

CADMIO, PLOMO, NÍQUEL Y ZINC EN SUELOS DEL PARQUE DESIERTO DE LOS LEONES

Cadmium, Lead, Nickel and Zinc in Soils from Desierto de los Leones Park

C. Castro Barrales¹, L. I. Bauer¹, A. Trinidad Santos¹ y R. Carrillo González^{1‡}

RESUMEN

En los bosques del Parque Recreativo y Cultural Desierto de los Leones (PRCDL) se ha observado declinación forestal durante las últimas décadas. Se cree que la exposición a los vientos contaminados procedentes de la Ciudad de México es una de las causas. El objetivo de esta investigación fue determinar el grado de contaminación por elementos potencialmente tóxicos (EPT) de los suelos de este parque. Se colectaron muestras de suelo de seis sitios del parque y de cuatro sitios del volcán Tláloc, como área testigo, por ser un área no contaminada. Se caracterizaron las propiedades físicas y químicas de los suelos y se determinaron las concentraciones de Cd, Ni, Pb y Zn extraíbles, con HCl 0.05 N y H₂SO₄ 0.025 N, y totales. Las concentraciones totales y extraíbles de los elementos analizados en los suelos del PRCDL son significativamente mayores que en el testigo. Los sitios con mayor concentración de EPT son Cementerio, Cruz Blanca y Cruz de Coloxtitlas, lugares con exposición directa a la fuente de contaminación (noreste y oeste). Las concentraciones de los EPT totales en el parque fueron mayores significativamente ($P \leq 0.001$) en los primeros 10 cm de profundidad para Pb total (55.24 mg kg⁻¹) y Zn total (213.56 mg kg⁻¹), en comparación con las encontradas en el Tláloc (14.88 mg kg⁻¹ de Pb y 70.84 mg kg⁻¹ de Zn). Las concentraciones no superaron los valores considerados normales para la Comunidad Europea y Canadá. Se encontró una alta correlación de Pb y Zn con la MO y CIC ($r^2 > 0.9$).

Palabras clave: *declinación forestal, metales pesados, suelos forestales.*

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

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

Recibido: noviembre de 2002. Aceptado: diciembre de 2006.

Publicado en Terra Latinoamericana 25: 95-103.

SUMMARY

In recent decades the forests of the "Desierto de los Leones" National Park have exhibited decline. It is believed that the exposure to the polluted air masses from Mexico City is one of the causes. The aim of this study was to determine the degree of pollution by potentially toxic elements (PTE) in the soil of the park. Soil samples from six places were collected in the Park and four places on the volcano Tlaloc, a non-polluted area used as a control area. Soil physical and chemical properties were characterized and concentrations of extractable Cd, Ni, Pb, and Zn were determined with HCl 0.05 N and H₂SO₄ 0.025 N and total Cd, Ni, Pb, and Zn were also determined. It was found that the total and extractable concentrations of the elements analyzed in samples from the Park were significantly higher than those from the volcano Tlaloc. The sites with highest concentration of PTE were "Cementerio", "Cruz Blanca", and "Cruz de Coloxtitlas" with direct northeastern and western exposure to the source of contamination. Total PTE concentrations in the Park were significantly higher ($P \leq 0.001$) in the upper 10 cm of depth for total Pb (55.24 mg kg⁻¹) and total Zn (213.56 mg kg⁻¹) compared with those observed in soil from the volcano Tlaloc (Pb 14.88 mg kg⁻¹ and Zn 70.84 mg kg⁻¹). The concentrations, however, did not exceed the values considered normal by the European Community and Canada. Pb and Zn correlated highly with OM and CEC ($r^2 > 0.9$).

Index words: *forest decline, heavy metals, forest soils.*

INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica en la Ciudad de México sigue en aumento, debido a los gases emitidos por la industria, los vehículos de motor y otras fuentes. Los procesos industriales y la utilización de combustibles fósiles liberan a la atmósfera sustancias contaminantes, como óxidos de carbono, nitrógeno (Cibrian, 1989), azufre y elementos potencialmente tóxicos (EPT), que pueden contaminar de forma drástica a la atmósfera. Los vientos

se encargan de distribuirlos, pero por último se depositan en cuerpos de agua, vegetación y suelo de las zonas aledañas a la ciudad, en dirección a los vientos dominantes. Aunque no se cuenta con datos de las cantidades de partículas que se depositan en la zona metropolitana, ni tampoco hasta qué distancia puede ocurrir el depósito, en teoría se espera que éste sea mayor en áreas cercanas. El Parque Recreativo y Cultural Desierto de los Leones (PRCDL) sufre graves daños, aparentemente por los vientos contaminados de la Ciudad de México (Alvarado *et al.*, 1993; Castro *et al.*, 1995, 1997). A fines de la década de los sesenta, se empezó a observar que los patrones de mortalidad de coníferas en el PRCDL no correspondían a los agentes de destrucción ya conocidos y sufridos por los árboles del parque en forma natural (Vázquez, 1988; Cibrian, 1989). En la década de 1980 se detectaron daños en la vegetación que se denominaron declinación forestal. Ésta involucra un deterioro gradual de la condición y vigor de los árboles que los conduce a la muerte (Ciesla, 1989). Los síntomas más comunes son: reducción del crecimiento, degeneración del sistema radical, presencia de clorosis en el follaje, reducción de las reservas fotosintéticas, mortalidad de brotes y ramas, e incremento de la incidencia de insectos y patógenos. En un área contaminada estos síntomas se pueden presentar en forma secuencial o simultánea; los contaminantes atmosféricos pueden causar daño de este tipo a los bosques (van Voris *et al.*, 1980; Pouyat y McDonnell, 1991), por lo que dentro de los posibles factores causales de este fenómeno está la contaminación atmosférica (Cibrian, 1989; Breckle y Kahle, 1992; Alvarado *et al.*, 1993).

