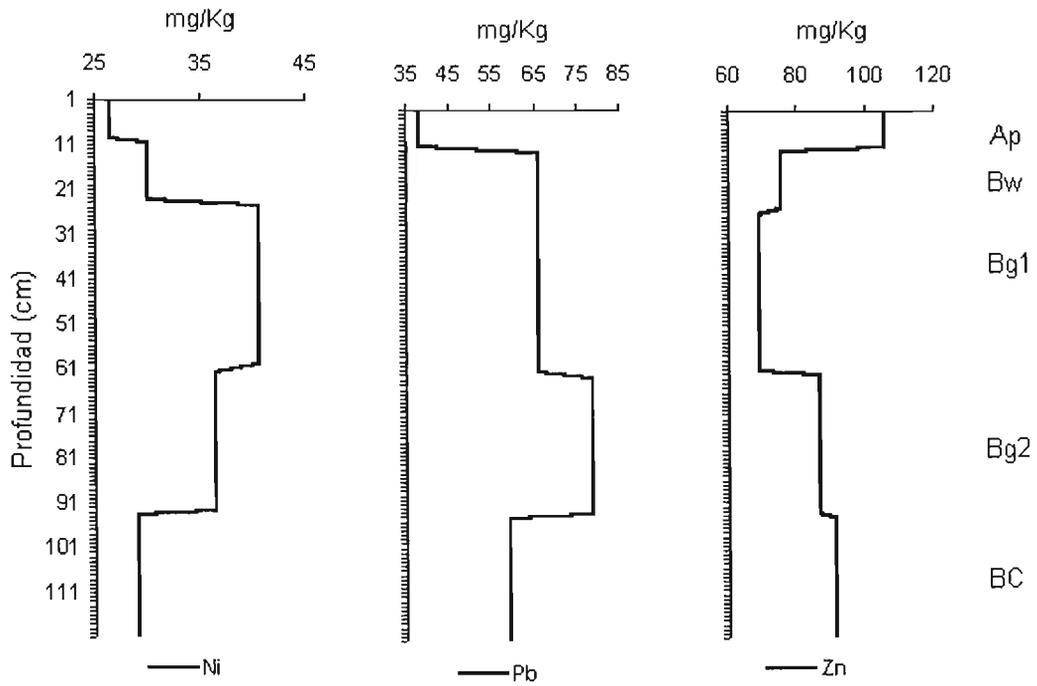


Figura 36. Metales pesados totales: níquel, plomo y zinc en los distintos horizontes del perfil de suelo de El Cerrillo "Piedras Blancas", Toluca, Estado de México.

Fraccionamiento de metales pesados

La accesibilidad de un elemento para las plantas está determinada primero por su origen, el cual influye sobre su forma química y en su asociación con los componentes del suelo (Kabata-Pendias, 1995). La concentración de metales pesados en solución está determinada por la cantidad adsorbida por las partículas reactivas del suelo, como son humus, óxidos de hierro, manganeso y aluminio, y las arcillas aluminosilicatadas (Wild, 1993).

Los metales en el suelo pueden ser de origen litogénico o antropogénico y su distribución en las partículas del suelo depende de la variabilidad en las características físicas y químicas de los metales que sean afines a los componentes del suelo (Kabata-Pendias, 1995)

Se considera que los metales en suelos pueden estar presentes en las siguientes formas físico-químicas: i) iones simples o complejos en la solución del suelo, ii) iones intercambiables, iii) ligados a la materia orgánica, iv) ocluidos o coprecipitados en óxidos metálicos, carbonatos, fosfatos u otros minerales secundarios, ó v) iones en las capas interlaminares de los cristales de minerales primarios. Así, se definen cinco fracciones: I) intercambiable, II) ligada a carbonatos, III) ligada a óxidos de Fe y Mn, IV) orgánica y sulfuros, y V) residual (Lake et al., 1984; Keller y Védy, 1994; Vaca-Paulín, 1999).

Los metales que pueden ser movilizados con mayor facilidad se encuentran relacionados con las fases orgánica, intercambiable e hidrosoluble; estas fases son las que se encuentran directamente involucradas en la migración y fitodisponibilidad para las plantas; mientras que, los elementos menos móviles, se encuentran relacionados con uniones a silicatos en la fracción residual (Kabata-Pendias, 1995). Las fracciones residuales disminuyen a mayores niveles de contaminación, lo cual es atribuido a las contribuciones antropogénicas al suelo contaminado (Pueyo *et al.*, 2003)

En el presente trabajo, se realizó el fraccionamiento de los metales pesados Co, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn, en las muestras obtenidas de los cuatro primeros horizontes de los perfiles 2, 5 y 6, debido a que estos resultaron ser los más contaminados por las concentraciones de metales pesados totales determinadas en ellos; además, el perfil 5 mostró las mayores diferencias en cuanto a pH, que es uno de los principales factores que controlan la migración de los metales y podría ser determinante en la unión de los metales a las distintas fracciones del suelo. Es importante señalar que solo se consideraron los cuatro primeros horizontes de cada uno porque los horizontes inferiores CR y R, tienen poca influencia sobre las plantas, además de que en general, se les encontraron concentraciones bajas de metales.

Cobalto

El mayor porcentaje de este elemento se encuentra en la fracción residual (Fig.37), que corresponde a los metales que se encuentran en las fases minerales menos alterables (Keller y Védy, 1994). En el perfil 2, más del 60% se encuentra ligado a dicha fase y solamente en el horizonte Ap $0.4 \mu\text{g g}^{-1}$ de este elemento en la fase ligada a carbonatos; en todos los horizontes se encontró entre un 10 y un 20% del Co unido a óxidos de Fe y Mn en donde es fuertemente adsorbido (Perrono, 1999), por lo que se encuentra principalmente en forma inmóvil. Dentro del perfil 5, se detectó en el horizonte Ap en la fracción intercambiable una concentración de $1.75 \mu\text{g g}^{-1}$, en forma biodisponible; sin embargo, considerando que es un microelemento, esta concentración podría no ser considerada como un problema; en el mismo horizonte se determinó aproximadamente un 15% de Co ligado a carbonatos, un 25% unido a óxidos de Fe y Mn y un 60% en la fase residual; en el resto de los horizontes el 100% del Co está en la fracción residual, por lo que no puede ser movilizado. En cuanto al perfil 6, entre el 60 y el 80 % se encuentra en la fracción residual, con el menor porcentaje en el

horizonte Bt, en el que el 30% se une a óxidos de Fe y Mn y el 10% restante a materia orgánica y sulfuros; en el horizonte Ap $0,9 \mu\text{g g}^{-1}$ se determinaron unidos a carbonatos, $3,14 \mu\text{g g}^{-1}$ a óxidos de Fe y Mn y $21,89 \mu\text{g g}^{-1}$ en la fracción residual; en el horizonte A_1 , el 75% se localiza en la fracción residual, 10% ligada a materia orgánica y sulfuros, y 15% en óxidos de Fe y Mn; en el horizonte B_1 , el 18% unido a óxidos de Fe y Mn, y 82% en la fracción residual; de lo cual se desprende que la mayor parte del Co se encuentra inmóvil en este perfil. En general, el Co no se encuentra en la fase soluble del suelo; sin embargo, unido a quelatos orgánicos móviles puede ser biodisponible (Perrono, 1999; Zhang *et al*, 2004).

Es importante considerar que el Co es necesario para la formación de vitamina B_{12} , por lo que los rumiantes pueden enfermar al consumir plantas en las que no se presenta este elemento y al pasar por la cadena trófica, puede existir anemia perniciosa en humanos, debido a que esta vitamina se obtiene a partir de la carne y leche del ganado (Kubota y Allaway, 1983; Bidwell, 1990), por lo que incluso se podría considerar deficiencia de este elemento en la zona de estudio.

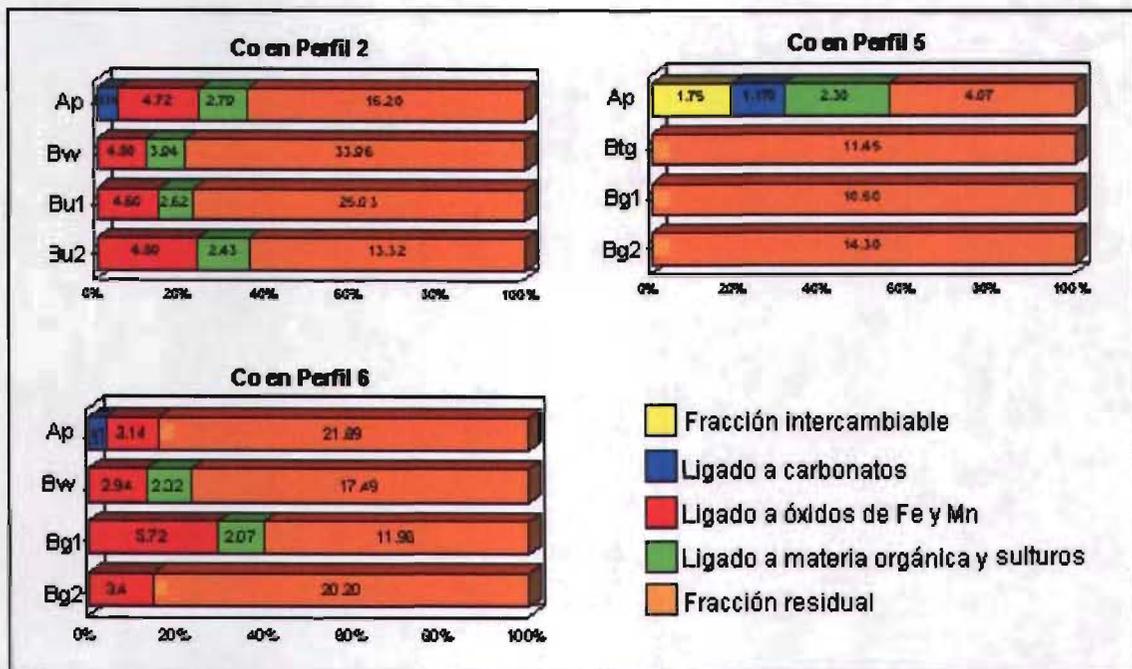


Figura 37. Porcentaje de las fracciones de cobalto en los distintos horizontes de los perfiles "El aguaje", "Manto del Río" y El Cerrillo "Piedras Blancas".

Cromo

El cromo puede considerarse como poco móvil dentro de los perfiles seleccionados, debido a que la mayor parte de él fue determinado en la fracción residual, en la ligada a óxidos de Fe y Mn y, en menor proporción, en la ligada a la materia orgánica y sulfuros (Fig. 38). Esto podría ser explicado debido a que el Cr puede sustituir isomórficamente al Fe y Al en minerales como illitas o esmectitas, o bien puede formar precipitados insolubles e hidróxidos (Sposito, 1989; Sheppard y Thibault, 1992); además, la mayor parte del cromo liberado por las industrias es hexavalente y, de éste, un alto porcentaje es reducido a Cr^{+3} , el cual es más estable y predomina sobre las formas órgano-metálicas o, más generalmente, forma precipitados de óxidos hidratados, asociados o incluidos dentro de óxidos de hierro y los complejos órgano-metálicos insolubles (Perrono, 1999)

Dentro del perfil 2, se observa que aproximadamente un 10% del elemento se encuentra ligado a los óxidos de Fe y Mn en todos los horizontes, y el 90% restante en la fracción residual; sin

embargo, en el horizonte Ap se determinaron 4.2 $\mu\text{g/g}$ de Cr unidas a materia orgánica y sulfuros, por lo que el Cr de la fracción residual sólo alcanza un 60%. En los perfiles 5 y 6 la presencia del Cr en la fracción ligada a materia orgánica y sulfuros permanece en todos los horizontes, si bien es mayor en los horizontes Ap de ambos perfiles; esto se debe a la formación de complejos Cr-orgánicos en la capa superficial del suelo (Schalscha *et al.*, 1980); sin embargo, la disponibilidad del Cr es baja debido a que la materia orgánica reduce este elemento de Cr^{+6} a Cr^{+3} (Kabata-Pendias y Pendias, 1992).

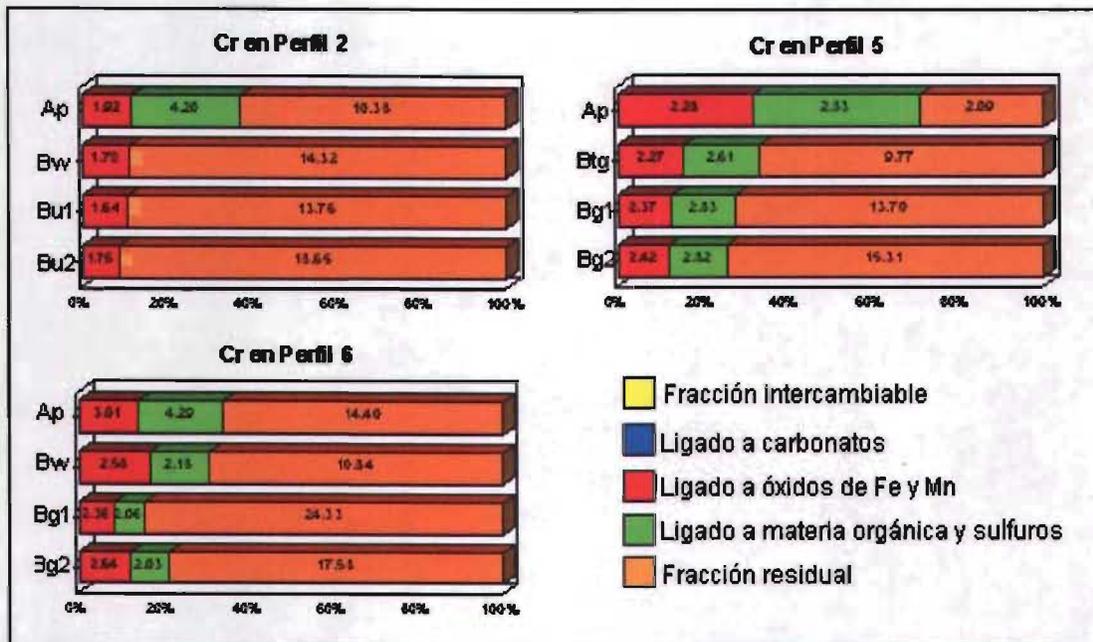


Figura 38. Porcentaje de las fracciones de cromo en los distintos horizontes de los perfiles "El aguaje", "Manto del Río" y El Cerrillo "Piedras Blancas".

Cobre

En general, más del 30% del cobre se encuentra en la fracción intercambiable (Fig. 40) muy probablemente en formas hidrolizadas, como CuOH y $\text{Cu}(\text{OH})_2^{+2}$ (Kabata-Pendias y Pendias, 1992; Kabala y Singh, 2001; Jackson *et al.* 2003; Pueyo *et al.*, 2003). Los valores de esta fracción fluctúan alrededor de 6 $\mu\text{g/g}$, lo cual puede ser considerado positivo, debido a que el cobre es un micronutriente componente de varias enzimas importantes como la polifenol oxidasa y la ácido ascórbico oxidasa; además, el Cu está presente en la plastocianina de los cloroplastos, necesaria en el sistema transportador de electrones en la fotosíntesis y puede estar involucrado en la reducción de nitritos (Bidwell, 1990).

En el perfil 6, del 20 al 50% del Cu se determinó ligado a óxidos de Fe y Mn, lo cual puede estar determinado por su alta superficie específica y la capacidad del Cu^{+2} para sustituir al Fe^{+2} en algunos óxidos (Hickey y Kittrick, 1984). En el horizonte Ap del perfil 6, un 10% de Cu se encuentra asociado a materia orgánica, lo cual se debe principalmente a la elevada constante de estabilidad de complejos Cu-orgánicos uniéndose a especies que contienen de 5 a 6 átomos de carbono (Chen *et al.*, 1996; Pérez-Cid *et al.*, 1996; Lena y Gade, 1997; Alva *et al.*, 2000; Vulkan *et al.* 2002).

