

RELACIONES ENTRE CONTENIDOS TOTALES DE Zn, Pb, Cu Y Cd EN SUELOS Y PLANTAS

A. M. Moreno, L. Pérez y J. González

Departamento de Edafología. Facultad de Farmacia. Universidad Complutense de Madrid

RESUMEN

Se han analizado los contenidos de metales pesados en suelos agrícolas y plantas del suroeste de Madrid. El área de estudio se dividió en cuatro zonas de diferente actividad industrial y posibles focos de emisión, que condicionaron la distribución de muestras.

Las cantidades de Cu, Zn, Pb y Cd en los suelos de las distintas zonas son diferentes. En general, los valores más elevados suelen reflejar una mayor actividad industrial. Los elementos Pb y Zn muestran las concentraciones más altas, siendo las de Cd muy bajas. Los contenidos de Zn y Cu se relacionan de forma significativa con los parámetros edáficos (Zn-materia orgánica, Zn-pH, Zn-CaCO₃, Zn-fracción arcilla y Cu-CaCO₃, Cu-fracción arcilla), no existiendo correlación para Cd y Pb. No se ha encontrado correlación significativa entre los contenidos de metales en suelos y plantas. La secuencia de acumulación de los metales estudiados en plantas con respecto al suelo es: Cd > Zn > Cu.

Palabras clave: Metales pesados. Suelos. Plantas. Relaciones.

SUMMARY

RELATIONSHIPS BETWEEN TOTAL CONTENTS OF Zn, Pb, Cu AND Cd IN SOILS AND PLANTS

Heavy metal contents in agricultural soils and plants in the southwest of Madrid were analyzed. In this study, it was necessary to divide the area into four parts of different sampling, distribution according to industrial activity.

The quantities of Cu, Zn, Pb and Cd metals found in these soils are different in each zone. In general, higher metal levels found are a reflection of industry levels. Lead and zinc show the highest concentrations. A close correlation between Zn and Cu content with soil parameters (Zn-organic matter, Zn-pH, Zn-CaCO₃, Zn-clay fraction and Cu-CaCO₃, Cu-clay fraction) is found. Total Pb and Cd are not related to soil parameters. Heavy metal contents of plants are not correlated with soil heavy metal concentration. The sequence of heavy metal accumulation in plants in relationship with soil is: Cd > Zn > Cu.

Key words: Heavy metals. Soils. Plants. Relationship.

INTRODUCCION

La vía primaria de entrada de metales pesados en el hombre es la ingestión de alimentos (plantas y animales). Las plantas pueden considerarse como un reservorio intermedio a través del cual los metales pesados de fuentes primarias o contaminantes son transferidos al hombre, por ello es importante establecer la relación de metales suelo-planta. En ecosistemas agrícolas, la mayoría de los elementos traza están incluidos en un ciclo biogeoquímico (Adriano, 1986) en el cual los dos componentes fundamentales son el suelo y la planta. Por una parte, los elementos traza llegan al suelo por vía aérea (aerosoles, partículas materiales, polvos resuspendidos y transportados por el aire...) y terrestre (fertilizantes, plaguicidas, residuos sólidos y otros tratamientos del suelo...) y por otra se pierden bien absorbidos por las plantas o por lixiviación y erosión. A su vez existe un equilibrio entre las fracciones disponible y no disponible de estos elementos traza en el suelo (Hodgson, 1963). La importancia de las distintas vías de transferencia de estos elementos varía considerablemente dependiendo del elemento, especie vegetal, tipo de suelo, prácticas agrícolas, etc., y con frecuencia se producen alteraciones en los aportes o pérdidas de dichos elementos que modifican su ciclo, por lo que pueden encontrarse en proporciones tóxicas o deficientes.

Los contenidos de metales pesados

en el suelo están relacionados con el material original y los parámetros edáficos (pH, CaCO_3 , materia orgánica, textura del suelo y naturaleza de los minerales de la arcilla) (Albaset y Cottenie, 1985; Papadopoulos y Rowell, 1989; Stevenson y Ardakani, 1972; Archer y Hodgson, 1987; McLaren *et al.*, 1983; Alvarez *et al.*, 1985; Boluda, 1988; Cala *et al.*, 1985; Cala *et al.*, 1986; Cruz *et al.*, 1986; Serrano *et al.*, 1983), y su disponibilidad para las plantas depende en gran medida de la forma química en que se presenten en el suelo.