Con el fin de obtener información de los factores que más contribuyen a este fenómeno, se han realizado investigaciones sobre las causas de la declinación en especies del PRCDL, como *Abies religiosa* (Cibrian, 1989), y sobre la distribución de la concentración de Pb en el suelo (Castro *et al.*, 1995). Sin embargo, el problema de la declinación no es consistente en toda el área del parque y las concentraciones de los elementos, en los reportes publicados, son variables y no hay consistencia entre el daño observado y la concentración de Pb. Watmough y Hutchinson (1999) relacionaron las concentraciones de Cu, Ni, Cr, Pb, Cd y Zn en los anillos de crecimiento de árboles con las concentraciones de estos elementos en los 5 cm superficiales del suelo y encontraron que se asociaron con bajos valores de pH

del suelo. Los elementos con mayor concentración total fueron: Pb (26-205 mg kg⁻¹) y Cd (0.39-1.34 mg kg⁻¹). La concentración de Pb y Cd aumentó en los anillos a partir de 1960, lo que refleja el incremento de la urbanización y los vehículos en la Ciudad de México. Además, se ha probado que otros factores han tenido gran influencia sobre la vitalidad del bosque, como es el efecto de oxidantes presentes en la atmósfera y los incendios forestales, los cuales pueden confundirse con las consecuencias principales de los contaminantes. Esto ha hecho que exista incertidumbre sobre la presencia de los EPT en el suelo, razón por la cual se planteó este trabajo, cuyo objetivo fue generar información sobre el grado de contaminación de los suelos, partiendo de la hipótesis que los EPT se acumulan en la capa superficial del suelo y que están en forma extraíble.

MATERIALES Y MÉTODOS

A partir de las observaciones realizadas durante los recorridos de campo y el uso de mapas topográficos del área, se seleccionaron seis sitios de muestreo en el PRCDL y cuatro en el volcán Tláloc. Esta última área se encuentra fuera de los vientos contaminados y tiene características de vegetación, suelo y altitud semejantes a las del PRCDL, por lo que se usó como testigo. En el PRCDL, el lecho lo conforman rocas ígneas volcánicas y materiales detríticos originados *in situ* (Sosa, 1952); los basaltos y basaltos andesíticos son comunes en las formaciones geológicas del centro de México (Huizar Alvarez *et al.*, 1997). En el Tláloc dominan las tobas básicas, los basaltos, las brechas volcánicas básicas y el vidrio volcánico.

Los sitios de muestreo del PRCDL y el volcán Tláloc se distribuyeron en diferentes altitudes; en el caso del parque, se abarcaron áreas con menor daño, como los sitios llamados Hongos y Caballete (HC) y Rinconada del Tronconal (RT), y sitios más afectados, como Cruz de Coloxtitlas (CC), Cementerio (C) y Cruz Blanca (CB), los cuales se convirtieron en cementerios de árboles.

De febrero a marzo de 2001, se excavaron perfiles pedológicos en cada uno de los sitios y se muestrearon por horizontes. El muestreo para la determinación intensiva de EPT se hizo en forma radial, considerando como centro el perfil; se tomaron ocho submuestras orientadas como sigue N, NE, E, SE, S, SO, O y NO, que se ubicaron a una distancia de 20 m del perfil,

se colectó suelo a cuatro profundidades: 0-5, 5-10, 10-15 y 15-20 cm. De cada profundidad se obtuvo una muestra compuesta (Gilbert, 1987).

En cada sitio se colectaron hojas del último crecimiento de los árboles, siguiendo la misma secuencia de orientación que para el muestreo de suelos. El tejido vegetal se lavó con detergente libre de fosfatos y se enjuagó tres veces con agua destilada y desionizada; se secó a 65 °C hasta peso constante, en una estufa de aire forzado, y se molió en un molino de acero inoxidable. A las muestras de suelo secas y tamizadas (en malla de 2 mm) se les determinó: materia orgánica (MO), por el procedimiento de Walkley y Black (Nelson y Sommers, 1982); nitrógeno total (Nt) (Bremner y Mulvaney, 1982); fósforo disponible, extraído con ácidos sulfúrico y clorhídrico diluidos (Sommers *et al.*, 1982); pH (relación agua:suelo, 1:2); capacidad de intercambio catiónico (CIC), por el método de acetato de amonio (Rowell, 1996); densidad aparente y real (ρ_A y ρ_R) (Rowell, 1996) y la carta Munsell (1998) para color.

Los EPT totales se analizaron por el método propuesto por Bradford *et al.* (1975), modificado a 6 h de digestión; los EPT extraíbles se determinaron por el procedimiento de Baker y Amacher (1982). El tejido vegetal se mineralizó por digestión húmeda con $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$, relación 1:1, con el método descrito por Jones y Case (1990). La cuantificación de EPT se hizo en un equipo de espectrofotometría de plasma (ICP-OES, Varian). Los límites de detección (3σ) fueron: Cd (0.002 mg L^{-1}), Pb (0.013 mg L^{-1}), Ni (0.008 mg L^{-1}) y Zn (0.005 mg L^{-1}) (HMSO, 1996).