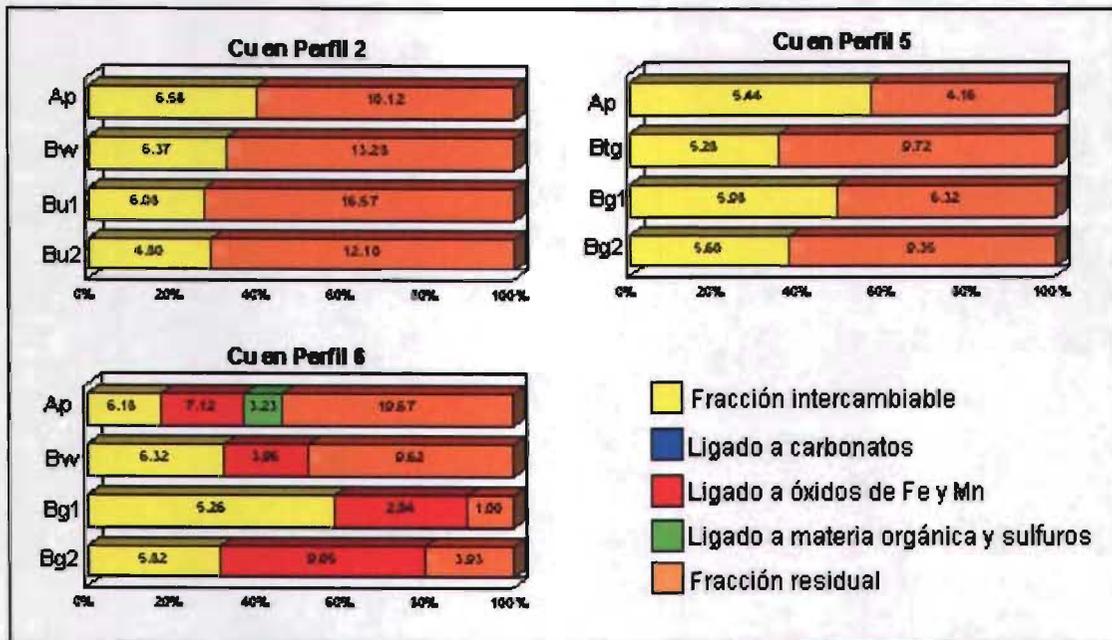


Figura 39. Porcentaje de las fracciones de cobre en los distintos horizontes de los perfiles “El aguaje”, “Manto del Río” y El Cerrillo “Piedras Blancas”.

Níquel

En los tres perfiles estudiados se observa que, en general, se encuentra el 50% o más de níquel en la fracción residual, por lo que debe ser parte constituyente de las arcillas; además, en todas las muestras se determinó como componente de la materia orgánica y sulfuros en aproximadamente un 20% y en la mayoría de los horizontes se encontró de forma intercambiable (Fig. 41).

La formación de precipitados de Ni en suelos puede darse a través de tres mecanismos principales: i) sustitución isomórfica de Al por Ni en las capas octaédricas de hidróxidos tipo brucita; ii) Intercambio de Si por NO_3 en los precipitados interlaminares, y iii) Incremento en las fases precipitadas (Scheckel y Sparks, 2001)

El níquel presenta una fuerte propensión a unirse a la materia orgánica, y es uno de los elementos más susceptibles de migrar dentro de un perfil, debido a que parte de la concentración es de fácil extracción (Perrono, 1999; Jackson *et al.* 2003); sin embargo, se ha reportado que la mayor parte del níquel se encuentra en forma inorgánica y residual, proviniendo de detritos, por lo que forma parte de la estructura de las arcillas, en particular cuando sustituye isomórficamente al Fe (Tessier *et al.*, 1979; Tuin y Tels, 1990; Sposito, 1989; Zemberyová, *et al.*, 1998; Sowder *et al.*, 2003).

Con respecto al perfil 2, la fracción intercambiable alcanza un valor de $4.56 \mu\text{g/g}$ en el horizonte Ap, para después mostrar una tendencia a disminuir a lo largo del perfil. El níquel ligado a carbonatos sólo se determinó en el horizonte B₁, aunque en una concentración muy baja ($1.9 \mu\text{g g}^{-1}$); en todos los horizontes se encontró ligado a óxidos de Fe y Mn en aproximadamente un 20%, esto puede ser debido a la sustitución de Ni^{+2} por el Mn en la superficie de los óxidos (Hickey y Kittrick, 1984). En cuanto al Ni ligado a la fracción orgánica y sulfatos, se observa una tendencia a disminuir al incrementar la profundidad del perfil; sin embargo, no es directamente proporcional al porcentaje de materia orgánica lo que podría indicar una migración dentro del perfil a través de esta fracción.

En el perfil 5 la fracción intercambiable sólo fue determinada en los horizontes Ap y Bt, con concentraciones muy bajas ($1.6 \mu\text{g g}^{-1}$); el níquel ligado a carbonatos ocupa aproximadamente el 10% en todos los horizontes, manteniéndose relativamente constante; el Ni ligado a óxidos de Fe y Mn solo se determino en los horizontes A en aproximadamente 15%; con respecto a la fracción orgánica y sulfatos es mayor en el horizonte Ap, para después disminuir, manteniéndose constante en el resto, sin ser proporcional al porcentaje de materia orgánica del perfil.

La fracción intercambiable de níquel en el perfil 6 se mantiene constante a lo largo del perfil con un 8% ($2.2 \mu\text{g/g}$); ligado a carbonatos se encuentra un 10% ($3.3 \mu\text{g/g}$); ligado a óxidos de Fe y Mn se incrementa con la profundidad del perfil; con respecto a la fracción orgánica y sulfatos es mayor en el horizonte Ap, para después disminuir, manteniéndose constante en el resto, sin ser proporcional al porcentaje de materia orgánica del perfil.

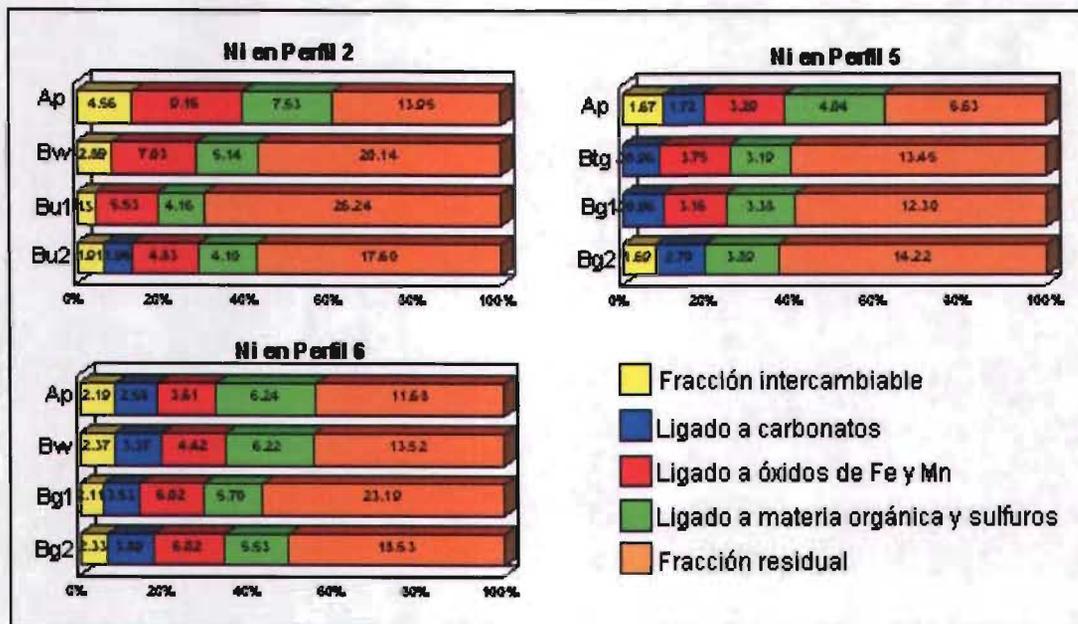


Figura 40. Porcentaje de las fracciones de níquel en los distintos horizontes de los perfiles "El aguaje", "Manto del Río" y El Cerrillo "Piedras Blancas".

Plomo

El plomo es considerado el más pesado de los metales y no es un nutriente fisiológico, por lo que su acumulación en el suelo puede causar contaminación. Sin embargo, no se han reportado efectos adversos a bajas concentraciones (Wild, 1993).

La fracción en la que se concentra la mayor cantidad de plomo en los tres perfiles estudiados es la residual, seguida de la fracción ligada a carbonatos (Fig. 42). Las arcilla y sobre todo la materia orgánica representan las fases de adsorción dominantes del plomo. A un pH de ácido a neutro, los iones Pb^{+2} y $\text{Pb}(\text{OH})^+$ predominan en la solución del suelo; mientras que a pH no ácido, se asocia a carbonatos. El plomo es uno de los elementos menos móviles en el suelo (Kabata-Pendias y Pendias, 1992; Perrono, 1999; Lim *et al*, 2003).

Para el perfil 2, tanto la fracción intercambiable como la ligada a óxidos de Fe y Mn disminuye la concentración al incrementar la profundidad, en tanto que la fracción orgánica y sulfatos se

mantiene relativamente constantes a lo largo del perfil. La fracción residual incrementa con la profundidad.

En el perfil 5 el mayor porcentaje de Pb intercambiable (20%) se encuentra en el horizonte Bt, siendo menor en el horizonte Ap (5%); sin embargo, la concentración se mantiene constante ($4 \mu\text{g g}^{-1}$). Ligado a óxidos de Fe y Mn solo se detectó en los horizontes Ap y Bt con una concentración de $6.2 \mu\text{g g}^{-1}$. La mayor parte del Pb unido a la materia orgánica y sulfuros está en el horizonte Bt, lo cual podría indicar migración dentro del perfil de suelo. La mayor parte el Pb se une a la fracción residual.

Con respecto al perfil 6, la mayor concentración de Pb en la fase intercambiable se encuentra en el horizonte B1, lo cual puede influir en la migración de este elemento hacia el manto freático. La fracción ligada a carbonatos solo fue determinada en los horizontes Ap y Bt por lo que podría moverse y ser fácilmente disponible al disminuir el pH (Zemberyová *et al*, 1998); en el caso de los óxidos de Fe y Mn, la mayor concentración se halló en el horizonte Ap. En el caso del Pb ligado a la materia orgánica y sulfuros, la mayor concentración se ubicó en el horizonte Bt.

Es necesario remarcar que el Pb es el elemento potencialmente más tóxico de los reportados en este trabajo, debido a que no se trata de un micronutriente, y al encontrarlo en la fracción intercambiable de todas las muestras, también puede ser considerado un elemento móvil dentro del suelo. Por lo tanto, es importante tener en cuenta su monitoreo continuo para evitar el incremento del impacto contaminante de este elemento sobre el suelo.

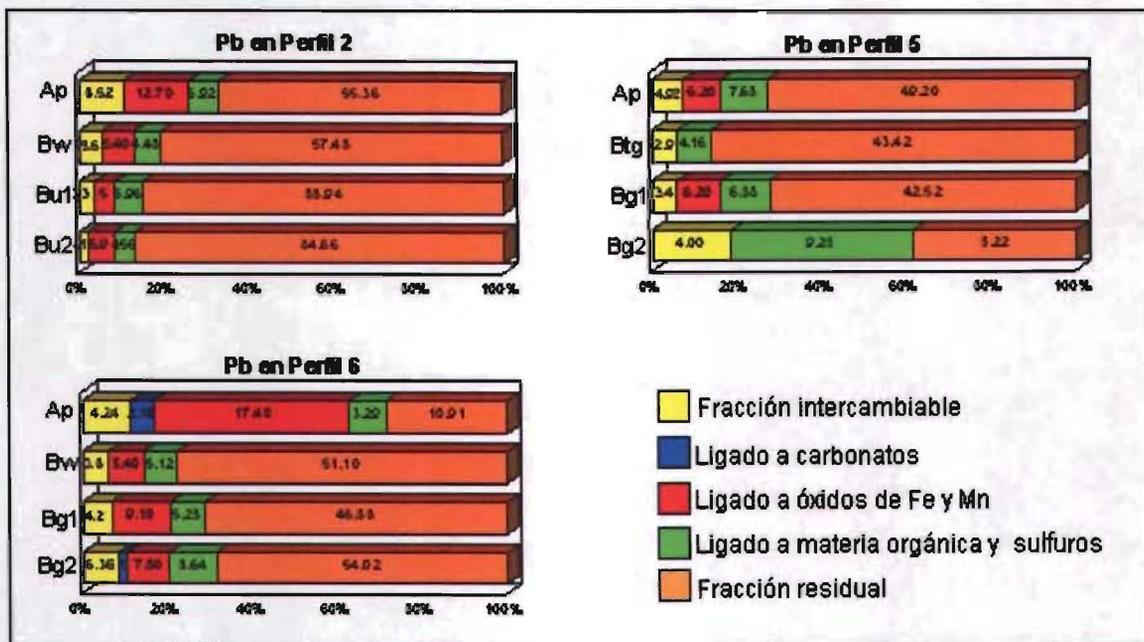


Figura 41. Porcentaje de las fracciones de plomo en los distintos horizontes de los perfiles "El aguaje", "Manto del Río" y El Cerrillo "Piedras Blancas".

Zinc

El zinc es un micronutriente necesario para la síntesis del ácido indolacético, por lo que su deficiencia puede causar cambios en la forma y hábito de crecimiento de las plantas; además, es activador de enzimas como las deshidrogenasas del ácido láctico, ácido glutámico, alcohol y pirimidín nucleótido. También está implicado en la síntesis de proteínas. La deficiencia de Zn en el maíz puede

conducir a una reducción de la floración y fructificación, así como acaparamiento y crecimiento radical pobremente diferenciado (Bidwell, 1990).

La forma más común y más móvil del Zn en el suelo es como Zn^{+2} , que es fácilmente adsorbido por los componentes minerales (arcillas, hidróxidos de Fe y Al) y orgánicos, lo que lleva a una acumulación en el horizonte superficial. El Zn es considerado como fácilmente soluble, móvil y disponible en suelos ligeros y ácidos (Perrono, 1999; Pueyo *et al.*, 2003). La adición de materia orgánica puede incrementar la movilidad potencial del Zn al impedir su transferencia a fracciones donde quede irreversiblemente sorbido (Almas *et al.*, 2000).

La mayor parte del zinc se une a la fracción residual (Fig. 43), por lo que se encuentra inmóvil dentro de estos suelos, si bien podría tratarse de una retención dependiente del pH en la que al acidificar el suelo, pudiese quedar móvil (Kabata-Pendias y Pendias, 1992; Zhou *et al.*, 2002). Con respecto al Zn intercambiable solo se determinó una concentración considerable ($36.24 \mu\text{g g}^{-1}$) el horizonte Ap del perfil 2 y media en el horizonte Ap del perfil 6 ($5.2 \mu\text{g g}^{-1}$), mientras que en el resto de las muestras fue inferior a $1 \mu\text{g g}^{-1}$, por lo que podrían existir deficiencias de este elemento en los suelos de Manto del Río y del Cerrillo Piedras Blancas.

En la fracción ligada a carbonatos se determinaron concentraciones menores a $1 \mu\text{g g}^{-1}$, excepto en los horizontes Ap y A1 del perfil en donde se obtuvieron 4.2 y $1.2 \mu\text{g g}^{-1}$, respectivamente. Con respecto al Zn ligado a óxidos de Fe y Mn, las mayores concentraciones se registraron en los horizontes Ap, siendo $8.0 \mu\text{g g}^{-1}$ para el perfil 2, $2.1 \mu\text{g g}^{-1}$ para el perfil 5 y $14.8 \mu\text{g g}^{-1}$ para el perfil 6, disminuyendo al incrementar la profundidad de cada perfil; dicha fracción es considerada disponible para las plantas (Kabata-Pendias y Pendias, 1992; Obrador *et al.* 2003).

Considerando que el Zn se incrementa en la fracción residual al disminuir en la fracción orgánica (Lena y Gade, 1997; Jackson *et al.* 2003) no es de extrañar que ésta última sea muy baja, a excepción del horizonte Ap del perfil 6, donde se registraron $5 \mu\text{g/g}$. Este comportamiento también disminuye su disponibilidad en los suelos.