El objeto de este trabajo es el estudio de los niveles de metales pesados Cu, Zn, Pb y Cd en suelos y plantas de una zona de la Comunidad de Madrid muy industrializada y con elevada concentración urbana. Mediante tratamiento estadístico, se relacionan los contenidos de metales con los parámetros edáficos, factores que pueden determinar su dinámica en el suelo. Igualmente se establecen relaciones entre los niveles de estos elementos en suelos y plantas. Las anomalías en las correlaciones se han utilizado como criterio inicial de posibles aportes contaminantes. Con todo ello se pretende contribuir al estudio de la contaminación ambiental en su aspecto edáfico, que está incluida en los temas prioritarios de los programas más recientes sobre protección de suelos de la Comunidad Económica Europea.

MATERIAL Y METODOS

La zona en la que hemos realizado este estudio se encuentra en el Su-

roeste de la Comunidad de Madrid, constituyendo un sector circular que

se extiende desde el Km 10 al 20 de la Carretera de Andalucía (N-IV), entre Getafe y Pinto, hasta la carretera de Villaviciosa de Odón a Boadilla del Monte (M-511), con una superficie aproximada de 20000 Hectáreas (Fig. 1). Se han tomado muestras de suelos de cultivo, de 0 a 20 cm, por ser la parte del suelo más expuesta a la contaminación por metales, y en los que fué posible, las partes aéreas de los vegetales cultivados, susceptibles de formar parte de la cadena alimentaria:

trigo (*Triticum sativum*), cebada (*Hordeum vulgare*), habas (*Vicia faba*), coliflor (*Brassica oleracea* variedad *botrytis*), espinacas (*Spinacia oleracea*), maíz (*Zea mays*) y vid (*Vitis vinifera*). Se ha dividido el área de estudio en cuatro zonas en función de los posibles focos contaminantes: Zona 1: Polígonos Industriales de Los Angeles, Las Arenas de Pinto y Fuenlabrada; Zona 2: Fuenlabrada; Zona 3: Móstoles; Zona 4: Villaviciosa de Odón a Boadilla del Monte. La distribu-

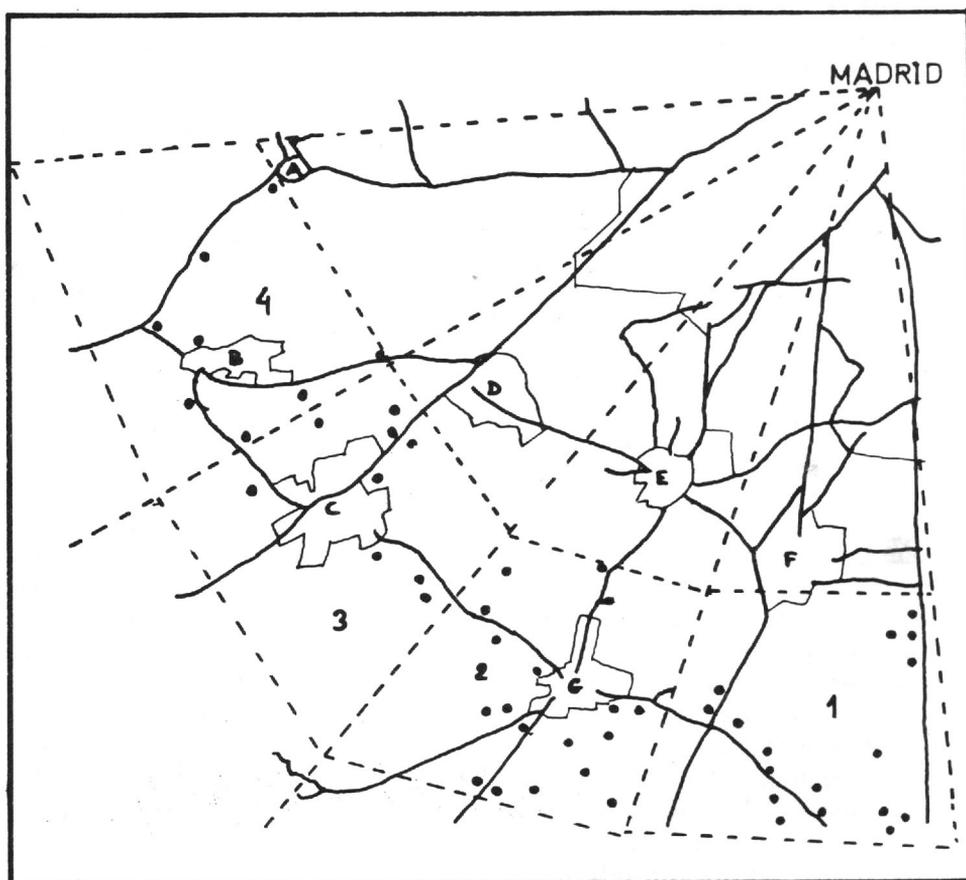


FIG. 1.—Localización de muestras.