Para el análisis de datos de EPT se usó el análisis de varianza, la comparación de medias de Tukey

($\alpha = 0.05$) y se determinó el coeficiente de correlación de Pearson de la MO y la CIC con las concentraciones totales y extraíbles de los EPT (SAS Institute, 1990). Se consideraron los siguientes factores: regiones (R), sitios (S), profundidades (P) y las interacciones región por profundidad (R x P) y sitio por profundidad (S x P).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En ambas regiones, PRCDL y Tláloc, la altitud varía de 3100 a 3757 m; en el PRCDL las pendientes son pronunciadas (de 9 a 60%). En general, los suelos son de origen volcánico y predominan los Andisoles e Inceptisoles, según la clasificación de la USDA (Soil Survey Staff, 2003). Los sitios de muestreo en el parque se distribuyeron en diferentes altitudes y abarcaron áreas con baja mortalidad de árboles, como el caso de los sitios llamados Hongos y Caballete y Rinconada del Tronconal, y áreas con alta mortalidad de árboles como los sitios Cruz de Coloxtitlas, Cementerio y Cruz Blanca, algunos han sufrido incendios (Cuadro 1).

Los Andisoles del PRCDL son jóvenes, poco desarrollados y poco profundos, dado que el horizonte B no se encuentra presente o es incipiente, sólo se observaron horizontes A y C. Predominan las texturas migajón arenosa y franca (Cuadro 2). La densidad aparente y la densidad real indican que el espacio poroso varía de 50 a 60%.

Los suelos del PRCDL tienen un carácter moderadamente ácido, ya que el pH varía de 4.7 a 5.9, lo que podría favorecer la presencia de los EPT en la solución del suelo, en contraste con los valores de 5.6 a 5.9, reportados por Castro *et al.* (1995).

Cuadro 1. Descripción de los sitios muestreados en el Parque Recreativo y Cultural Desierto de los Leones y el Tláloc.

No.	Sitio [†]	Coordenadas		Altitud	Exposición	Pendiente	Suelo	Vegetación
				m		%		
1	CB	19°18'45"	99°19'36"	3160	Noreste	30	Andisol	<i>Abies</i>
2	HC	19°16'58"	99°19'33"	3640	Este	60	Inceptisol	<i>Abies</i>
3	RT	19°16'15"	99°19'74"	3530	Este	50	Andisol	<i>Abies</i>
4	CSM	19°16'	99°19'	3757	Noroeste	35	Inceptisol	<i>Pinus</i>
5	CC	19°16'55"	99°18'42"	3463	Oeste	45	Inceptisol	<i>Abies</i>
6	C	19°18'08"	99°18'28"	3203	Oeste	50	Inceptisol	<i>Abies</i>
7	T1	19°24'95"	98°44'41"	3720	Noroeste	9	Inceptisol	<i>Pinus</i>
8	T2	19°25'85"	98°44'82"	3465	Sureste	16	Inceptisol	<i>Abies</i>
9	T3	19°27'67"	98°44'73"	3300	Noroeste	48	Inceptisol	<i>Abies</i>
10	T4	19°27'27"	98°46'65"	3100	Noroeste	60	Andisol	<i>Quercus</i>

[†] CB = Cruz Blanca, HC = Hongos y Caballete, RT = Rinconada del Tronconal, CSM = Cerro de San Miguel, CC = Cruz de Coloxtitlas, C = Cementerio, T1, 2, 3 y 4 = Tláloc 1, 2, 3 y 4.

Cuadro 2. Características físicas y químicas del horizonte A de los suelos del Parque Recreativo y Cultural Desierto de los Leones y del volcán Tláloc.

Región	Sitio [†]	pH [‡]	MO - - - - % - - - -	Nt - - - -	P mg kg ⁻¹	CIC cmol _c kg ⁻¹	Textura	ρA - - - g cm ⁻³ - - -	ρR
Desierto de los Leones	CB	5.40	11.9	0.70	7.80	36.70	Franco	0.67	1.68
	HC	4.75	6.42	0.32	2.79	22.30	M a.	0.76	1.77
	RT	4.90	13.7	0.68	2.91	31.70	Franco	0.74	1.92
	CSM	4.85	10.9	0.54	3.29	21.60	Franco	0.91	2.35
	CC	5.30	10.3	0.51	1.09	23.70	Franco	0.81	2.17
	C	5.95	15.9	0.80	3.98	39.70	M a.	0.83	2.17
Tláloc	T 1	5.40	5.71	0.28	1.17	20.70	M a.	0.94	2.31
	T 2	5.85	2.38	0.12	2.57	21.00	Franco	1.11	2.40
	T 3	5.75	4.86	0.24	4.31	30.40	M ar.	0.94	2.31
	T 4	5.65	4.29	0.21	-	28.30	M ar.	0.92	2.39

[†] CB = Cruz Blanca, HC = Hongos y Caballete, RT = Rinconada del Tronconal, CSM = Cerro de San Miguel, CC = Cruz de Coloxtitlas, C = Cementerio, T1, 2, 3 y 4 = Tláloc 1, 2, 3 y 4. [‡] Relación agua:suelo. 1:2, MO = materia orgánica, Nt = nitrógeno total, P = fósforo, CIC = capacidad de intercambio catiónico, ρA = densidad aparente, ρR = densidad real. M a. = migajón arenoso. M ar. = migajón arcilloso.