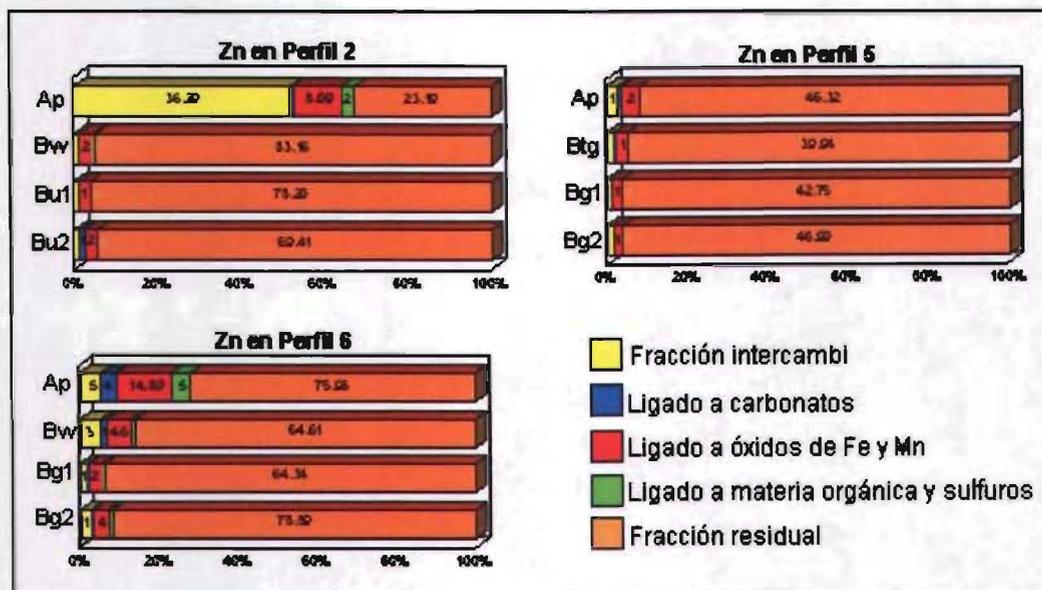


Figura 42. Porcentaje de las fracciones de zinc en los distintos horizontes de los perfiles "El aguaje", "Manto del Río" y El Cerrillo "Piedras Blancas".

Análisis estadístico de los resultados

Es importante mencionar que en el análisis estadístico de los resultados se incluyeron los valores de todos los horizontes de los seis perfiles, aun cuando en la parte anterior fueron descritos por separado, esto con el fin de generalizar los resultados obtenidos.

Al examinar los diagramas de cajas y bigotes obtenidos para los diferentes parámetros del suelo (Fig.44) se encontraron valores extremos para pH, CE, materia orgánica, densidad aparente, porcentaje de porosidad, Na, K, Ca, Mg, limo, Cr, Cu, Ni y Pb. Con el fin de efectuar los análisis posteriores estos fueron eliminados, disminuyendo así, las desviaciones estándar para cada uno de ellos,

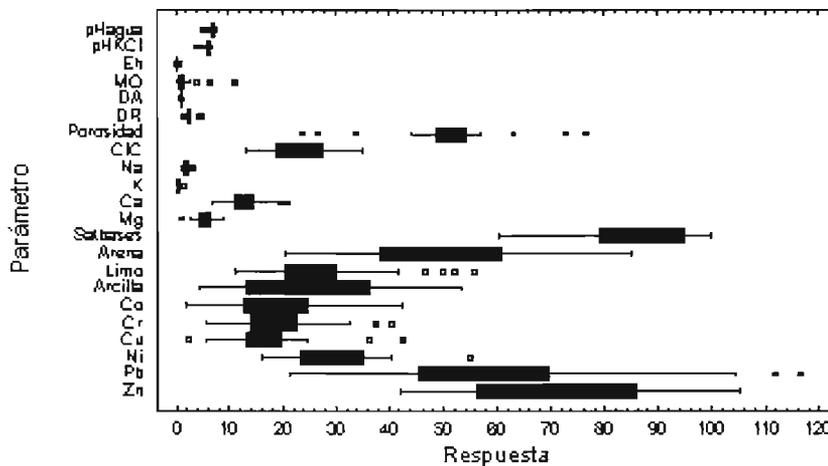


Figura 43. Diagramas de cajas y bigotes para los parámetros determinados, en el que se muestran puntos extremos.

Las reacciones y el transporte de los metales en el suelo están determinados por algunas características de este último, como son: pH, CE, porcentaje de materia orgánica, densidad aparente, cantidad de arcillas, capacidad de intercambio iónico, entre otros (Amacher *et al.*, 1986; Evans, 1989; Kabata-Pendias, 1995). Por ello se realizó un análisis de correlación múltiple entre los parámetros determinados en el suelo y los metales pesados totales, considerando solamente las correlaciones con una probabilidad menor a 0.05 (Tabla 10).

Entre las correlaciones positivas se tienen la arcilla y porcentaje de porosidad, materia orgánica y porcentaje de porosidad, limo y ambos pHs, arcilla y sodio, pH agua y pH KCl, pHs y Na, pHs y porcentaje de saturación de bases, CE y C.I.C., CE y Na, materia orgánica y Cu, materia orgánica y Zn, C.I.C. y Na, C.I.C. y Cr, K y Co, K y Ni, Ca y Mg, Mg y porcentaje de saturación de bases, Mg y Co, Co y Cr, Co y Ni, Co y Zn, Ni y Pb, Ni y Zn. Mientras que las correlaciones negativas se encontraron entre densidad aparente y CE, densidad aparente y materia orgánica, porcentaje de porosidad y C.I.C., arena con arcilla, Na, Ca, Co, Cr y Cu, pHs y materia orgánica, C.I.C. y materia orgánica, porcentaje de saturación de bases y Cr.

La mayoría de las correlaciones encontradas han sido reportadas por otros autores, siendo consideradas relaciones entre parámetros del suelo muy conocidas; por ejemplo, la correlación negativa entre densidad aparente y materia orgánica, en la que la materia orgánica tiene una densidad aparente muy baja, por lo que al incrementar su volumen disminuye la densidad (Aguilera y Martínez, 1986). Por tanto, resulta importante analizar las correlaciones entre las características del suelo y los metales pesados totales; mas que las correlaciones entre características.

Así, las correlaciones negativas entre arena y Co ($r=-0.35$, $p<0.05$), arena y Cr ($r=-0.54$, $p<0.05$), arena y Cu ($r=-0.40$, $p<0.05$), indican que, al incrementar el porcentaje de arena en el suelo, se disminuye la concentración de estos tres metales, lo cual puede ser debido a la baja superficie específica de la arena y la disminución de cargas eléctricas que pueden presentar (Porta, 1999), por lo que disminuyen los sitios de retención para los metales en esta fracción granulométrica.

Por otro lado, existe una correlación positiva de la materia orgánica con el Cu ($r=0.46$, $p<0.05$) y el Zn ($r=0.49$, $p<0.05$); es decir, que, tanto el Cu como el Zn están ligados a la materia orgánica (Miller y McFee, 1983; Bourg, 1995, Kabata-Pendias, 1995), particularmente el primero, debido a que está involucrado en reacciones de quelación a la materia orgánica con altas constantes de estabilidad, particularmente a un pH cercano a la neutralidad, ligándolo en forma no lixiviable (Petruzzelli *et al.*, 1978; Elliott *et al.*, 1986).

La capacidad de intercambio catiónico se relaciona con el Cr positivamente ($r=0.47$, $p<0.05$), considerando que el Cr es un catión divalente, la superficie de adsorción es un importante mecanismo para la retención de este elemento (Korte *et al.*, 1976), por lo que al existir un alto porcentaje de saturación de bases disminuye su retención, lo cual queda de manifiesto en la correlación negativa entre porcentaje de saturación de bases y Cr ($r= -0.40$, $p<0.05$).

	Arcilla	pH _{agua}	pH _{KCl}	CE	M.O.	CIC	Na	Ca	Mg	%Sat bases	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
D.A.				-0.67 0.003	-0.45 0.0037											
%Poros	0.33 0.0496				0.49 0.0021	-0.35 0.0380										
Arena	-0.71 0.0000						-0.33 0.0479	-0.43 0.0096			-0.35 0.0342	-0.54 0.0306	-0.40 0.0155			
Limo		0.36 0.0301	0.36 0.0321													
Arcilla	♦						0.42 0.0102									
pH _{agua}		♦	0.99 0.0000		-0.63 0.0000		0.41 0.0137			0.37 0.0282						
pH _{KCl}			♦		-0.65 0.0000		0.407 0.0153			0.38 0.0210						
CE				♦		0.54 0.0007	0.35 0.0356									
M.O.					♦	-0.46 0.0048							0.46 0.0048			0.49 0.0023
CIC						♦	0.40 0.0150					0.47 0.0039				
K											0.52 0.0012			0.52 0.0012		
Ca								♦	0.38 0.0203							
Mg									♦	0.46 0.0048	0.40 0.0148					
% Sat bases										♦		-0.40 0.0157				
Co											♦	0.41 0.0131		0.44 0.0064		0.40 0.0155
Ni														♦	0.34 0.0456	0.39 0.0203

Tabla 10. Análisis de correlación múltiple entre los parámetros del suelo y los metales pesados totales.

Hasta ahora sólo se ha mencionado el análisis de los metales pesados totales; sin embargo, hay que recordar que la accesibilidad de un elemento para las plantas y su movilidad está determinada por su origen, así como por la cantidad adsorbida por las partículas reactivas del suelo, como son humus, óxidos de hierro, manganeso y aluminio, y las arcillas aluminosilicatadas (Wild, 1993; Kabata-Pendias, 1995). Por tanto, se realizó el análisis de correlación múltiple entre las características físicas y químicas del suelo y las fracciones de metales pesados, considerando solamente aquellas correlaciones con probabilidad menor a 0.05 (Tabla 11).

	pH _{agu}	pH _{KCl}	CE	M.O.	C.I.C	Ca	Aren	Arcill	Co1	Co2	Co3	Co4	Co5	Cr3	Cr4	Cr5	Cu1	Cu3	Cu4	Ni1	Ni3	Ni4	Ni5	Pb1	Pb2	Pb3	Zn2	
pH _{agu}	◆ 0.96 0.0000	◆																										
pH _{KCl}		◆																										
M.O.			0.94 0.0000	◆																								
C.I.C		0.70 0.0108		0.63 0.0278	◆																							
Ca	0.78 0.0026	0.84 0.0007			0.75 0.0051	◆																						
Aren			0.76 0.0043	0.72 0.0088			◆																					
Co 1	-0.91 0.0000	-0.86 0.0003				-0.65 0.0208			◆																			
Co 2	-0.59 0.0420		0.80 0.0016	0.78 0.0030			0.90 0.0001			◆																		
Co 4											0.62 0.0313	◆																
Cr 3														-0.70 0.0105	◆													
Cr 4			0.60 0.0404	0.68 0.0146				-0.79 0.0023		0.64 0.0249					0.68 0.0158	◆												
Cr 5	0.62 0.0299								-0.67 0.0159							◆												
Cu 1													0.58 0.0486				◆											
Cu 3																		◆										
Cu 4																			◆									
Cu 5						0.59 0.0432							0.60 0.0408									0.59 0.0443						
Ni 1			0.66 0.0232	0.65 0.0201			0.65 0.0261				0.65 0.0215											◆						
Ni 2												-0.58 0.0471		0.77 0.0036					0.66 0.0205									
Ni 3											0.76 0.0039	0.61 0.0331									0.67 0.0179	◆						
Ni 4			0.62 0.0311	0.72 0.0079			0.61 0.0352					0.61 0.0343					0.59 0.0434				0.87 0.0002	0.64 0.0261	◆					
Ni 5										0.71 0.0091	0.71 0.0091				-0.68 0.0152	0.69 0.0127							◆					
Pb 1			0.81 0.0015	0.73 0.0069			0.62 0.0316				0.59 0.0452										0.69 0.0128		0.69 0.0122	◆				
Pb 2														0.67 0.0163											◆			
Pb 3				0.70 0.0117			0.60 0.0403				0.63 0.0296														0.62 0.0316	◆		
Pb 5								0.70 0.0110				0.63 0.0278		-0.77 0.0032	-0.73 0.0018													
Zn 1			0.95 0.0000	0.91 0.0000	0.68 0.0159		0.63 0.0291				0.60 0.0381										0.72 0.0083	0.60 0.0395	0.69 0.0124		0.80 0.0019			
Zn 2														0.61 0.0359											0.76 0.0038	0.73 0.0065	◆	
Zn 3				0.75 0.0053							0.62 0.0307														0.71 0.0101	0.87 0.0003	0.89 0.0001	
Zn 4				0.74 0.0065							0.59 0.0416				0.60 0.0405										0.67 0.0179	0.74 0.0063	0.85 0.0004	0.88 0.0001
Zn 5			-0.58 0.0452					0.58 0.0492						0.66 0.0193	-0.61 0.0333													

Tabla 11. Análisis de correlación múltiple entre los parámetros del suelo y las fracciones de metales pesados, donde M1= intercambiable, M2= ligado a carbonatos, M3= ligado a óxidos de Fe y Mn, M4=orgánico y sulfuros, M5=residual

Los componentes sólidos del suelo tienen la capacidad de absorber iones, pero esto difiere entre materiales, ya que están fuertemente influenciados por las condiciones prevalecientes de pH y redox, así como por las concentraciones relativas de los iones presentes en la solución del suelo. El pH del suelo es el principal factor que controla el comportamiento químico de los metales en el suelo (Alloway, 1990; Salomons, 1995). En general, a pH ácido existe una mayor movilidad de metales pesados, a excepción del Cr (Lake *et al.*, 1984; Loué, 1985; Boekhold y VanderZee, 1992; Ma y Lindsay, 1995; Bourg, 1995; Sukreeyapongse *et al.*, 2002). En este trabajo se observa que el Co intercambiable presenta una correlación negativa con el pH ($r=0.91$, $p<0.05$), lo cual indica que, al disminuir los valores de pH se incrementa la concentración de Co intercambiable; además, existe una correlación positiva con el Cr residual ($r=0.62$, $p<0.05$) que indica que al aumentar los valores de Cr estos permanecen ligados a la fracción residual.

Otra de las variables que determina la movilidad de los metales pesados, es la disponibilidad de oxígeno (redox), el cual puede cambiar la valencia de algunos metales, que al ser reducidos incrementan su solubilidad (Salomons, 1995). Así, el CE está directamente relacionado con la fracción intercambiable de Ni ($r=0.66$, $p<0.05$), Pb ($r=0.81$, $p<0.05$) y Zn ($r=0.95$, $p<0.05$). Además, el CE se correlaciona negativamente con el Zn residual ($r=-0.58$, $p<0.05$), lo cual implica que, al disminuir el CE, parte del Zn podría movilizarse; por tanto, sería importante conocer y evitar las condiciones reductoras dentro del manejo del suelo.

Debido a que la correlación entre CE y materia orgánica es muy alta ($r=0.94$, $p<0.05$) y, dado que la materia orgánica posee una menor densidad aparente, habrá por lo tanto, una mayor aireación y permeabilidad (Baver *et al.*, 1991; Alloway, 1990); la fracción ligada a materia orgánica y sulfuros de Cr ($r=0.60$, $p<0.05$) y Ni ($r=0.62$, $p<0.05$) se relaciona positivamente con el CE.

Por otra parte, la materia orgánica es uno de los factores más importantes involucrados en la solubilización y subsecuente migración de los metales a través del suelo. La regulación del comportamiento de los metales en el suelo se debe a que experimentan una complejación con ligandos, formando complejos químicos de alta energía (Mc Laren *et al.*, 1986; Bourg, 1995; Novotny, 1995; Salomons, 1995), por lo que la materia orgánica adsorbe cantidades considerables de cationes inorgánicos (Boekhold y VanderZee, 1992; Novotny, 1995), aunque su efectividad para adsorber metales pesados depende de sus propiedades de quelación (Petruzzelli *et al.*, 1978).

La materia orgánica se correlaciona positivamente con la fracción intercambiable de Ni ($r=0.65$, $p<0.05$), Pb ($r=0.81$, $p<0.05$) y Zn ($r=0.91$, $p<0.05$), considerando que los metales pesados fácilmente móviles, como el Zn, generalmente están unidos a compuestos orgánicos (Kabata-Pendias, 1995); estas uniones son importantes en la transferencia de estos elementos a los sistemas biológicos, ya que podrían constituir los principales acarreadores para que los metales sean transferidos dentro de la cadena trófica (Förstner, 1995).

El Cr ($r=0.68$, $p<0.05$), el Ni ($r=0.72$, $p<0.05$) y el Zn ($r=0.74$, $p<0.05$) unidos a la materia orgánica y sulfuros también se relacionan positivamente con la materia orgánica, por lo que su solubilidad está fuertemente relacionada con el desarrollo de ésta (Miller y McFee, 1983; Bourg, 1995).