La MO de los suelos presenta valores altos y medios (15.9 y 6.42%, respectivamente), la CIC es alta (21.6 y 39.7 cmol_c kg⁻¹) (Cuadro 2). La concentración de Nt es alta, por el contrario la de P es muy baja, debido a la acidez del suelo y a las altas concentraciones de Fe y Al (Castro *et al.*, 1995). Con base en la descripción anterior, los suelos del PRCDL tienen características físicas y químicas, en su mayoría, apropiadas para el desarrollo y la regeneración del bosque; sin embargo, la acidez podría afectar la disponibilidad Ca, Mg y P, además del incremento de la actividad del Al (Durka *et al.*, 2002).

Los suelos del Tláloc también son derivados de cenizas volcánicas y se clasifican como Andisoles (altitud < 3400 m), son jóvenes, poco desarrollados, con texturas franca y migajón arcillosa; e Inceptisoles (altitud > 3465 m), profundos y desarrollados, con un horizonte B y predominancia de textura migajón arcillosa, tienen pH entre 5.3 a 6.2, considerado ácido. Presentan contenidos medios de MO (Fassbender y Bornemisza, 1987) y tienen una CIC de media a alta (Cottenie 1980); los suelos arriba de 3400 m son más ácidos y con mayor CIC.

La concentración de EPT en los horizontes superficiales del PRCDL es mayor que en el Tláloc. En los perfiles del PRCDL, por sitios, la distribución de las concentraciones de Cd y Ni totales son uniformes, pero las concentraciones totales de Pb y Zn disminuyen, con respecto a la profundidad del suelo. En el Tláloc, los perfiles son más profundos. La tendencia observada fue parecida, pero no siempre consistente, pues en algunos casos hubo un incremento ligero en la concentración de

Pb en los horizontes A/C, B/C y C (Cuadro 3). Es posible que la fuente de los elementos en ambas regiones no sea causada por la actividad humana, pues la concentración observada en este tipo de rocas volcánicas es: 0-14 mg kg⁻¹ de Pb, 47-71 mg kg⁻¹ de Zn y 13-148 mg kg⁻¹ de Ni.

Se observó mayor concentración de EPT en el PRCDL que en el Tláloc. Los sitios con mayor concentración de Zn, Pb y Ni del PRCDL fueron Cementerio, Cruz Blanca y Cruz de Coloxtitlas, para Cd y Ni, que son los sitios donde ha habido alta proporción de árboles muertos. La mayor concentración de Pb se observó en Rinconada del Tronconal, San Miguel y Cruz de Coloxtitlas (Cuadro 3), pero no se puede afirmar que se deba a la exposición a contaminantes.

Los EPT pueden ser acarreados por el viento, depositados y acumulados en la superficie del suelo, por lo cual algunos investigadores (Moyses y Fernández, 1987; Castro *et al.*, 1995, 1997; Watmough y Hutchinson, 1999) recolectaron muestras cada 2, 5, 10, 15 y 20 cm de profundidad, con el fin de conocer su distribución vertical en el perfil. Como ya se describió, el muestreo se realizó a cada 5 cm de profundidad, hasta llegar a 20 cm. No hubo diferencias de Cd y Ni entre las muestras recolectadas cada 5 cm, pero el Pb fue mayor en los primeros 10 cm del suelo y disminuyó en casi 50% en los últimos 10 cm.

Pese a las bajas concentraciones, se observaron diferencias entre ambas regiones; en el PRCDL se registraron concentraciones de Cd extraíble en un intervalo de 0.05- 0.24 mg kg⁻¹; en contraste, en el Tláloc

Cuadro 3. Concentraciones promedio de elementos potencialmente tóxicos (EPT) totales y extraíbles en los perfiles del Parque Recreativo y Cultural Desierto de los Leones (PRCDL) y del Tláloc (T).