También se obtuvieron correlaciones positivas entre la materia orgánica y el Pb ($r=0.70$, $p<0.05$) y el Zn ($r=0.75$, $p<0.05$) ligados a óxidos de Fe y Mn, lo cual puede deberse a que, cuando la materia orgánica se liga los metales pesados en forma no lixiviable y con un pH cercano a la neutralidad, existe precipitación de óxidos e hidróxidos metálicos (Elliott *et al.*, 1986).

La mayoría de los metales pesados existen principalmente en la solución del suelo como cationes y su adsorción depende de la densidad de cargas negativas en la superficie de los coloides

del suelo (Alloway, 1990). En este caso, solamente el Zn intercambiable se relaciona con la capacidad de intercambio catiónico ($r=0.68$, $p<0.05$), por lo que la adsorción selectiva lo estaría favoreciendo por tener un radio de hidratación relativamente alto (0.074 nm) y un valor pK de 9 (Elliot *et al.*, 1986).

La fracción granulométrica menos reactiva del suelo es la arena, la cual procede de minerales más resistentes y es pobre en microelementos (Loué, 1988). Existe un incremento general en la concentración de metales pesados de las fracciones gruesas a las finas, con una concentración aproximadamente 50% más alta en las arcillas que en las fracciones de sedimentos gruesos y arena (Saeki *et al.*, 1993). Se encontraron correlaciones positivas entre la arena y la fracción intercambiable de Ni ($r=0.65$, $p<0.05$), Pb ($r=0.62$, $p<0.05$) y Zn ($r=0.63$, $p<0.05$), lo cual podría deberse a que al existir pocos sitios de adsorción sobre la arena, los metales son fáciles de liberar a la solución del suelo. Además, se encontraron correlaciones positivas entre la arena y el Co unido a carbonatos ($r=0.90$, $p<0.05$), Ni ligado a materia orgánica ($r=0.61$, $p<0.05$) y Pb unido a óxidos de Fe y Mn ($r=0.60$, $p<0.05$), las cuales podrían deberse a que al existir mayor porcentaje de arena se incrementa la concentración de metales que se puede unir potencialmente a otra fracción, lo cual dependerá de la afinidad del metal (Elliott *et al.*, 1986; Alloway, 1990).

Asimismo, la arcilla se relaciona positivamente con el Pb residual ($r=0.70$, $p<0.05$) y con el Zn residual ($r=0.58$, $p<0.05$), lo cual coincide con el Fe, Mn, Pb, Cu, Zn, Ni, Cr, Co y As que se presentan principalmente en partículas menores a 20 μm (Saeki *et al.*, 1993). Por otro lado, se relaciona negativamente con el Cr ligado a óxidos de Fe y Mn ($r=-0.67$, $p<0.05$) por lo que el Cr debe ser adsorbido preferentemente por los óxidos (Rendell y Batley, 1980; Ross, 1994).

Considerando que el efecto de los metales depende en gran medida de las relaciones complejas entre los cationes (Kabata-Pendias, 1995) es importante resaltar algunas de dichas relaciones. Así tenemos una correlación negativa entre Ca y Co intercambiable ($r=-0.65$, $p<0.05$), que indica la disminución de la sorción de Co cuando hay una alta concentración de Ca, debida a la competencia entre estos, o más probablemente a una reducción en la actividad del Co por un incremento en la fuerza iónica de la solución (McLaren *et al.*, 1986).

Existen relaciones antagónicas entre diferentes fracciones de distintos metales, las cuales pueden deberse a la competencia entre iones por los sitios de sorción (Elliott *et al.*, 1986). Las correlaciones antagónicas encontradas son Cr unido a materia orgánica y sulfuros con Ni residual ($r=-0.68$, $p<0.05$) y con Pb residual ($r=-0.73$, $p<0.05$); Cr ligado a óxidos de Fe y Mn con Pb residual ($r=-0.77$, $p<0.05$); Co intercambiable con Cr residual ($r=-0.67$, $p<0.05$); Co unido a materia orgánica y sulfuros con Cr ligado a óxidos de Fe y Mn ($r=-0.70$, $p<0.05$); Ni unido a carbonatos con Co ligado a materia orgánica y sulfuros.

CONCLUSIONES

Los perfiles de suelo caracterizados en este trabajo fueron descritos de acuerdo a la FAO-Unesco (1998) como Phaeozem lúvico y Cambisol eútrico en diferentes estados de desarrollo, formados a partir de depósitos aluviales de mineralogía variable.

Las propiedades físicas y químicas de los perfiles fueron: textura franca, pH neutro a básico, baja conductividad eléctrica, porcentaje medio de materia orgánica que disminuye al incrementar la profundidad, porcentaje de saturación de bases mayor del 50% y Ca^+ como catión dominante; se consideran suelos con fertilidad alta, pero con manto freático como factor limitante, debido a que se encuentra a menos de 2 m de profundidad.

De los metales pesados totales, el Cd no fue detectado y el orden decreciente de concentración fue el siguiente: $\text{Cr} < \text{Cu} < \text{Co} < \text{Zn} < \text{Ni} < \text{Pb}$. En donde Cr se incrementa en horizontes B; Co en Ap; la concentración de Cu, que rebasa los límites consultados, es mayor en horizontes ricos en materia orgánica; el níquel se incrementa en los horizontes B; el Zn se encuentra en concentraciones más altas en horizontes ricos en materia orgánica; y, el Pb se encuentra por encima del valor promedio para rocas ígneas por lo que su principal origen sería antropogénico.

Con respecto a la distribución de los metales en las distintas fracciones del suelo, Co, Cr y Zn se encontraron principalmente en la fase residual, con pequeños porcentajes ligados a óxidos de Fe y Mn, menor concentración unida a materia orgánica y sulfuros; el Zn también se encuentra en la fracción intercambiable, pero en concentraciones menores a $1\mu\text{gg}^{-1}$, por lo que estos elementos se consideran inmóviles y heredados litológicamente; además, el Zn y Co al ser micronutrientes podrían ser deficientes en estos suelos.

El Cu se considera relativamente móvil, debido a que en todos los casos se encontró en la fracción intercambiable en un porcentaje cercano al 30% pero, debido a su actividad como micronutriente este aspecto se considera positivo; y el resto se encuentra inmóvil, principalmente en la fracción residual.

Por otra parte, 50% o más de Ni se encuentra en la fracción residual, 20% unido a materia orgánica y sulfuros, aproximadamente 5% como níquel intercambiable, por lo que se considera móvil dentro del perfil a través de la solución del suelo y de la materia orgánica; siendo considerado potencialmente peligroso.

El metal considerado más peligroso en la zona de estudio es el Pb, debido a que no es un nutriente y se encontró en forma intercambiable en todas las muestras, siendo mayor en las muestras superficiales de Ixtlahuaca, por lo que puede migrar a los cultivos, y en las profundas del Cerrillo "Piedras Blancas", poniendo en peligro al manto freático; aunque el mayor porcentaje se encuentra en la fracción residual, seguida por los óxidos de Fe y Mn, la materia orgánica, sulfuros y los carbonatos.

RECOMENDACIONES

El elemento que presenta mayor riesgo ambiental es el Pb, puesto que representa un riesgo para la salud además que no es considerado un nutrimento y las concentraciones determinadas son considerables con un valor mínimo de $21.5 \mu\text{g g}^{-1}$; así mismo, de que en todas las muestras en las que se realizó el fraccionamiento de Pb se obtuvo en la fracción intercambiable. Por ello, se recomienda realizar monitoreos continuos para determinar si existe un incremento en la concentración de este metal. También sería importante realizar estudios sobre su concentración en los cultivos del área, particularmente en Ixtlahuaca y, en el agua subterránea, del Cerrillo Piedras Blancas, como una forma de conocer el riesgo potencial sobre la salud.

Además, se recomienda determinar Co y Zn en los cultivos para saber si realmente existe deficiencia y en caso de ser así se podrían adicionar estos elementos como micronutrientes para lograr mejores rendimientos agrícolas.

Finalmente, es importante mantener el pH en el rango de neutro a ligeramente básico, así como las condiciones oxidantes y una cubierta de materia orgánica constante para evitar la migración de los metales.

REFERENCIAS

- Aguilera, H.N. y Martínez. R.E. (1989). Relaciones agua-suelo-planta-atmósfera. Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio de Irrigación. UACH. Chapingo. México. 321 p.
- Alloway, B.J. (1990) *Soil processes and the behaviour of metals*. Heavy metals in soils. Blachie Academic. England. p: 11-37.
- Almas, A.R., Salbu, B. and Singh, B.R. 2000. *Changes in partitioning of cadmium-109 and zinc-65 in soils affected by organic matter addition and temperature*. Soil Sci. Am. J. 64: 1951-1958
- Alva, A.K., Huand, B. and Paramasivam, S. 2000. *Soil pH affects copper fractionation and phytotoxicity*. Soil. Sci. Soc. of Am. 64:955-962.
- Al-Wabel, M.A., Heil, D.M., Westfall, D.G. and Barbarick, K.A. (2001). *Solution chemistry influence on metal mobility in biosolids-amended soils*. J. Environ. Qual. 31:1157-1165
- Amacher, C.M., Kotuby-Amacher, J., Selim, H.M. and Iskandar, I.K. (1986). *Retention and release of metals by soils evaluation of several models*. Geoderma. 38:131-154.
- Appel, C. and Ma, L. (2002) *Concentration, pH and surface charge effects on cadmium and lead sorption in three tropical soils*. J. Environ. Qual. 31:581-589.
- Avila-Pérez, P. (1995) *Bioacumulación de Cd, Cr, Ni, Pb y Hg en agua, sedimento y lirio acuático (Echhornia crassipes) de la presa José Antonio Alzate, Estado de México*. Tesis de Maestría. U.A.E.Méx.
- Badawy, S.H., Helal, M.I.D., Chaudri, A.M., Lawlor, K. and McGrath, S.P. (2002) *Soil solid-phase controls lead activity in soil solution*. J. Environ. Qual. 31:162-167.
- Balderas-P, M.A. (1998). *Caracterización de metales pesados en suelos irrigados en la cuenca alta del río Lerma*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. U.A.E.Méx. 53p.
- Basta, N. T., Pantone, D. J. and Tabatabai, M. A. (1993). *Path analysis of heavy metal adsorption by soil*. Agron. J. 85: 1025-1057.
- Baver, L.D., W.H. Gardner y W.R. Gardner (1991), Física de suelos. Noriega-Uteha. México.
- Bidwell, R.G.S. (1990) *Fisiología vegetal*. AGT editor. México. p 274-292.
- Birkeland, P.W. (1999). Soils and geomorphology. Oxford University Press. 3rd edition. U.S.A. 430 p.
- Boekhold, A.E. and VanderZee, S.E.A.T.M. (1992) *Significance of soil chemical heterogeneity for spatial behavior of cadmium in field soil*. Soil. Sci. Soc. Am. J. 56 : 747-754.
- Bourg, A. C. M. (1995). *Speciation of heavy metals in soils and groundwater and implications for their natural and provoked mobility*. in: Salomons, W., Förstner, U. and Mader P. Heavy Metals. Problems and solutions. Springer. Germany. p. 19-31.
- Bourg, A.C.M. and Loch J.P.G. (1995) *Mobilization of heavy metals as affected by pH and redox conditions*. In: Salomons, W. and Stigliani, W.M. Biogeodynamics of pollutants in soil and sediments. Springer. Berlin. p: 87-101.
- Bohn, L. H., McNeal, L.B. y O'Connor, A. J. (1993). Química del suelo. Limusa. México.
- Boul, S.W., Hole, F.D. y McCracken, R.J. (1988). Génesis y Clasificación de Suelos. Trillas. México. 417p.
- Bouyoucos, G.V. (1963). *Directions of making mechanical analysis of soil by hydrometer method*. Soil Science. 42:23-30.
- Breemen, N and Buurman, P. (1998), Soil Formation. Kluwer Academic Publishers. Netherlands. 377p.
- Breummer, G. H., Gorth, J. and Hermes, U. (1986). *Heavy metal species mobility in soils*. Pflanzenernaerh Bodenkd. 149:382-398.
- Brus, D.J. and Jansen, M.J.W. (2004) *Uncertainty and sensitivity analysis of spatial predictions of heavy metals in wheat*. J. Environ. Qual. 33:882-890.
- Cala-Rivero, V., Rodríguez-Sanchidrián, J. y Guerra-Delgado, A. (1985). *Contaminación por metales pesados en suelos de la vega de Aranjuez. (I) Pb, Cd, Cu, Zn, Ni y Cr*. Anal. Edaf. Agrobiol. 1595-1608.
- Calmano, W., Ahlf, W. and Förstner, U. (1996). *Sediment Quality Assessment: Chemical and Biological Approaches*. in: Calmano, W. and Förstner, U. Sediments and Toxic Substances. Environmental effects and ecotoxicity. Springer. Germany. p. 1-12.
- Chen, W., Tan, S.K. and Tay, J.H. (1996). *Distribution, fractional composition and release of sediment-bound heavy metals in tropical reservoirs*. Wat. Air and Soil Pollut. 92:273-287.
- Comisión Nacional del Agua. (1991). Síntesis fisiográfica de la Cuenca del Río Lerma, Estado de México. Gerencia del Estado de México. Subgerencia de Administración del Agua.
- Cruz-Guzmán, M., Celis, R., Hermosín, M.C. Leone, P., Negre, M. And Cornejo, J. (2003) *Sorption-desorption of lead (II) and mercury (III) by model associations of soil colloids*. Soil Sci. Soc. Am. J. 67:1378-1387.
- Donrronsoro, C., Martín, F., Ortiz, I., García, I. Simón, M., Fernández, E., Aguilar, J. y Fernández, J. (2002) *Migration of trace elements from pyrite tailings in carbonate soils*. J. Environ. Qual. 31: 829-835
- Duchaufour, P. (1977) Atlas ecológico de los suelos del mundo. Toray-Masson, S.A. España. 178 p.
- Duchaufour, P. (1978) Manual de Edafología. Toray-Masson, S.A. España. 476 p.
- Elliott, H.A., Liberati, M.R. and Huang, C.P. (1986). *Competitive adsorption of heavy metals by soils*. J. Environ. Qual. 15(3):214-219.
- Evans, L.J. (1989). *Chemistry of metal retention by soils*. Environ. Sci. Technol. 23(9):1046-1056.
- FAO-Unesco. (1991). Mapa Mundial de Suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Italia.
- FitzPatrick, E. A. (1984). Suelos. Su formación, clasificación y distribución. CECSA. México.