Región	Sitio [†]	Hori- zonte	Profundidad cm	Cd		Ni		Pb		Zn	
				Total	Ext.	Total	Ext.	Total	Ext.	Total	Ext.
mg kg ⁻¹											
PRCDL	CB 3 160	O	0 – 1	3	0.15	23	0.39	48.3	0.2	225.4	40.78
		A	1 – 13	3.5	0.15	22.4	0.31	41.3	0.28	189.6	16.09
		C	13 – 74	3.5	0.05	24.7	tz	8.21	0.36	74.1	6.57
	HC 3 640	A1	0 – 9	2.2	0.03	15.3	0.41	9.2	0.02	15.5	1.45
		A2	9 – 20	1.8	tz	8.98	0.15	0.7	0.35	9.9	tz
		A/C	20 – 45	1.4	tz	5.91	0.04	2.5	0.09	10.7	tz
		CR	45 – 65	2	tz	6.4	0.06	1.85	0.13	37	tz
	RT 3 530	A1	0 – 31	2.8	tz	18.7	0.33	9.3	0.3	74.6	6.24
		A/C	31 – 81	2.7	tz	18	0.44	11.2	0.21	61.8	tz
		C	> 81	2.8	tz	15.4	0.08	4.3	0.02	16.3	tz
	CSM 3 757	A1	0 – 20	2.6	tz	27.6	0.79	19.5	tz	92	5.45
		A2	20 – 30	2.7	tz	23.5	0.48	7.9	tz	57.7	tz
		CR	30 – 32	2.1	tz	5.4	tz	6.2	0.12	21.6	tz
	CC 3 463	A	0 – 25	3.2	0.05	34.5	0.35	10.6	0.17	52.1	tz
		A/C	25 – 52	2.9	0.06	33.6	0.49	8.3	0.19	57	tz
		CR	52 – 81	2.2	0.04	21.5	tz	8.3	0.23	39.9	tz
	C 2 203	O	0 – 2	2.1	0.24	14.8	0.28	177.6	0.42	508.7	54.77
		A1	2 – 7	2.2	0.13	23.2	tz	158.4	0.21	453.7	16.96
A2		7 – 25	3.5	0.08	29.9	0.07	15.9	0.24	95.8	1.16	
C		> 25	4.1	0.05	29.2	tz	8.2	0.21	53.6	tz	
Tláloc	T1 3 720	O	0 – 5	1.3	0.02	7.8	0.29	24.3	0.2	76.5	17
		A1	5 – 30	1.3	tz	8.2	0.14	5.3	0.16	19.7	tz
		A2	30 – 54	1.5	tz	7.3	0.1	8	0.4	5.5	tz
		B	54 – 80	1.7	tz	8.8	0.1	5	0.16	7.3	tz
		C	80 – 100	1.2	tz	4.3	0.04	8.3	0.4	7	tz
	T2 3 465	A1	0 – 32	2.3	tz	9.4	0.02	12	0.32	62.1	3.23
		A2	32 – 65	2	tz	8.8	0.05	9	0.41	19.3	1.91
		A/C	65 – 90	1.5	tz	6.9	tz	10.5	0.31	3.7	tz
		C	> 90	1	tz	1.3	0.08	7.3	0.24	2.7	1.4
	T3 3 300	A1	0 – 18	2.2	0.03	11.9	0.09	9.2	0.29	68	4.71
		A2	18 – 58	2.6	tz	13.3	tz	6.7	0.19	50.3	0.81
		AB	58 – 89	2.3	tz	19	0.09	6.8	0.14	53.9	2.5
		BC	89 – 130	3	tz	16.3	0.01	10.3	0.29	44.3	5.16
	T4 3 100	A1	0 – 10	2.5	tz	16	0.03	10.3	0.06	48.4	3.71
		A2	10 – 38	4	tz	25.8	tz	9.8	0.31	30.5	1.59
		AB	38 – 70	5.4	tz	28.9	tz	10.2	0.15	50	2.83
		BC	70 – 135	6	tz	32.4	0.06	10.7	0.18	60.9	4.84
		C	> 135	4.3	tz	24	0.03	8.6	tz	60.1	7.67

[†] CB = Cruz Blanca, HC = Hongos y Caballete, RT = Rinconada del Tronconal, CSM = Cerro de San Miguel, CC = Cruz de Coloxtitlas, C = Cementerio, T1, T2, T3, T4 = sitios Tláloc, Ext. = extraíble, tz = trazas.

sólo se registraron trazas de este elemento. Además, en los sitios de cada región existen diferencias con respecto a la profundidad y para cada elemento, pero estos valores están cerca del límite de detección.

La distribución del Pb y el Zn dentro del suelo depende de la profundidad, pues es común que sus concentraciones disminuyan verticalmente. La concentración total de Zn se encuentra dentro de valores considerados normales en suelo por la Comunidad Europea y Canadá (Visser, 1994).

Las concentraciones individuales de los EPT extraíbles son bajas, lo cual podría tener poco o nulo efecto sobre la regeneración del bosque o en la salud de los árboles. En algunos casos, por ejemplo, la concentración de Cd podría estimular el crecimiento radical de los árboles, como lo han reportado Arduini *et al.* (1994). Sólo la concentración de Zn extraíble fue mayor de 15 mg kg⁻¹, en todos los casos. Los porcentajes de EPT extraíbles, respecto al total en cada sitio, usados como índices de disponibilidad, fueron menores de 1% para Cd, Ni y Pb; sólo en el caso del Zn fue de 7 a 17%. Los otros sitios muestreados presentan comportamientos semejantes, aunque, por ejemplo, en Hongos y Caballete y Rinconada del Tronconal los árboles se observan en mejores condiciones, aun cuando se encontraron altas concentraciones de Pb en los 10 cm superficiales del suelo, con respecto a los otros sitios muestreados. Es posible la acumulación de este elemento a través del tiempo, pero la concentración reportada en la roca madre de la zona (47 a 71 mg kg⁻¹) es alta, por lo que no es posible descartar el origen litógeno.

El pH es determinante para que los cationes metálicos presentes en el suelo reaccionen, debido a que la acidificación incrementa la movilidad de algunos elementos (Hagemeyer *et al.*, 1994); por el bajo pH se recomienda estudiar las fuentes de acidez no naturales en la zona. Es posible que la concentración de fósforo en el suelo también se afecte, ya que este elemento es atrapado por óxidos y hidróxidos de Al y Fe, con los cuales forman uniones estables y se reduce el fósforo extraíble. Esto sugiere que el estado nutricional de los árboles y el aporte de nutrimentos debe evaluarse.

El análisis de varianza permitió observar que si hay diferencias ($P \leq 0.001$) en las concentraciones observadas entre regiones (R) y sitios (S), en todos los casos, con excepción del Zn. Respecto a la profundidad se observaron diferencias en Pb y Zn totales. El comportamiento de los EPT extraíbles fue distinto, pues

hubo diferencias significativas para el caso de Cd y Zn, en estas mismas interacciones. La interacción de la región con la profundidad (R x P) y de sitio con la profundidad (S x P) fue significativa para Pb y Zn totales y Cd y Zn extraíbles; sin embargo, no hubo diferencia en las concentraciones de Cd y Ni totales, ni en Pb extraíble, en función de la profundidad, lo que implica que la distribución vertical no es consistente entre sitios, ni regiones.

El coeficiente de correlación entre la MO, la CIC y los EPT totales fue mayor de 90%, en la mayoría de los casos. En contraste, Watmough y Hutchinson (1999) encontraron correlaciones muy bajas entre estas mismas variables (MO con Zn, Pb y Cd, con $r^2 = 0.48, 0.25$ y 0.14 , respectivamente). La alta correlación de MO con Pb ($r^2 = 0.91$) y Zn ($r^2 = 0.90$) y de la CIC con Pb ($r^2 = 0.95$) y Zn ($r^2 = 0.95$) sugiere que la MO es importante en la retención de ambos elementos, como se ha señalado para otras condiciones (Moyses y Fernández, 1987; Helmke y Naidu, 1996). La baja correlación con la CIC probablemente se explique porque, en términos generales, los EPT no son retenidos en forma significativa a través del intercambio catiónico (McBride, 1989).

En tejido de pino (*Pinus ayacahuite*) y oyamel (*Abies religiosa*) se encontraron bajas concentraciones de EPT. La concentración de Cd fue menor de 0.25 mg kg⁻¹ en todos los sitios; las de Pb y Ni también fueron menores de 1.0 mg kg⁻¹, con excepción del sitio CSM, donde se encontraron 3 y 1.6 mg kg⁻¹, respectivamente. La concentración de Zn varió de 69 a 123 mg kg⁻¹, con base en peso seco (Figuras 1i, ii y iii). Estas concentraciones de Zn fueron ligeramente mayores que las reportadas como normales en otras especies de pino: *P. ponderosa* (53 mg kg⁻¹), *P. elliottil* (20-100 mg kg⁻¹) (Jones *et al.*, 1991). Las concentraciones, en general, fueron menores que las encontradas por Castro *et al.* (1997) y Watmough y Hutchinson (1999) en follaje y anillos de crecimiento. En las muestras procedentes del Tlálloc, las concentraciones de Cd, Ni y Pb fueron muy bajas, sólo se encontraron valores cuantificables de Zn (Figura 1iv). Los factores de bioacumulación calculados, con base en la concentración total de los EPT en los suelos del PRCDL, fueron menores de 2% para Ni y Pb; para Cd, sólo en el sitio CC llegó a 9% en pino y en Zn de 11 a 13%. En las muestras recolectadas en el Tlálloc, los FBC variaron de 24 a 32%. Con base en estos datos de