- Flores L, J.S. and Nívar, J. (2002) *An assessment of stream water quality of the Rio San Juan, Nuevo Leon, Mexico*. *J. Environ. Qual.* 31:1256-1265.
- Ford, I.N. (1984) *Dinámica mineral del suelo. Algunos puntos de referencia para su estudio*. U.A.Ch. 577p.
- Förstner, U. (1995). *Contaminated aquatic sediments and waste sites: geochemical engineering solutions*. in: Salomons, W., Förstner U. and Mader P. *Heavy Metals. Problems and solutions*. Springer. Germany.
- García, E. (1988) *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Offset Larios. México.
- Gaucher, G. (1971) *El Suelo y sus características Agronómicas*. Omega. España.
- Gobierno del Estado de México. (1993). *Atlas Ecológico de la Cuenca Hidrográfica del Río Lerma* (Tomo I). Cartografía y anexos de documentos básicos.
- González-Castorena, M.G. (1985) *Determinación del nivel óptimo de cobre en suelos de la Escuela de Agricultura de la UAEM para el cultivo de jitomate*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. UAEMéx.
- Hair, J.F., Anderson, R.E., Tatham, R.L. y Black, W.C. (2000). *Análisis multivariante*. 5ª. ed. Prentice Hall. España. 799 p.
- Hansen, A. M., León-Zavala, A. y Bravo-Inclán, L. (1995). *Fuentes de contaminantes y enriquecimiento de metales en sedimentos de la cuenca Lerma-Chapala*. *Ingeniería Hidráulica en México*. 10 (3): 55-69.
- Hanz-Sámano, G.L. y Leyva-Morales, M.E. (1995) *Determinación de Pb en agua, suelo y pasto en áreas de pastoreo del Valle de Lerma, Estado de México*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. UAEMéx. 57 pp.
- He, Z.L., Zhang, M.K., Calvert, D.V., Stoffella, P.J., Yang, X.E. and Yu, S. (2004) *Transport of heavy metals in surface runoff from vegetable and citrus fields*. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1662-1669.
- Hickey, G.M. and Kittrick, A.J. (1984). *Chemical partitioning of cadmium, copper, nickel and zinc in soils and sediments containing high levels of heavy metals*. *J. Environ. Qual.* 13 (3):372-377.
- Hillel, D. (1982). *Introduction soil physics*. Academic Press. U.S.A. 384 p.
- Holmgren, G. G. S., Meyer, M. H., Chaney, R. L. and Daniel, R. B. (1993). *Cadmium, lead, zinc, copper and nickel in agricultural soils of United States of America*. *J. Environ. Qual.* 22: 335-348.
- Hughes, H.R. (1985) *Heavy metals and the environment: An introduction*. *Journal of the Royal Society of New Zealand*. 15(4):347-353.
- INFOPOS. (1997). *Manual internacional de fertilidad de suelos*. Potash & Phosphate Institute. U.S.A.
- INEGI (2004): <http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/edomex/rh.cfm> y http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/datosgeogra/basicos/hidrologia/rios/cuencas_hidrologicas.cfm?c=520
- Jackson, M.L. (1982). *Análisis químico de suelos*. Omega. España. 662p.
- Jackson, B.P., Bertsch, P.M., Cabrera, M.L., Camberato, J.J., Seaman, J.C. and Wood, C.W. (2003) *Trace element speciation in poultry litter*. *J. Environ. Qual.* 32:535-540.
- Lagerwerff, J.V. (1983) *Plomo, mercurio y cadmio como contaminantes ambientales*. in: Mortvedt, J.J., Giordano, P.M. y Lindsay, W.L. *Micronutrientes en Agricultura*. AGT Editor. México. p.579-612
- Lake, D. L., Kirk, P. W. W. and Lester, J. N. (1984). *Fractionation, characterization and speciation of heavy metals in sewage sludge and sludge amended soils. A review*. *J. Environ. Qual.* 13 (2): 175-183.
- Lee, M-K. and Saunders, J.A. (2002) *Effects of pH on metals precipitation and sorption*. *Vadose Zone Journal* 2: 177-185.
- Lena, Q.M. and Gade, N.R. (1997) *Chemical fraction of cadmium, copper nickel and zinc in contaminated soils*. *J. Environ. Qual.* 26:259-264.
- Lim, T.T., Tay, J.H. and The, C.I. (2003) *Contamination time effect on lead and cadmium fractionation in a tropical coastal clay*. *J. Environ. Qual.* 32:2054-2063
- Loué, L. (1988). *Los microelementos en la agricultura*. Mundi-Prensa. España.
- Lugo de la Fuente, J.A. (2001) *Dinámica de metales pesados en el sistema suelo-sedimento-fracción húmica y arcillosa en la cuenca alta y media del río Lerma*. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias. UNAM.
- Kabala, C. and Singh, B.R. (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. (1995). *Agricultural problems related to excessive trace metal contents of soils*. in: Salomons, W., Förstner U. and Mader P. *Heavy Metals. Problems and solutions*. Springer. Germany. pp. 3 –18.
- Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. (1992). *Trace elements in soils and plants*. U.S.A. CRC Press.
- Karathanasis, A.D. (1999) *Subsurface migration of copper and zinc mediated by soil colloids*. *Soil Science Society of America Journal* 63 : 830-838.
- Keller, A., Abbaspour, K.C. and Schulin, R. (2002). *Assessment of uncertainty and risk in modeling regional heavy-metal accumulation in agricultural soils*. *J. Environ. Qual.* 31:175-187.
- Keller, C. and Domergue, F-L. (1996) *Soluble and particulate transfers of Cu, Cd, Al, Fe and some major elements in gravitational waters of a Podzol*. *Geoderma* 71:263-274.
- Keller, C. and Védy, C. (1994). *Distribution of copper and cadmium fractions in two forest soils*. *J. Environ. Qual.* 23:987-999.
- Korte, N.E., Skopp, J., Fuller, W.H., Niebla, E.E. and Alesii, B.A. (1976) *Trace element movement in soils: influence of soil physical and chemical properties*. *Soil Science*. 122(6):350-359.
- Kubota, J y Allaway, W.H. (1983) *Distribución geográfica de los problemas de los elementos traza*. in: Mortvedt, J.J., Giordano, P.M. y Lindsay, W.L. *Micronutrientes en Agricultura*. AGT Editor. México. pp.579-612
- Ma, Q.Y. and Lindsay, W.L. (1995) *Estimation of Cd²⁺ and Ni²⁺ activities in soils by chelation*. *Geoderma*. 68:123-133.
- McCarthy, J.F. and Zachara J.M. (1989) *Subsurface transport of contaminants*. *Environ. Sci. Technol.*

23(5):496-502.

- McLaren, R.G., Lawson, D.W. and Swiff, R.S.** (1986). *Sorption and desorption of cobalt by soils and soil components*. *Journal of Soil Science*. 37:413-426.
- Miller, W. P. and McFee, W. W.** (1983) *Distribution of cadmium, zinc, copper and lead in soils of industrial northwestern Indiana*. *J. Environ. Qual.* 12(1): 29-33.
- Montgomery, D.C.** (1991) *Diseño y Análisis de Experimentos*. Iberoamericana. México. 589p.
- Mora-Herrera, S.I.** (1996) *Evaluación de algunos elementos potencialmente tóxicos (Cd, Cu, Ni y Zn) en suelos con alto contenido de materia orgánica (>20%) bajo cultivo en el curso alto de la cuenca alta del río Lerma, Estado de México*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. UAEMéx.
- Morquecho-Contreras, A.** (1997) *Distribución de metales pesados en el sistema sedimento-suelo de la presa "José Antonio Alzate", Estado de México*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. UAEMéx.
- Mortland, M. M.** (1975) *Interaction between clays and inorganic and organic pollutants*. *Proceedings of the International Clay Conference*. Applied Publishing Ltd. U.S.A. pp. 469-475.
- Murray, K.S., Rogers, D.T. and Kaufman, M.M.** 2004. *Heavy metals in a urban wasteshead in southeastern Michigan* *J. Environ Qual.* 33:163-172.
- Novotny, V.** (1995). *Diffuse sources of pollution by toxic metals and impact in receiving waters*. in: **Salomons, W., Förstner, U. and Mader, P.** *Heavy Metals. Problems and solutions*. Springer. Germany. pp. 33-51.
- Nowack, B., Obrecht, J.-M., Schlupe, M., Schulin, R., Hansmann, W. and Köppel, V.** (2001) *Elevated Lead and Zinc contents in remote alpine soil of the Swiss National Park*. *J. Environ. Qual.* 30:919-926.
- Obrador, A., Novillo, J. and Alvarez, M.** 2003. *Mobility and availability to plants of two zinc sources applied to a calcareous soil*. *Soil Sc. Am. J.* 67: 564-572.
- Pérez-Cid, B., Lavilla, I. and Bendicho, C.** (1996). *Analytical assessment of two sequential extraction schemes for metal partitioning in sewage sludges*. *Analyst.* 121: 1479-1484.
- Perrono, P.** (1999). *Les micropolluants métalliques des boues de stations dépuración urbaine et l'épandage agricole* *Mém. D.U.E.S.S., D.E.P., Univ. Picardie, Amiens.*
- Petruzzelli, G., Guidi, G. and Lumbrano, L.** (1978). *Organic matter as an influencing factor on copper and cadmium adsorption by soils*. *Water, Air and Soil Pollution*. 9: 263-269.
- Porta C., J., López-Acevedo R., M. y Roquero de L., C.** (1999). *Edafología, para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundi-Prensa. España.
- Predrag, P. and Petar, P.** (1994). *Alluvial aquifer contamination: exchangeable heavy metals and factors affecting their spacial distribution*. *Water, Air and Soil Pollut.* 74:155-167.
- PROY-NOM-005-ECOL.**(2000) <http://www.sne.gov.col> Consultado 15/VIII/2004
- Pueyo, M., Sastre, J., Henández, E, Vidal, M, López-Sánchez, J.F. and Rauret, G.** 2003. *Prediction of trace element mobility in contaminated soils by sequential extraction*. *J. Environ. Qual.* 32:2054-2066.
- Rankama, K. y Sahama, Th. G.** (1954). *Geoquímica*. Aguilar. España. 862 p.
- Rasmussen, P.E. and H.P. Collins.** (1991), *Long-term impacts of tillage, fertilizer, and crop residue on soil organic matter in temperate semiarid regions*. *Adv. In Agronomy.* 45: 93-134.
- Rendell, P.S. and Batley, G.E.** (1980). *Adsorption as a control of metal concentrations in sediment extracts*. *Environ. Sci. and Technol.* 14(3): 314-318.
- Richards, L.A.** (1990). *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*. 6ª. Ed., Departamento de Agricultura de Estados Unidos. Limusa. México.
- Ross, M.S.** (1994) *Toxic metal in soil-plant systems*. John Wiley and Sons. I-V. 243 pp.
- Saeki, K., Okasaki, M. and Kubota, M.** (1993) *Heavy metal in a semi-enclosed hypereutrophic system: Lake Teganuma, Japan*. *Water, Air and Soil Pollution.* 69:79-91.
- Salomons, W.** (1995) *Long-term strategies for handling contaminated sites and large scale areas*. in: Salomons, W. and Stigliani, W.M. *Biogeodynamics of pullants in soil and sediments*. Springer. Berlin. pp 1-30.
- Schalscha, E.B., Morales, M., Ahumada, I., Schirado, T. Y Pratt, P.F.** (1980). *Fractionation of Zn, Cu, Cr, and Ni in wastewaters, solids and soils*. *Agrochimia.* 24 (5-6): 361-368.
- Scheckel, K.G. and Sparks, D.L.** (2001) *Dissolution kinetics of nickel surface precipitates on clay mineral and oxide surfaces*. *Soil Sci. Am. J.* 65: 685-694.
- Schirado, T., Vergara, J., Schalscha, E.B. and Pratt, P.F.** (1986) *Evidence for movement of heavy metals in a soil irrigated with untreated wastewater*. *J. Environ. Qual.* 15 (1): 9-12.
- SEP.** (1991). *Suelos y fertilización*. Trillas. México.
- Sheppard, M.J. y Thibault, D.H.** (1992). *Desorption and extraction of selected heavy metals of soils*. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 56: 415-423.
- Shuman, L. M.** (1975). *The effect of soil properties on zinc adsorption by soils*. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39:454-458.
- Siebe, C., Jahn, R y Stahr, K.** (1996). *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. México. 57p.
- Simmons, I. G.** (1982). *Ecología de los Recursos Naturales*. Omega. España.
- Sobrinho, F.L.** (1994). *Desempeño industrial del Estado de México*. En: Blancarte, R. *Estado de México. Perspectivas para la década de los noventas*. Instituto Mexiquense de Cultura. pp: 329-363.
- Sowder, A.G., Bertsch, P.M. and Morris, P.J.** (2003) *Partioning and availability of uranium and nickel in contaminated*

- riparian sediments. *J. Environ. Qual.* 32:885-898.
- Sposito, G.** (1989). *The chemistry of soil*. Oxford University Press. Great Britain.
- Steell, R.G.D. y Torrie, J.H.** (1988) *Bioestadística: principios y procedimientos*. Ed. McGraw Hill. México, 622 pág.
- Stigliani, W. M., Jaffé, P. R. and Anderberg, S.** (1993). *Heavy metal pollution in the Rhine basin*. *Environ. Sci. Technol.* 27 (5): 786-793.
- Sukreeyapongse, O., Holm, P.E., Strobel, B.W., Panichsakpatana, S, Magid, J. and Hansen, H.C.B.** (2002). *pH-dependent release of cadmium, copper, and lead from natural and sludge-amended soils*. *J. Environ. Qual.* 31: 1901-1909.
- Swedish EPA.** (2002) Consultado: 27/VIII/2004.
<http://www.internat.naturvardsverket.se/index.php3?main=/documents/legal/assess/assdoc/forstdoc/heavymel.htm>
- Tessier, A., Campbell, P.G.C. and Bisson, M.** (1979). *Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals*. *Anal. Chem.* 51(7):844-851.
- Thompson, L.M. y F.R. Troeh.** (1980) *Los suelos y su fertilidad*. Reverté. España.
- Triefl, N. M.** (1981). *Environment and health*. Ann Arbor Science. USA. 652 p.
- Tuin, B.J. and Tels, M.** (1990). *Distribution of six heavy metals in contaminated clay soils before and after extractive cleaning*. *Environ. Tech.* 11:935-948.
- UE (Unión Europea)** (2002) www.norden.org consultado 12/IX/2004
- Vaca-Paulin, R.** (1999) *Especiación de metales pesados en suelos y sedimentos de la cuenca alta y media del río Lerma*. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias. UNAM. Pp 42.
- Vaithyanatha, P., Ramanathan, A. and Subramanian, V.** (1992). *Sediment transport in the Cauvery River basin: sediment characteristics and controlling factors*. *Journal of Hydrology.* 139: 197-210.
- Vázquez-Gutiérrez, F.** (1994). *Desarrollo urbano e industrial de las cuencas en México*. *Memoria del curso de Limnología Aplicada*. Gaceta del Lerma. Consejo de la cuenca Lerma-Chapala. pp:34-39.
- Vogeler, I.** (2001) *Copper and calcium transport through an unsaturated soil column*. *J. Environ. Qual.* 30:927-933.
- Vulkan, R., Mingelgrin, U., Ben-Asher, J. and Frenkel, H.** (2002) *Copper and zinc speciation in gen solution of soil-sludge mixture*. *J. Environ. Qual.* 31:1323-1334.
- Walkley, A.L. and Black, A.** (1947). *A rapid determination of soil organic matter*. *J. Agric Sci.* 25:563-568.
- Wayne, W.D.** (1991). *Biostatistics: A fundation for analysis in health sciencies*. John Wiley & Sons. 740 pag.
- Wild, A.** (1989). *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell*. Ediciones Mundi-prensa. España. p. 486-487.
- Wild, A.** (1993), *Soils and the environment. An introduction*. Cambridge University Press. Great Britain. p189-204.
- WRI** (The World Resources Institute), The United Nations Environment Program and the United Nations Development Program (1994). *World Resources 1994-1995. A guide to the global Environment People and Environment*. Oxford University Press. U.S.A. pp. 181-194.
- Zemberyová, M., Zwaik, A. and Farkasovská, I.** (1998). *Sequential extraction for the speciation of heavy metals in soils*. *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry.* 229 (1-2):67-71.
- Zhang, M.K., He, Z.L., Calvert, D.V., Stoffella, P.J., Yang, X.E. and Li, Y.C.** 2003. *Phosphorus and heavy metal attachment and release in sandy soil aggregate fractions*. *Soil Sci. Soc of Am.* 67:1158-1167.
- Zhang, M.K., He, Z.L., Stoffella, P.J., Calvert, D.V., Yang, X.E., Xia, Y.P. and Wilson, S.B.** 2004. *Solubility of phosphorus and heavy metals in potting media amended with yard waste-biosolids compost*. *J. Environ. Qual.* 33:373-379.
- Zhou, D., Hao, X., Tu, C., Chen, H and Si, Y** (2002) *Speciation and fractionation of heavy metals in soil experimentally contaminated with Pb, Cd, Cu and Zn together and effects on soil negative surface charge*. *Journal of Environmental Sciences.* 14(4):439-444

Apéndice I. Descripciones de perfil

Descripción del perfil 1. Rancho "El Puente", Ixtlahuaca, Estado de México

Fecha: 12 de marzo de 1998	Edad estratigráfica: Cuaternario
Localidad: Rancho "El Puente", Ixtlahuaca, Estado de México	Uso del suelo: Agrícola-Praticola
Altitud: 2520 msnm	Intensidad de uso: Bien empleado
Geología: Aluvión	Años de uso: Más de 100
Geoforma: Terraza aluvial deposicional actual	Cultivos: Avena, trigo, maíz, cebada, trébol.
Pendiente: menor al 1%	Factores limitantes: Inundación, manto freático, heladas y contaminación
Posición del perfil en la geoforma: Mitad	Tipo de tecnología: Abono, herbicidas, pesticidas, rotación de cultivos
Relieve: Plano	Nivel de manejo: Alto
Litología: Aluvión	Tenencia: Propiedad privada
Litología superficial: < 0.01%	Clase de tecnología: Riego, sin drenaje, en láminas (río, anual)
Tamaño que domina: Gravilla	
Grietas superficiales: 1cm de ancho (por contracción del material de origen)	
Afloramientos rocosos: <2%	
Erosión: Ligera en surcos	
Drenaje superficial: Moderado	Suelo: Phaeozem
Manto freático: 3 m	Profundidad: 143 cm
Material parental: Muy alterado (transportado)	Horizontes: 7

Separación								Estructura	
Horizonte	Profundidad	Contraste	Forma	Humedad	Consistencia	Adhesividad	Plasticidad	Tipo	Grado
Ap	0-30 cm	Clara	Plana	Húmedo	Muy friable	No adhesivo	Plástico	Migajosa	
Ag1	30-44 cm	Difusa	Ondulada	Húmedo	Friable	Ligera	Plástico	Subangular	Débil
Bg1	44-67 cm	Difusa	Plana	Húmedo	Friable	Ligera	Ligera	Angular	Moderado
Btg1	67-90 cm	Difusa	Plana	Húmedo	Friable	Ligera	Ligera	Angular	Débil
Btg2	90-116 cm	Difusa	Plana	Húmedo	Friable	Ligera	Plástico	Angular	Débil
Bg2	116-143 cm	Abrupta	Plana	Saturado	Muy friable	Adhesivo	Ligera	Angular	Débil
CR	143...		Lenguas	Saturado	Muy friable	Muy adhesivo	Ligera	Angular	Débil

Horizonte	Textura	Reacciones				Color		
		HCl	H ₂ O ₂	NaF	Manchas	Seco		Húmedo
Ap	Franca	-	+	-	-	10 YR 5/2 Gris pardo		7.5 YR 3/1 Gris muy oscuro
Ag1	Franca	-	+++	+	Abundante	10 YR 6/3 Café pálido		7.5 YR 3/2 Café oscuro
Bg1	Franco limosa	-	+++	+	Abundante	10 YR 6/3 Café pálido		7.5 YR 3/2 Café oscuro
Btg1	Franco limo arcillosa	-	+	-	Abundante	10 YR 6/2 Gris pardo pálido		2.5 YR 2.5/1 Negro rojizo
Btg2	Franco limo arenosa	-	+	-	Escasa	7.5 YR 5/1 Gris		5 YR 3/2 Café rojizo oscuro
Bg2	Franco areno limosa	-	++	-	-	10 YR 5/1 Gris		5 YR 3/1 Gris muy oscuro
CR	Franco areno limosa	-	++	-	-	10 YR 8/3 Café muy pálido		2.5 YR 5/3 Café olivo pálido

Descripción del perfil 2. "El Aguaje"
Ranchería "La Cuadrilla", Temascalcingo, Estado de México.

Fecha: 13 de marzo de 1998
Localidad: "El Aguaje". Ranchería "La Cuadrilla", Temascalcingo, Estado de México
Geología: Aluvión
Geoforma: Terraza aluvial deposicional actual
Pendiente: menor al 1%
Relieve: Casi plano
Litología: Aluvión
Litología superficial: < 0.01%
Tamaño que domina: Gravilla
Afloramientos rocosos: <2%
Erosión: Ligera en surcos
Drenaje superficial: Lento
Manto freático: 110 cm
Material parental: Muy alterado (transportado)

Edad estratigráfica: Cuaternario
Uso del suelo: Agrícola-Praticola
Años de uso: 25 años de pradera
Cultivos: Pastos, maíz, haba.
Factores limitantes: Nivel freático, heladas y contaminación
Tipo de tecnología: Abono
Nivel de manejo: Mediano
Tenencia: Ejido
Clase de tecnología: Riego en surco, sin drenaje, cada 15 días.
Rendimiento: 6 cortes al año

Suelo: **Phaeozem**
Horizontes: 6

Horizonte	Profundidad	Separación				Estructura			
		Contraste	Forma	Humedad	Consistencia	Adhesividad	Plasticidad	Tipo	Grado
Ap	0-7 cm	Difusa	Plana	Mojado	Muy friable	No adhesivo	Ligera	Angular	Desarrollado
Bw	7-46 cm	Difusa	Plana	Mojado	Friable	No adhesivo	Ligera	Angular	Débil
Bu1	46-64 cm	Difusa	Plana	Mojado	Friable	No adhesivo	Plástico	Angular	Débil
Bu2	64-71 cm	Difusa	Plana	Saturado	Muy friable	Adhesivo	Plástico	Angular	Desarrollado
Bu3	71-87 cm	Difusa	Plana	Saturado	Muy friable	Adhesivo	Ligera	Angular	Débil
Bu4	87 ...	Difusa	Plana	Saturado	Muy friable	Adhesivo	Ligera	Masiva	

Horizonte	Textura	Reacciones			Manchas	Color	
		HCl	H ₂ O ₂	NaF		Seco	Húmedo
Ap	Franca	-	+++	-	-	5 YR 4/1 Gris oscuro	5 YR 2.5/1 Negro
Bw	Franco arcillosa	-	++	+	E FeO, MnO	10 YR 6/3 Café pálido	10 YR 3/2 Gris pardo oscuro
Bu1	Franco arcilloarenosa	-	+	+	E FeO, MnO	10 YR 5/2 Gris pardo	10 YR 3/3 Pardo oscuro
Bu2	Franco arcillosa	-	++	+	Escasas FeO	10 YR 6/3 Café pálido	10 YR 3/3 Pardo oscuro
Bu3	Franco arcillosa	-	++	+	Escasas FeO	10 YR 6/2 Gris pardo pálido	10 YR 4/2 Gris pardo oscuro
Bu4	Franco arenosa	-	+	+	Escasas FeO	10 YR 6/2 Gris pardo pálido	10 YR 4/2 Gris pardo oscuro

Descripción del perfil 3
 “El Cerrillo Vista Hermosa”, Toluca, Estado de México

Fecha: 15 de mayo de 1998
 Localidad: El Cerrillo “Vista Hermosa”, Toluca, Estado de México
 Geología: Aluvión
 Geoforma: Valle
 Pendiente: Menor al 1%
 Relieve: Plano
 Litología: Aluvión
 Litología superficial: < 0.1%
 Tamaño: Menor a 5 cm.
 Afloramientos rocosos: nulos
 Erosión y depositación: nula
 Drenaje superficial: rápido
 Inundación: ocasional
 Manto freático: Aproximadamente a 3 mts.
 Material parental: aluvión

Edad estratigráfica: Cuaternario
 Uso del suelo: Agrícola
 Cultivos: Maíz, trigo, haba, calabaza, frijol
 Factores limitantes: Heladas, vientos.
 Suelo: **Phaeozem haplico** (joven)
 Horizontes: 6

Horizonte	Profundidad	Separación				Estructura			
		Contraste	Forma	Humedad	Consistencia	Adhesividad	Plasticidad	Tipo	Grado
Ap	0-12 cm	Difusa	Plana	Seco	Friable	Poca	Ligera	Granular	Débil
Ag1	12-35 cm	Difusa	Plana	Seco	Friable	Poca	Poca	Granular	Débil
Btg	35-52 cm	Difusa	Ondulada	Húmedo	Friable	Adhesivo	Ligera	Granular	Débil
Bu1	52-69/93 cm	Difusa	Ondulada	Húmedo	Friable	Ligera	Moderada	Granular	Débil
BC	69/93-102 cm	Difusa	Plana	Húmedo	Muy friable	No adhesivo	No plástico	Granular	Débil
CR	102-115 cm	Clara		Húmedo	Suelto	No adhesivo	No plástico	Granular	Débil

Horizonte	Textura	Reacciones			Manchas	Color	
		HCl	H ₂ O ₂	NaF		Seco	Húmedo
Ap	Franca	-	+++	-	-	10 YR 4/2 Gris pardo oscuro	10 YR 2/1 Negro
Ag1	Franca	-	+++	-	-	10 YR 4/1 Gris oscuro	10 YR 3/1 Gris muy oscuro
Btg	Franco arcillosa	-	+++	-	-	10 YR 4/1 Gris oscuro	10 YR 3/1 Gris muy oscuro
Bu1	Franca	-	-	+	-	10 YR 4/1 Gris oscuro	10 YR 2/1 Negro
BC	Franco arenosa	-	-	+	-	10 YR 5/1 Gris	10 YR 3/1 Gris muy oscuro
CR	Limo arenosa	-	+	-	-	10 YR 7/1 Gris pálido	10 YR 5/1 Gris pardo

Descripción del perfil 4
 Rancho "Los Compadres", Hacienda Solís, Temascalcingo, Estado de México.

Fecha: 20 de noviembre de 1998
 Localidad: Rancho "Los Compadres",
 Hacienda Solís, Temascalcingo, Estado
 de México
 Geología: Aluvión
 Geoforma: Base aluvial de piedemonte
 Pendiente: 3 %
 Relieve: Casi plano
 Litología: Aluvión
 Pedregosidad superficial: < 0.01%
 Tamaño que domina: Gravilla
 Afloramientos rocosos: <2%
 Erosión: Ligera en surcos
 Drenaje superficial: Lento
 Material parental: Muy alterado
 (transportado)
 Edad estratigráfica: Cuaternario

Uso del suelo: Agrícola-Praticola
 Cultivos: Pastos, maíz, haba.
 Tenencia: Propiedad privada
 Suelo: **Phaeozem háplico**
 Profundidad: 103 cm.
 Horizontes: 7

Horizonte	Profundidad	Separación				Estructura			
		Contraste	Forma	Humedad	Consistencia	Adhesividad	Plasticidad	Tipo	Grado
Ap	0-7 cm	Difusa	Plana	Seco	Muy friable	Ligera	Ligera	Granular	Moderado
A1	7-31 cm	Difusa	Plana	Fresco	Friable	Adhesivo	Plástico	Angular	Moderado
Bt	31-63 cm	Difusa	Plana	Mojado	Friable	Muy adhesivo	Muy plástico	Subangular	Moderado
Bs1	63-73 cm	Difusa	Plana	Mojado	Friable	Adhesivo	Plástico	Angular	Desarrollado
Bs2	73-87 cm	Difusa	Plana	Mojado	Muy friable	Adhesivo	Plástico	Angular	Moderado
Bsr	87-96 cm	Difusa	Plana	Húmedo	Muy friable	Ligera	Ligera	Subangular	Moderado
CR	96-103 cm			Húmedo	Muy friable	Ligera	Ligera	Subangular	Moderado

Horizonte	Textura	Reacciones				Color	
		HCl	H ₂ O ₂	NaF	Manchas	Seco	Húmedo
Ap	Franco arcillosa	-	+++	+	-	10 YR 4/2 Gris pardo oscuro	10 YR 2/1 Negro
A1	Franco arcillosa	-	++	+	-	10 YR 5/2 Gris pardo	10 YR 2/2 Pardo muy oscuro
Bt	Arcillosa	-	+	-	-	10 YR 4/2 Gris pardo oscuro	10 YR 3/2 Gris pardo muy oscuro
Bs1	Arcillo limosa	-	+	-	5% MnO	10 YR 5/1 Gris	10 YR 4/1 Gris oscuro
Bs2	Arcillo limosa	-	+	-	10% MnO	10 YR 6/3 Café pálido	10 YR 5/2 Gris pardo
Bsr	Franco limosa	-	+	-	20% MnO	10 YR 7/3 Café muy pálido	10 YR 4/2 Gris pardo oscuro
CR	Franco limosa	-	++	-	40% MnO	10 YR 7/3 Café muy pálido	10 YR 4/3 Pardo

Descripción del perfil 5. "Manto del Río",
Atlacomulco, Estado de México.

Fecha: 29 de noviembre de 1998
 Localidad: "Manto del Río", Atlacomulco, Estado de México
 Geología: Aluvión
 Geoforma: Terraza aluvial
 Pendiente: 8 %
 Posición del perfil en la geoforma: Mitad
 Relieve: Plano
 Litología: Aluvión
 Pedregosidad superficial: < 0.01%
 Tamaño que domina: Gravilla
 Afloramientos rocosos: <2%
 Erosión: Ligera en surcos
 Material parental: Muy alterado (transportado)
 Edad estratigráfica: Cuaternario
 Uso del suelo: Agrícola-Praticola
 Cultivos: Maíz, rosa, trigo.
 Tenencia: Propiedad privada

Suelo: **Phaeozem haplico**
 Profundidad: 141 cm
 Horizontes:5.

Horizonte	Profundidad	Separación				Estructura			
		Contraste	Forma	Humedad	Consistencia	Adhesividad	Plasticidad	Tipo	Grado
Ap	0-18 cm	Gradual	Ondulada	Fresco	Muy friable	No adhesivo	Plástico	Subangular	Moderado
Btg	18-32/54 cm	Gradual	Irregular	Fresco	Friable	Ligera	Plástico	Angular	Moderado
Bg1	32/54-61/70 cm	Gradual	Irregular	Húmedo	Friable	Ligera	Plástico	Angular	Moderado
Bg2	61/70-80/98 cm	Quebrado	Lenguas	Húmedo	Friable	Muy adhesivo	Muy plástico	Angular	Desarrollado
Bg3	80/91-141 cm	Quebrado		Húmedo	Friable	Adhesivo	Plástico	Angular	Moderado

Horizonte	Textura	Reacciones			Manchas	Color	
		HCl	H ₂ O ₂	NaF		Seco	Húmedo
Ap	Franca	-	+++	-	-	10 YR 5/2 Gris pardo	10 YR 2/2 Pardo muy oscuro
Btg	Franco arcillosa	-	++	-	-	10 YR 5/1 Gris	10 YR 3/1 Gris muy oscuro
Bg1	Franco arcillosa	-	+++	+	-	10 YR 4/1 Gris oscuro	10 YR 2/1 Negro
Bg2	Franco arcillosa	-	++	++	-	10 YR 5/1 Gris	10 YR 3/1 Gris muy oscuro
Bg3	Franco arcillosa	-	+	+	-	10 YR 6/1 Gris	10 YR 3/1 Gris muy oscuro

Descripción del perfil 6. El Cerrillo "Piedras Blancas",
Toluca, Estado de México.

Fecha: 3 de diciembre de 1998
 Localidad: El Cerrillo "Piedras Blancas", Toluca, Estado de México
 Geología: Aluvión
 Geoforma: Valle
 Pendiente: menor al 1%
 Relieve: Casi plano
 Litología: Aluvión
 Pedregosidad superficial: < 0.01%
 Tamaño que domina: Gravilla
 Afloramientos rocosos: <2%
 Erosión: Ligera en surcos
 Material parental: Muy alterado (transportado)
 Edad estratigráfica: Cuaternario
 Uso del suelo: Agrícola-Praticola
 Cultivos: Maíz y cebada.
 Factores limitantes: Heladas y vientos
 Tenencia: Terreno federal donado a la UAEMéx.

Suelo: **Phaeozem háplico**
 Profundidad: 120 cm
 Horizontes: 5

Horizonte	Profundidad	Separación				Estructura			
		Contraste	Forma	Humedad	Consistencia	Adhesividad	Plasticidad	Tipo	Grado
Ap	0-9 cm	Difusa	Plana	Fresco	Muy friable	Ligera	Ligera	Subangular	Débil
Bw	9-23 cm	Difusa	Plana	Húmedo	Friable	Ligera	Plástico	Subangular	Moderado
Bg1	23-60 cm	Difusa	Plana	Húmedo	Friable	Adhesivo	Ligera	Subangular	Débil
Bg2	60-92 cm	Clara	Plana	Húmedo	Friable	Adhesivo	Plástico	Subangular	Muy débil
BC	92-120 cm			Saturado	Muy friable	No adhesivo	No plástico	Subangular	Moderado

Horizonte	Textura	Reacciones				Color	
		HCl	H ₂ O ₂	NaF	Manchas	Seco	Húmedo
Ap	Franco arcillo arenosa	-	+++	-	-	10 YR 4/1 Gris oscuro	10 YR 2/1 Negro
Bw	Franco limosa fina	-	+++	-	-	10 YR 5/2 Gris pardo	10 YR 4/2 Gris pardo oscuro
Bg1	Franco arcillo limosa	-	++	-	-	10 YR 5/2 Gris pardo	10 YR 3/1 Gris muy oscuro
Bg2	Areno arcillosa	-	++	-	-	10 YR 5/2 Gris pardo	10 YR 3/1 Gris muy oscuro
BC	Franco arenoarcillosa	-	+	+	-	10 YR 7/2 Gris pálido	10 YR 5/3 Pardo

Apéndice II. Características físicas y químicas

a) Perfil 1.