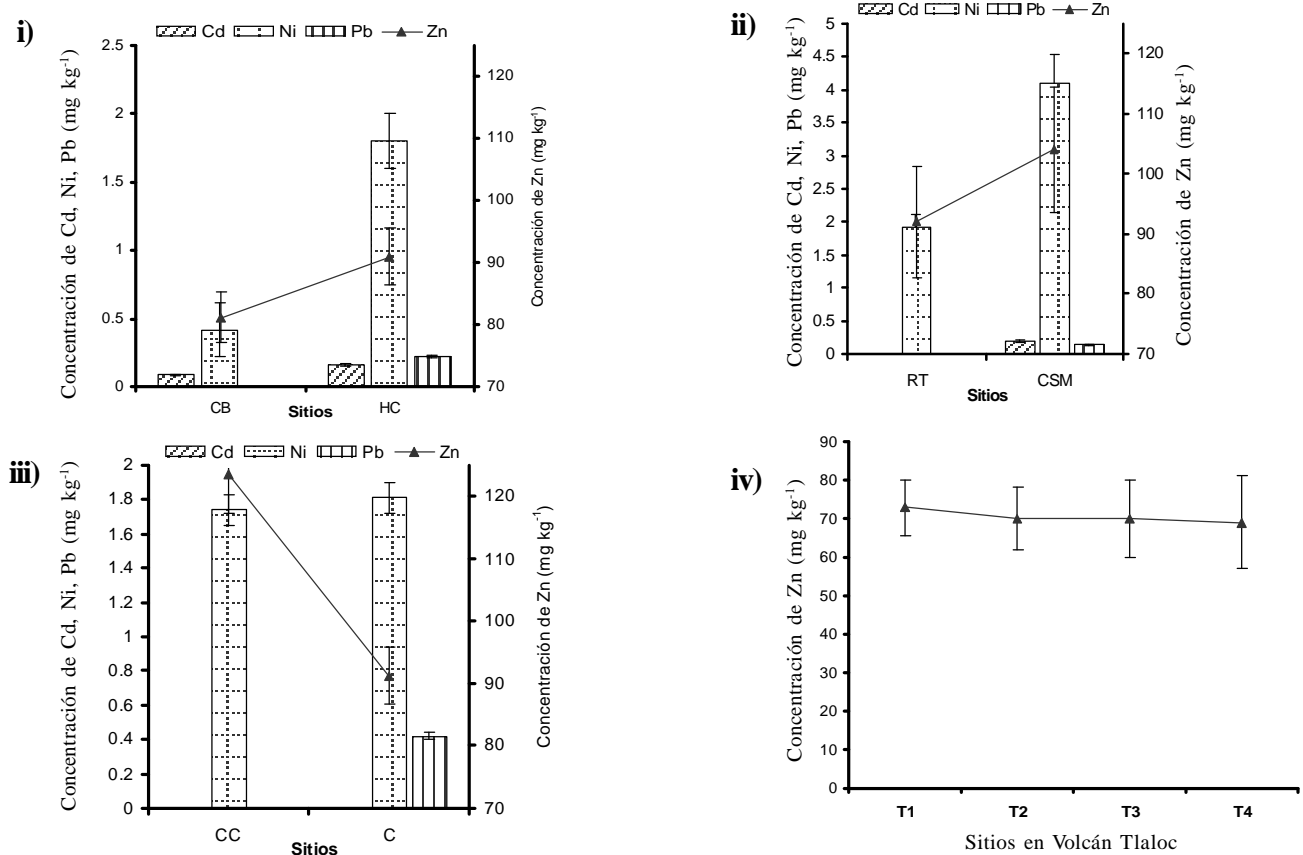


Figura 1. Concentración de Cd, Ni, Pb y Zn en tejido vegetal en muestras de PRCDL y en el volcán Tlaloc. i) CB = Cruz Blanca y HC = Hongos y Caballete, (*Abies religiosa*); ii) RT = Rinconada del Tronconal (*A. religiosa*) y CSM = Cerro de San Miguel (*Pinus ayacahuite*), iii) CC = Cruz de Coloxtitlas (*P. ayacahuite*), y C = Cementerio (*A. religiosa*) y iv) volcán Tlaloc1, 2, 3 y 4.

transferencias, no se puede decir que los EPT analizados actualmente estén causando toxicidad en los árboles.

CONCLUSIONES

- Los sitios con mayor concentración de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) en el Parque Recreativo y Cultural Desierto de los Leones (PRCDL) son Cementerio y Cruz de Coloxtitlas, que son los de mayor mortalidad de árboles. La mayor concentración de Pb y Zn total fue en Cementerio y Cruz Blanca, ubicados a altitudes de 3100 y 3200 m. En la región testigo, el volcán Tlaloc, las concentraciones de los ETP fueron bajas e incluso con valores traza.

- El análisis de varianza mostró diferencias significativas entre las regiones en los primeros 10 cm de profundidad para Pb y Zn, lo que demuestra que la movilidad de los EPT dentro del suelo es determinante para su distribución vertical: Cd y Ni no variaron mucho en los 20 cm superficiales.

- Se observaron diferencias altamente significativas en las concentraciones de Pb y Zn entre regiones y entre sitios, pero no entre profundidades.

- Se encontraron correlaciones altamente significativas entre materia orgánica, Pb y Zn, con $r^2 = 0.91$ y 0.90 , respectivamente.

- Por último, la CIC presentó correlación altamente significativa con Pb ($r^2 = 0.95$) y Zn ($r^2 = 0.95$). Las concentraciones de EPT en hojas de pino y oyamel fueron bajas y, en apariencia, no hubo acumulación en hojas de este periodo de crecimiento.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado a través del Proyecto 29007B de CONACyT. El primer autor agradece la beca otorgada por el CONACyT durante la realización de este trabajo.

LITERATURA CITADA

- Alvarado R., D., L. I. Bauer, and J. Galindo A. 1993. Decline of sacred fir (*Abies religiosa*) in forest park south of Mexico City. *Environ. Pollut.* 80: 115-121.
- Arduini, I. A., D. L. Godbold, and A. Onnis. 1994. Cadmium and copper change root growth and morphology of *Pinus pinea* and *Pinus pinaster* seedlings. *Physiol. Plant.* 92: 675-680.
- Baker, D. E. and M. C. Amacher. 1982. Double-acid extraction. pp. 334. *In:* A. L. Page, R. H. Miller, and D. R. Keeney (eds.). *Methods of soil analysis. Part 2.* 2nd ed. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.
- Bradford, G. R., A. L. Page, J. L. Lund, and W. Olmstead. 1975. Trace element concentration of sewage treatment plant effluents and sludge: their interactions with soil and uptake by plants. *J. Environ. Qual.* 4: 123-127.
- Breckle, S.-W. and H. Kahle. 1992. Effects of toxic heavy metals (Cd, Pb) on growth and mineral nutrition of beech (*Fagus sylvatica* L.). *Plant Ecol.* 101: 43-53.
- Bremner, J. M. and C. S. Mulvaney. 1982. Total nitrogen. pp. 595-624. *In:* A. L. Page, R. H. Miller, and D. R. Keeney. *Methods of soil analysis. Part 2.* 2nd ed. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.
- Castro S., J. M., V. González K. y T. Hernández T. 1995. Metales pesados en los suelos del Desierto de los Leones, Distrito Federal. *Ciencia Forestal en México* 20: 101-112.
- Castro S., J. M., V. González K. y T. Hernández T. 1997. Contenido de metales pesados en algunos suelos y vegetación del Desierto de los Leones. *Ciencia Forestal en México* 22: 109-127.
- Cibrian T., D. 1989. Air pollution and forest decline near Mexico City. *Environ. Monitoring Assess.* 12: 49-58.
- Ciesla, W. M. 1989. Aerial photos for assessment on forest decline. A multinational overview. *J. For.* 87: 37-41.
- Cottenie, A. 1980. Soil and plant testing as a basis of fertilizer recommendation. *Soil Bulletin* 38. Food and Agriculture Organization. Rome, Italy.
- Durka, W., E.-D. Schulze, G. Gebauer, and S. Voerkeliust. 2002. Effects of forest decline on uptake and leaching of deposited nitrate determined from ¹⁵N and ¹⁸O measurements. *Nature* 372: 765-767.
- Fassbender, W. E. y E. B. Bornemisza. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Centro Regional de Ayuda Técnica. San José, Costa Rica.
- Gawel, J. E., B. A. Ahner, A. J. Friedland, and F. M. M. Morel. 2002. Role for heavy metals in forest decline indicated by phytochelatin measurements. *Nature* 381: 64-65.
- Gilbert, R. O. 1987. *Statistical methods for environmental pollution monitoring.* Van Nostrand Reinhold. New York, NY, USA.
- Gupta, S., A. Blatler, and H. Hi. 1988. Concentration of ionic copper in soil solution. *Int. J. Environ. Anal. Chem.* 34: 45-50.
- Hagemeyer, J., T. Heppel, and S.-W. Breckle. 1994. Effects of Cd and Zn on the development of annual xylem rings of young Norway spruce (*Picea abies*) plants. *Trees* 8: 223-227.
- Helmke, P. A. and R. Naidu. 1996. Fate of contaminant in the soil environment: metal contaminants. pp. 69-93. *In:* R. Naidu, R. S. Kookana, D. P. Oliver, S. Rogers, and M. J. McLaughlin (eds.). *Contaminants and the soil environment in the Australasia-Pacific region.* Kluwer. The Netherlands.
- HMSO (Her Majesty's Stationery Office). 1996. *Inductively coupled plasma spectrometry methods. Methods for examination of waters and associated materials.* HMSO. London, UK.
- Huizar Alvarez, R., J. Campos, J. Lemo, O. Delgado, and A. Huidobro. 1997. Geophysical and hydrogeological characterization of the sub-basins of Apan and Tochac. (Mexico Basin). *Geofisica Internacional* 36: 1-17.
- Jones, J. B. and V. W. Case. 1990. Sampling, handling and analysing plant tissue samples. pp. 386-428. *In:* R. L. Westerman, J. V. Baird, N. W. Cristensen, P. E. Fixen, and D. A. Whitney. 1990. *Soil testing and plant analysis. Book Series 3.* Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.
- Jones, J. B. Jr., B. Wolf, and H. A. Mills. 1991. *Plant analysis handbook. Methods of plant analyses and interpretation.* Micro-Macro Publishing. Athens, GA, USA.
- McBride, M. B. 1989. Reactions controlling heavy metal solubility in soils. *Adv. Soil Sci.* 10: 1-56.
- Moyse, W. D. and I. Fernandez J. 1987. Trace metals in the forest floor at saddleback mountain, Maine in relation to aspect, elevation, and cover type. *Water Air Soil Pollut.* 34: 385-397.
- Munsell Color Chart. 1998. *Munsell soil color charts.* Gretag Macbeth. New Windsor, NY, USA.
- Nelson, D. W. and L. E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. pp. 539-579. *In:* A. L. Page, R. H. Miller, and D. R. Keeney (eds.). *Methods of soil analysis. Part 2.* 2nd ed. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.
- Pouyat, R. V. and M. J. McDonnell. 1991. Heavy metals accumulation in forest soils along an urban rural gradient in Southeastern New York, USA. *Water Air Soil Pollut.* 57-58: 797-807.
- Rowell, D. L. 1996. *Soil Science: methods and applications.* Longman Group. London, UK.
- SAS Institute. 1990. *SAS user's guide: statistics. Release 6.* SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Soil Survey Staff. 2003. *Keys to soil taxonomy.* United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. Washington, DC, USA.
- Sommers, L. E., R. H. Miller, and D. R. Keeney. 1982. Phosphorus. pp. 403-430. *In:* A. L. Page, R. H. Miller, and D. R. Keeney (eds.). *Methods of soil analysis. Part 2.* 2nd ed. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.
- Sosa, H. A. 1952. *Parque Nacional Desierto de los Leones.* Secretaría de Agricultura y Ganadería. Gobierno Federal. D. F. México.
- Van Voris, P., R. V. O'Neill, W. R. Emmanuel, and H. H. Shugart Jr. 1980. Functional complexity and ecosystem stability. *Ecology* 61: 1352-1360.
- Vázquez S., J. 1988. *Los tratamientos silvícolas del Desierto de los Leones. Sus fundamentos.* Comisión para el Desarrollo Rural (COCODER). Departamento del D. F. México, D.F.
- Visser, W. J. F. 1994. *Contaminated land policies in some industrialized countries.* 2nd ed. Technical Soil Protection Committee. The Hague, The Netherlands.

Walbridge, M. R., C. J. Richardson, and W. T. Swank. 1991. Vertical distribution of biological and geochemical phosphorus subcycles in two southern Appalachian forest soils. *Biogeochemistry* 13: 61-85.

Watmough, S. A. and T. C. Hutchinson. 1999. Change in the dendrochemistry of sacred fir close to Mexico City over the past 100 years. *Environ. Pollut.* 104: 79-88.