Horizonte	D.A. (gr/cm ³)	D.R. (gr/cm ³)	Porcentaje de Porosidad	Porcentaje		
				Arena	Limo	Arcilla
Ap	1.19 ± .03	2.37 ± .18	49.79 ± 1.94	50.8 ± 5	30.0 ± 1	19.2 ± 2
Ag1	1.22 ± .00	2.48 ± .15	50.81 ± 2.35	44.8 ± 8	34.0 ± 2	21.2 ± 1
Bt1	1.17 ± .01	2.30 ± .28	49.13 ± 2.40	20.8 ± 0	30.0 ± 5	49.2 ± 2
Btg1	1.17 ± .01	2.30 ± .00	49.13 ± 1.90	32.8 ± 4	30.0 ± 3	37.2 ± 4
Btg2	1.32 ± .03	2.59 ± .22	49.03 ± 1.68	66.8 ± 7	20.0 ± 5	13.2 ± 0
Bg2	1.26 ± .00	2.50 ± .33	49.60 ± 1.61	60.8 ± 0	20.0 ± 0	19.2 ± 3
CR	1.15 ± .01	2.52 ± .35	54.36 ± 2.02	42.8 ± 9	18.0 ± 2	39.2 ± 4

Horizonte	pH _{agua}	pH _{KCl}	CE	M.O. (%)	C.I.C. (cmol/Kg)	Na (cmol/Kg)	K (cmol/Kg)	Ca (cmol/Kg)	Mg (cmol/Kg)	%Saturación de bases
Ap	7.03 ± .02	6.33 ± .04	.248 ± .005	3.91 ± .00	24 ± 3.5	1.84 ± .10	1.12 ± .03	10.19 ± 1.07	7.10 ± .12	84.38 ± 1.21
Ag1	7.31 ± .01	6.46 ± .02	.162 ± .001	1.10 ± .03	19 ± 0.5	1.90 ± .45	0.56 ± .00	13.04 ± 1.04	7.63 ± .63	96.38 ± 1.73
Bt1	7.30 ± .00	6.20 ± .01	.173 ± .004	0.93 ± .06	22 ± 0.0	2.40 ± .00	0.34 ± .02	15.75 ± 0.68	8.16 ± .24	98.70 ± 1.64
Btg1	7.22 ± .01	6.19 ± .01	.148 ± .005	1.16 ± .03	25 ± 1.5	1.90 ± .00	0.27 ± .01	12.83 ± 1.84	8.22 ± .17	92.88 ± 1.46
Btg2	7.11 ± .05	6.27 ± .01	.113 ± .001	0.60 ± .00	13 ± 0.5	1.19 ± .01	0.18 ± .00	8.12 ± 0.39	5.56 ± .06	94.06 ± 0.84
Bg2	7.03 ± .01	6.24 ± .02	.116 ± .001	0.83 ± .03	16 ± 1.5	1.58 ± .03	0.18 ± .01	9.69 ± 0.28	5.83 ± .39	96.00 ± 0.97
CR	6.99 ± .01	5.97 ± .01	.153 ± .002	0.50 ± .03	30 ± 0.5	1.71 ± .31	0.43 ± .05	16.83 ± 0.03	8.73 ± .13	92.33 ± 1.68

b) Perfil 2.

Horizonte	D.A. (gr/cm ³)	D.R. (gr/cm ³)	Porcentaje de Porosidad	Porcentaje de		
				Arena	Limo	Arcilla
Ap	0.75 ± .02	2.03 ± .21	63.05 ± 2.37	66.8 ± 4	20.0 ± 7	13.2 ± 0
Bw	1.19 ± .01	2.61 ± .17	54.41 ± 1.91	38.8 ± 3	22.0 ± 4	39.2 ± 2
Bu1	1.23 ± .02	2.30 ± .33	46.51 ± 1.90	42.8 ± 7	22.0 ± 2	35.2 ± 3
Bu2	1.18 ± .00	2.40 ± .12	50.83 ± 1.84	40.8 ± 3	21.6 ± 5	37.6 ± 1
Bu3	1.21 ± .00	1.59 ± .14	23.90 ± 2.61	40.4 ± 3	52.0 ± 0	7.6 ± 1
Bu4	1.21 ± .01	4.49 ± .23	73.05 ± 2.34	38.4 ± 4	22.2 ± 6	39.4 ± 2

Horizonte	pH _{agua}	pH _{KCl}	CE	M.O. (%)	C.I.C. (cmol/Kg)	Na (cmol/Kg)	K (cmol/Kg)	Ca (cmol/Kg)	Mg (cmol/Kg)	%Saturación de bases
Ap	6.89 ± .03	6.22 ± .02	.490 ± .002	10.87 ± .09	35 ± 3.0	1.78 ± .59	1.18 ± .11	14.18 ± 1.32	7.03 ± .71	69.06 ± 1.55
Bw	7.20 ± .07	6.11 ± .00	.113 ± .002	1.03 ± .01	25 ± 1.0	1.84 ± .07	0.86 ± .00	13.93 ± 0.08	6.68 ± .10	93.24 ± 1.40
Bu1	7.43 ± .01	6.14 ± .01	.103 ± .001	0.60 ± .06	27 ± 1.5	1.90 ± .00	0.68 ± .02	13.96 ± 0.30	6.51 ± .04	85.37 ± 1.26
Bu2	7.46 ± .01	6.17 ± .02	.104 ± .001	0.57 ± .03	25 ± 1.5	1.78 ± .06	0.67 ± .00	14.00 ± 0.07	6.33 ± .10	91.12 ± 1.07
Bu3	7.60 ± .02	6.26 ± .00	.088 ± .005	0.37 ± .03	27 ± 0.5	1.90 ± .31	0.57 ± .02	14.02 ± 0.03	5.91 ± .33	82.96 ± 1.41
Bu4	7.54 ± .02	6.25 ± .02	.098 ± .000	0.50 ± .03	28 ± 0.5	2.11 ± .23	0.59 ± .00	14.63 ± 0.42	6.61 ± .23	85.50 ± 1.54

c) Perfil 3.

Horizonte	D.A. (gr/cm ³)	D.R. (gr/cm ³)	Porcentaje de Porosidad	Porcentaje de		
				Arena	Limo	Arcilla
Ap	1.16 ± .00	2.62 ± .38	55.73 ± 1.02	38.8 ± 3	46.8 ± 8	14.4 ± 1
Ag1	1.16 ± .02	2.45 ± .42	52.65 ± 1.46	56.8 ± 2	24.8 ± 1	18.4 ± 2
Btg	1.16 ± .03	2.43 ± .27	52.26 ± 0.96	56.8 ± 4	20.8 ± 2	22.4 ± 4
Bu1	1.06 ± .02	2.34 ± .31	54.70 ± 1.99	70.8 ± 4	22.4 ± 4	6.8 ± 1
BC	1.24 ± .02	2.42 ± .50	48.76 ± 2.96	84.8 ± 8	10.8 ± 3	4.4 ± 0
CR	1.30 ± .01	1.97 ± .19	34.01 ± 3.54	72.8 ± 5	23.0 ± 3	4.2 ± 0

Horizonte	pH _{agua}	pH _{KCl}	CE	M.O. (%)	C.I.C. (cmol/Kg)	Na (cmol/Kg)	K (cmol/Kg)	Ca (cmol/Kg)	Mg (cmol/Kg)	%Saturación de bases
Ap	5.40 ± .03	4.90 ± .02	.138 ± .006	2.46 ± .06	28 ± 2.5	0.90 ± .11	0.51 ± .00	10.44 ± .97	5.08 ± .43	60.46 ± 1.13
Ag1	5.61 ± .16	5.03 ± .02	.061 ± .005	1.86 ± .07	16 ± 2.5	1.01 ± .35	0.28 ± .00	11.87 ± .07	5.21 ± .29	96.68 ± 1.19
Btg	6.02 ± .03	5.30 ± .00	.060 ± .000	1.63 ± .03	17 ± 3.0	0.78 ± .18	0.25 ± .01	11.63 ± .72	5.44 ± .11	95.26 ± 1.23
Bu1	6.60 ± .03	5.81 ± .00	.057 ± .001	1.06 ± .00	20 ± 0.0	1.58 ± .00	0.36 ± .02	11.89 ± .46	4.42 ± .36	91.25 ± 2.24
BC	6.64 ± .04	6.10 ± .01	.045 ± .002	0.70 ± .03	20 ± 0.5	1.84 ± .17	0.29 ± .03	8.36 ± .50	4.27 ± .01	73.80 ± 3.86
CR	6.91 ± .01	6.03 ± .00	.050 ± .002	0.10 ± .03	16 ± 1.0	3.27 ± .19	0.43 ± .03	8.52 ± .22	4.52 ± .23	98.47 ± 8.74

d) Perfil 4.

Horizonte	D.A. (gr/cm ³)	D.R. (gr/cm ³)	Porcentaje de Porosidad	Porcentaje de		
				Arena	Limo	Arcilla
Ap	1.23 ± .02	2.53 ± .10	51.38 ± 3.08	60.4 ± 2	18.4 ± 1	21.2 ± 1
A1	1.28 ± .04	2.47 ± .46	48.18 ± 2.76	50.8 ± 3	24.0 ± 2	25.2 ± 0
Bt	1.28 ± .05	2.70 ± .45	52.59 ± 3.31	30.8 ± 3	16.0 ± 3	53.2 ± 3
Bs1	1.11 ± .02	2.22 ± .06	50.00 ± 2.61	34.8 ± 1	26.0 ± 2	39.2 ± 2
Bs2	1.10 ± .03	2.31 ± .10	52.38 ± 2.29	50.8 ± 4	30.0 ± 1	19.2 ± 2
Bsr	1.12 ± .02	1.53 ± .14	26.80 ± 2.22	66.4 ± 1	24.0 ± 2	9.6 ± 1
CR	1.07 ± .01	4.57 ± .29	76.59 ± 2.27	72.4 ± 3	18.0 ± 3	9.6 ± 0

Horizonte	pH _{agua}	pH _{KCl}	CE	M.O. (%)	C.I.C. (cmol/Kg)	Na (cmol/Kg)	K (cmol/Kg)	Ca (cmol/Kg)	Mg (cmol/Kg)	%Saturación de bases
Ap	6.71 ± .03	5.81 ± .00	.118 ± .002	1.66 ± .07	15 ± 0.5	2.96 ± .08	0.89 ± .01	11.91 ± .09	4.20 ± .52	99.80 ± 2.00
A1	7.04 ± .02	6.05 ± .01	.152 ± .001	1.26 ± .07	18 ± 2.0	2.49 ± .03	0.35 ± .00	11.15 ± .88	4.63 ± .20	98.00 ± 3.02
Bt	7.10 ± .09	6.26 ± .01	.304 ± .001	0.90 ± .03	35 ± 4.5	3.19 ± .12	0.29 ± .01	19.85 ± .77	5.29 ± .37	81.77 ± 2.60
Bs1	7.37 ± .02	6.45 ± .00	.299 ± .006	0.60 ± .00	30 ± 0.0	2.49 ± .12	0.34 ± .03	19.17 ± .51	5.89 ± .03	92.97 ± 8.60
Bs2	7.37 ± .03	6.47 ± .01	.214 ± .004	0.53 ± .00	29 ± 0.5	2.25 ± .04	0.50 ± .03	19.68 ± .33	5.84 ± .03	97.48 ± 2.10
Bsr	7.20 ± .01	6.54 ± .03	.175 ± .001	0.07 ± .00	30 ± 0.0	1.71 ± .01	0.65 ± .00	20.89 ± .24	2.98 ± .14	87.43 ± 3.11
CR	7.87 ± .02	6.56 ± .03	.142 ± .008	0.07 ± .00	35 ± 1.0	2.11 ± .06	0.63 ± .02	20.91 ± .78	6.79 ± .11	86.97 ± 9.61

e) Perfil 5.

Horizonte	D.A. (gr/cm ³)	D.R. (gr/cm ³)	Porcentaje de Porosidad	Porcentaje de		
				Arena	Limo	Arcilla
Ap	1.18 ± .01	2.36 ± .01	50.00 ± 0.93	64.4 ± 4	12.0 ± 0	23.6 ± 1
Btg	1.16 ± .00	2.52 ± .24	53.97 ± 1.33	34.4 ± 2	30.0 ± 2	35.6 ± 3
Bg1	1.10 ± .02	1.98 ± .22	44.44 ± 2.85	28.4 ± 1	56.0 ± 4	15.6 ± 2
Bg2	1.13 ± .03	2.34 ± .29	51.71 ± 1.64	40.4 ± 3	50.0 ± 2	9.6 ± 0
Bg3	1.05 ± .01	2.45 ± .07	57.14 ± 1.42	30.4 ± 2	38.0 ± 1	31.6 ± 3

Horizonte	pH _{agua}	pH _{KCl}	CE	M.O. (%)	C.I.C (cmol/Kg)	Na (cmol/Kg)	K (cmol/Kg)	Ca (cmol/Kg)	Mg (cmol/Kg)	%Saturación de bases
Ap	4.97 ± .04	4.13 ± .01	.223 ± .014	2.04 ± .05	15 ± 1.5	0.90 ± .03	0.11 ± .00	6.81 ± .44	3.70 ± .12	76.80 ± 7.25
Btg	6.71 ± .05	5.34 ± .00	.124 ± .007	1.30 ± .03	20 ± 1.0	1.44 ± .11	0.08 ± .01	12.03 ± .00	5.34 ± .20	94.45 ± 5.42
Bg1	7.01 ± .01	5.86 ± .00	.114 ± .004	1.20 ± .06	25 ± 3.5	2.18 ± .07	0.11 ± .02	13.67 ± .65	5.80 ± .29	87.04 ± 5.22
Bg2	7.65 ± .01	6.62 ± .01	.109 ± .001	0.92 ± .07	25 ± 1.0	1.38 ± .16	0.16 ± .00	15.85 ± .28	5.80 ± .12	92.76 ± 6.13
Bg3	7.67 ± .01	6.49 ± .01	.111 ± .003	0.70 ± .01	25 ± 0.0	1.25 ± .17	0.11 ± .01	12.37 ± .68	4.94 ± .09	74.68 ± 3.05

f) Perfil 6.

Horizonte	D.A. (gr/cm ³)	D.R. (gr/cm ³)	Porcentaje de Porosidad	Porcentaje de		
				Arena	Limo	Arcilla
Ap	0.99 ± .02	2.18 ± .20	54.59 ± 1.78	56.4 ± 6	30.0 ± 4	13.6 ± 1
Bw	1.25 ± .04	2.38 ± .15	47.48 ± 2.28	44.4 ± 4	24.0 ± 3	31.6 ± 4
Bg1	1.20 ± .03	2.40 ± .38	50.00 ± 1.61	48.4 ± 1	24.0 ± 2	27.6 ± 2
Bg2	1.21 ± .01	2.31 ± .11	47.62 ± 1.91	38.4 ± 0	24.0 ± 0	37.6 ± 3
BC	1.18 ± .03	2.39 ± .02	50.63 ± 1.78	48.4 ± 2	42.0 ± 3	9.6 ± 0

Horizonte	pH _{agua}	pH _{KCl}	CE	M.O. (%)	C.I.C. (cmol/Kg)	Na (cmol/Kg)	K (cmol/Kg)	Ca (cmol/Kg)	Mg (cmol/Kg)	%Saturación de bases
Ap	7.15 ± .03	6.06 ± .02	.206 ± .000	6.47 ± .03	27 ± 0.0	1.51 ± .11	1.67 ± .02	12.63 ± .68	4.51 ± .36	75.26 ± 3.31
Bw	7.30 ± .06	5.98 ± .02	.138 ± .005	1.86 ± .06	19 ± 1.1	1.90 ± .00	0.90 ± .03	10.95 ± .68	2.78 ± .15	87.00 ± 6.31
Bg1	6.82 ± .02	5.64 ± .01	.080 ± .001	0.90 ± .03	19 ± 0.5	1.51 ± .10	0.73 ± .00	8.22 ± .31	1.12 ± .04	60.95 ± 8.51
Bg2	6.95 ± .01	5.88 ± .07	.131 ± .003	1.16 ± .03	25 ± 1.0	1.64 ± .07	0.85 ± .00	11.22 ± .80	2.62 ± .16	65.32 ± 2.02
BC	7.20 ± .03	5.93 ± .03	.145 ± .002	0.07 ± .00	24 ± 0.5	1.78 ± .00	0.85 ± .01	11.69 ± .20	3.99 ± .20	76.29 ± 8.91

Apéndice III. Metales pesados totales

a) Perfil 1.

Horizonte	$\mu\text{g g}^{-1}$								
	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
Ap	< 2.8	33.95± 1.9	22.45± 4.0	42.40± 0.8	23085	635.5	37.55± 8.5	53.5± 2.5	80.15± 9.0
Ag1	< 2.8	29.20± 1.6	22.50± 1.7	22.50± 1.2	24750	697.5	28.95± 4.2	51.0± 3.0	67.30± 1.1
Bg1	< 2.8	23.80± 2.2	23.85± 2.3	23.60± 4.1	28990	586.5	31.45± 2.2	40.5± 8.5	83.60± 2.8
Btg1	< 2.8	25.00± 1.0	21.65± 0.2	16.35± 0.7	27115	879.0	23.65± 2.3	62.5± 5.5	66.00± 0.2
Btg2	< 2.8	20.65± 0.2	14.60± 1.1	6.55± 0.2	18090	704.5	24.60± 7.6	53.0± 1.0	46.10± 6.2
Bg2	< 2.8	16.65± 1.1	15.95± 0.1	5.65± 0.4	17805	567.5	22.75± 2.7	47.5± 6.5	51.70± 8.7
CR	< 2.8	25.25± 1.2	32.60± 3.1	7.00± 0.7	35275	413.0	35.20± 2.5	58.5± 2.5	73.85± 9.8

b) Perfil 2.

Horizonte	$\mu\text{g g}^{-1}$								
	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
Ap	< 2.8	24.85± 4.8	16.50± 2.4	16.70± 3.9	18025	769.0	35.20± 3.0	82.5± 6.5	70.40± 7.1
Bw	< 2.8	42.70± 1.7	16.10± 1.3	19.65± 0.9	27190	115.5	37.50± 3.8	71.0± 3.0	87.30± 6.3
Bu1	< 2.8	32.25± 1.3	15.40± 2.4	22.65± 2.7	24135	737.0	30.40± 1.0	104.5± 7.5	81.10± 3.2
Bu2	< 2.8	30.55± 1.6	20.40± 4.9	16.90± 2.1	25525	797.0	30.15± 4.2	97.0± 2.0	73.25± 1.2
Bu3	< 2.8	31.05± 0.4	14.10± 0.3	17.50± 1.5	23055	811.0	29.50± 4.6	112.0± 4.5	77.80± 2.9
Bu4	< 2.8	31.35± 0.8	16.85± 0.6	13.70± 3.1	25590	791.0	27.70± 2.2	116.5± 6.5	78.15± 5.5

c) Perfil 3.

Horizonte	$\mu\text{g g}^{-1}$								
	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
Ap	< 2.8	18.05± 1.8	37.55± 1.9	24.55± 0.9	17100	722.0	33.50± 2.3	94.5± 6.5	95.00± 5.7
Ag1	< 2.8	15.20± 0.4	40.65± 1.6	20.85± 0.5	18185	873.0	27.95± 1.9	104.0± 6.0	90.25± 0.7
Btg	< 2.8	12.35± 0.0	37.75± 1.4	24.85± 0.6	17970	777.5	34.05± 3.5	63.5± 0.5	90.40± 2.9
Bu1	< 2.8	11.55± 0.1	9.25± 1.7	13.15± 0.1	15725	410.5	25.90± 1.7	63.5± 2.5	50.75± 1.8
BC	< 2.8	9.65± 0.5	5.65± 0.6	9.25± 0.9	10205	851.5	16.05± 1.6	57.0± 5.0	55.45± 5.4
CR	< 2.8	2.00± 0.2	5.50± 0.4	2.35± 0.2	18255	1047.5	24.65± 3.6	51.0± 0.0	66.90± 5.9

d) Perfil 4.

Horizonte	$\mu\text{g g}^{-1}$								
	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
Ap	< 2.8	19.75± 1.2	8.25± 1.4	13.50± 1.4	16165	974.0	21.95± 1.0	66.5± 1.5	43.15± 3.1
A1	< 2.8	10.85± 0.6	8.85± 0.0	12.70± 1.2	16905	709.0	26.55± 0.5	30.5± 2.5	56.95± 5.1
Bt	< 2.8	18.50± 1.4	23.80± 0.6	19.15± 0.4	27755	648.5	38.25± 1.6	45.0± 4.0	85.45± 0.7
Bs1	< 2.8	13.95± 2.8	20.85± 0.1	13.75± 1.7	23500	571.5	54.90± 4.7	23.0± 3.0	76.90± 3.0
Bs2	< 2.8	15.05± 1.7	17.60± 2.2	15.85± 0.1	26930	531.0	40.40± 2.0	33.0± 1.0	91.50± 5.8
Bsr	< 2.8	10.15± 0.7	12.15± 1.3	13.65± 0.9	21520	474.0	35.30± 4.3	45.5± 2.5	74.70± 4.3
CR	< 2.8	17.20± 0.0	13.60± 0.8	18.30± 1.7	24865	624.5	25.35± 1.6	41.5± 3.5	93.60± 2.3

e) Perfil 5.

Horizonte	$\mu\text{g g}^{-1}$								
	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
Ap	< 2.8	9.30± 0.7	7.20± 0.3	9.60± 0.7	12380	287.5	17.35± 1.2	68.0± 6.0	50.40± 3.2
Btg	< 2.8	11.45± 1.5	14.65± 1.6	15.00 0.3	15630	312.0	22.35± 1.0	50.5± 4.5	42.05± 4.3
Bg1	< 2.8	10.50± 0.5	18.90± 0.8	12.30± 0.6	17630	150.0	20.80± 1.3	59.0± 4.0	44.40± 1.3
Bg2	< 2.8	14.30± 0.6	20.55± 0.9	14.95± 0.2	17625	80.5	22.50± 1.6	21.5± 0.5	48.80± 1.9
Bg3	< 2.8	12.90± 0.6	12.70± 1.5	13.10± 1.0	13510	259.5	16.30± 1.4	40.0± 5.0	57.35± 5.0

f) Perfil 6.

Horizonte	$\mu\text{g g}^{-1}$								
	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
Ap	< 2.8	26.00± 0.3	21.70± 2.1	36.20± 0.3	20780	457.0	26.30± 1.0	38.0± 1.1	105.30± 1.7
Bw	< 2.8	22.75± 1.3	15.60± 1.3	19.90± 1.5	17135	430.0	29.90± 0.5	65.5± 4.5	75.15± 2.5
Bg1	< 2.8	19.75± 2.2	28.75± 2.2	9.10± 0.3	18715	527.0	40.55± 3.3	65.5± 6.5	68.65± 3.7
Bg2	< 2.8	23.60± 0.0	22.25± 1.0	18.80± 1.3	24465	591.0	36.30± 2.2	78.5± 4.5	86.00± 2.7
BC	< 2.8	20.20± 1.0	26.20± 0.5	15.10± 0.3	31930	539.0	29.05± 0.6	59.0± 3.0	90.70± 4.1

Apéndice IV. Fraccionamiento de metales pesados.

Cobalto ($\mu\text{g g}^{-1}$)

Muestra	Intercamb	Carbonato	Ox. Fe y Mn	Org. y sulf	Residual
P2 Ap	< 0.96	1.14 ± .31	4.72 ± .06	2.79 ± .28	16.198 ± 1.1
P2 Bw	< 0.96	< 2.4	4.80 ± .21	3.94 ± .46	33.956 ± .90
P2 Bu1	< 0.96	< 2.4	4.60 ± .31	2.62 ± .66	25.026 ± .83
P2 Bu2	< 0.96	< 2.4	4.80 ± .54	2.43 ± .62	13.318 ± 1.2
P5 Ap	1.75 ± .07	1.17 ± .03	< 0.96	2.30 ± .06	4.07 ± 0.6
P5 Btg	< 0.96	< 2.4	< 0.96	< 1.92	11.45 ± 1.0
P5 Bg1	< 0.96	< 2.4	< 0.96	< 1.92	10.5 ± .07
P5 Bg2	< 0.96	< 2.4	< 0.96	< 1.92	14.3 ± .08
P6 Ap	< 0.96	0.97 ± .01	3.14 ± .47	< 1.92	21.88 ± .66
P6 Bw	< 0.96	< 2.4	2.94 ± .00	2.32 ± .61	17.49 ± .38
P6 Bg1	< 0.96	< 2.4	5.72 ± .32	2.07 ± .45	11.96 ± .99
P6 Bg2	< 0.96	< 2.4	3.40 ± .58	< 1.92	20.20 ± .82

Cromo ($\mu\text{g g}^{-1}$)

Muestra	Intercamb	Carbonato	Ox. Fe y Mn	Org. y sulf	Residual
P2 Ap	< 0.62	< 0.62	1.92 ± .04	4.20 ± .32	10.38 ± .57
P2 Bw	< 0.62	< 0.62	1.78 ± .24	< 1.25	14.32 ± .48
P2 Bu1	< 0.62	< 0.62	1.64 ± .40	< 1.25	13.76 ± .63
P2 Bu2	< 0.62	< 0.62	1.75 ± .43	< 1.25	18.65 ± .09
P5 Ap	< 0.62	< 0.62	2.28 ± .38	2.83 ± .16	2.09 ± .05
P5 Btg	< 0.62	< 0.62	2.27 ± .35	2.61 ± .12	9.77 ± .15
P5 Bg1	< 0.62	< 0.62	2.37 ± .51	2.83 ± .12	13.70 ± .28
P5 Bg2	< 0.62	< 0.62	2.42 ± .36	2.82 ± .09	15.31 ± .41
P6 Ap	< 0.62	< 0.62	3.01 ± .51	4.29 ± .21	14.4 ± .18
P6 Bw	< 0.62	< 0.62	2.58 ± .36	2.18 ± .17	10.84 ± .16
P6 Bg1	< 0.62	< 0.62	2.36 ± .32	2.06 ± .19	24.33 ± .21
P6 Bg2	< 0.62	< 0.62	2.64 ± .48	2.03 ± .34	17.58 ± .19

Cobre ($\mu\text{g g}^{-1}$)

Muestra	Intercamb	Carbonato	Ox. Fe y Mn	Org. y sulf	Residual
P2 Ap	6.58 ± .10	< 1.36	< 3.4	< 2.72	10.12 ± 1.3
P2 Bw	6.37 ± .02	< 1.36	< 3.4	< 2.72	13.28 ± 1.1
P2 Bu1	6.08 ± .31	< 1.36	< 3.4	< 2.72	16.56 ± 1.3
P2 Bu2	4.80 ± .31	< 1.36	< 3.4	< 2.72	12.10 ± .97
P5 Ap	5.44 ± .34	< 1.36	< 3.4	< 2.72	4.16 ± .84
P5 Btg	5.28 ± .81	< 1.36	< 3.4	< 2.72	9.72 ± .57
P5 Bg1	5.98 ± .05	< 1.36	< 3.4	< 2.72	6.32 ± .38
P5 Bg2	5.60 ± .95	< 1.36	< 3.4	< 2.72	9.35 ± .74
P6 Ap	6.18 ± .30	< 1.36	7.12 ± .74	3.23 ± .24	19.67 ± 1.8
P6 Bw	6.32 ± .17	< 1.36	3.96 ± .72	< 2.72	9.62 ± .94
P6 Bg1	5.26 ± .82	< 1.36	2.84 ± .26	< 2.72	1.00 ± .00
P6 Bg2	5.82 ± .23	< 1.36	9.05 ± .47	< 2.72	3.93 ± .09

Níquel ($\mu\text{g g}^{-1}$)

Muestra	Intercamb	Carbonato	Ox. Fe y Mn	Org. y sulf	Residual
P2 Ap	4.56 ± .15	< 1.12	9.16 ± .32	7.53 ± .44	13.95 ± 1.25
P2 Bw	2.89 ± .18	< 1.12	7.03 ± .05	5.14 ± .29	20.14 ± 0.98
P2 Bu1	1.57 ± .22	< 1.12	5.53 ± .12	4.16 ± .17	26.24 ± 2.56
P2 Bu2	1.91 ± .26	1.96 ± .04	4.83 ± .09	4.10 ± .22	17.6 ± 1.05
P5 Ap	1.67 ± .15	1.72 ± .12	3.29 ± .15	4.04 ± .02	6.63 ± .56
P5 Btg	< 1.12	1.96 ± .02	3.75 ± .06	3.19 ± .01	13.45 ± .82
P5 Bg1	< 1.12	1.96 ± .08	3.16 ± .17	3.38 ± .03	12.3 ± .93
P5 Bg2	1.69 ± .17	2.70 ± .18	< 2.8	3.89 ± .09	14.22 ± .28
P6 Ap	2.19 ± .12	2.58 ± .15	3.61 ± .11	6.24 ± .19	11.68 ± .97
P6 Bw	2.37 ± .26	3.37 ± .24	4.42 ± .19	6.22 ± .17	13.52 ± .64
P6 Bg1	2.11 ± .24	3.53 ± .00	6.02 ± .01	5.70 ± .21	23.19 ± .72
P6 Bg2	2.33 ± .25	3.89 ± .05	6.02 ± .07	5.53 ± .05	18.53 ± .80

Plomo ($\mu\text{g g}^{-1}$)

Muestra	Intercamb	Carbonato	Ox. Fe y Mn	Org. y sulf	Residual
P2 Ap	8.52 ± 1.3	< 1.52	12.70 ± .27	5.92 ± .24	55.36 ± 2.48
P2 Bw	3.64 ± .07	< 1.52	5.40 ± .42	4.48 ± .00	57.48 ± 3.92
P2 Bu1	3.60 ± .26	< 1.52	5.00 ± .06	6.96 ± .46	88.94 ± 7.48
P2 Bu2	1.88 ± .25	< 1.52	5.90 ± .37	4.56 ± .09	84.66 ± 2.14
P5 Ap	4.92 ± .11	< 1.52	6.20 ± .04	7.68 ± .00	49.20 ± 1.25
P5 Btg	2.92 ± .27	< 1.52	< 3.8	4.16 ± .18	43.42 ± 6.54
P5 Bg1	3.40 ± .51	< 1.52	6.20 ± .03	6.88 ± .48	42.52 ± 4.11
P5 Bg2	4.00 ± .10	< 1.52	< 3.8	9.28 ± .18	8.22 ± 1.50
P6 Ap	4.24 ± .60	2.16 ± .22	17.40 ± .04	3.29 ± .25	10.91 ± 4.89
P6 Bw	3.88 ± .01	< 1.52	5.40 ± .13	5.12 ± .22	51.10 ± 5.68
P6 Bg1	4.24 ± .32	< 1.52	9.10 ± .15	5.28 ± .06	46.88 ± 3.47
P6 Bg2	6.36 ± .45	1.68 ± .04	7.80 ± .06	8.64 ± .04	54.02 ± 2.33

Zinc ($\mu\text{g g}^{-1}$)

Muestra	Intercamb	Carbonato	Ox. Fe y Mn	Org. y sulf	Residual
P2 Ap	36.29 ± 4.53	0.54 ± .04	8.09 ± .14	2.29 ± .09	23.19 ± 1.47
P2 Bw	0.89 ± .07	< 0.14	2.86 ± .00	0.39 ± .02	83.16 ± 4.53
P2 Bu1	0.68 ± .02	< 0.14	2.22 ± .01	< 0.29	78.2 ± 1.09
P2 Bu2	0.66 ± .01	1.10 ± .01	2.08 ± .04	< 0.29	69.41 ± 3.21
P5 Ap	1.36 ± .07	0.53 ± .03	2.19 ± .59	< 0.29	46.32 ± 2.41
P5 Btg	0.70 ± .02	0.16 ± .04	1.25 ± .14	< 0.29	39.94 ± 2.03
P5 Bg1	0.48 ± .01	< 0.14	1.17 ± .01	< 0.29	42.75 ± 1.98
P5 Bg2	0.69 ± .02	< 0.14	1.12 ± .02	< 0.29	46.99 ± 2.87
P6 Ap	5.21 ± .08	4.26 ± .46	14.87 ± .63	5.00 ± .41	75.96 ± 4.87
P6 Bw	3.76 ± .03	1.27 ± .06	4.65 ± .14	0.86 ± .04	64.61 ± 4.70
P6 Bg1	1.02 ± .07	0.40 ± .03	2.49 ± .00	0.40 ± .00	64.34 ± 2.52
P6 Bg2	1.99 ± .05	0.72 ± .07	3.60 ± .03	0.80 ± .05	78.89 ± 3.64