A: Boadilla. B: Villaviciosa. C: Móstoles. G: Fuenlabrada.

ción de muestras en dichas zonas es irregular, ya que se ha tenido en cuenta el posible aporte externo de metales, consecuencia de la proximidad a carreteras, polígonos industriales, centros urbanos, cementerios, granjas, vertederos, etc.

El estudio climático de la zona se ha realizado en base a los datos meteorológicos obtenidos de la estación de Getafe (altitud 623 m): clima Mediterráneo Templado, con régimen térmico templado y régimen de humedad Mediterráneo (Elías y Ruíz, 1977). La vegetación potencial (Rivas, 1987), encinares, apenas está representada actualmente. El uso actual de este territorio es agrícola y hortícola, fundamentalmente a base de pequeños huertos dedicados al cultivo para autoconsumo o venta (Gracia y Hernanz, 1987). Los materiales sobre los que se asientan los suelos de la zona de estudio pertenecen al conjunto sedimentario continental que rellena la fosa del Tajo. La mayor parte de los sedimentos

corresponden al Mioceno, y solamente existen los sedimentos Cuaternarios en los valles del Jarama y Manzanares. Los suelos de la zona corresponden a las siguientes unidades edafológicas (Monturiol y Alcalá, 1989): Fluvisoles, Gleysoles, Ranker, Phaeozem, Cambisoles y Luvisoles.

Se han realizado las siguientes determinaciones analíticas en la fracción menor de 2 mm de las muestras de suelos: pH en H₂O (1:2.5), análisis granulométrico (método Internacional), carbonatos (método gasométrico con calcímetro de Bernard), nitrógeno total (método de Kjeldahl) y carbono orgánico (método de Sauerlandt). Los análisis de metales pesados en suelos y plantas se han llevado a cabo, sobre muestras secas al aire, por el método de polarografía inversa en Polarógrafo Metrohm, atacándolas previamente con ácidos perclórico y fluorhídrico en reactor Phase 2000.

RESULTADOS Y DISCUSION

Estudiando los parámetros edáficos en las muestras agrupadas por zonas, (Tabla 1), se observa que, siendo los valores de pH próximos a 7, la zona 1 presenta una media más elevada que el resto. Igualmente corresponde a la zona 1 el mayor porcentaje de CaCO₃. La proporción de carbono orgánico es en general baja, encontrándose los contenidos más altos en la zona 1. Los valores de nitrógeno total son igualmente bajos en las distintas zonas, debido probablemente a las prácticas agrícolas a las que han estado sometidos estos sue-

los. Los contenidos medios de las fracciones granulométricas se caracterizan por una proporción elevada de fracción gruesa que aumenta de la zona 1 a la 4, siendo por tanto los porcentajes de arcilla superiores en la zona 1, disminuyendo de la zona 1 a la 4. En general, se observa que al pasar de la zona 4 a la 1 algunos parámetros de los suelos varían a medida que su localización se aleja del área fuente de los depósitos sedimentarios de la Fosa Tectónica del Tajo.

Los contenidos en Zn, Pb, Cu y

TABLA 1
Resultados de analisis generales por zonas

MUESTRA	Carbonatos g kg ⁻¹	pH en agua	Carbono g kg ⁻¹	Nitrógeno g kg ⁻¹	Ar. gruesa	Análisis Granulométrico (%) Arena fina	Limo	Arcilla
ZONA 1								
L-5	86.4	7.9	8.9	0.8	34.3	24.5	15.0	26.2
L-6	42.4	7.6	14.6	1.3	53.6	21.8	7.9	16.7
L-13	22.8	7.4	7.0	0.8	41.2	32.3	7.4	19.1
L-14	73.9	8.0	9.0	0.9	36.0	30.4	11.7	22.0
L-15	23.6	7.7	8.9	0.9	37.8	26.6	15.0	20.6
L-16	30.6	7.9	9.1	0.6	17.0	21.2	18.1	43.7
L-17	44.0	8.2	5.3	0.3	61.5	24.5	3.7	10.3
L-18	41.6	8.3	8.6	1.6	27.8	28.5	13.3	30.5
L-19	26.7	7.7	4.9	0.6	37.1	27.3	11.9	23.8
V. MAXIMO	86.4	8.3	14.6	1.6	61.5	32.3	18.1	43.7
V. MINIMO	22.8	7.4	4.9	0.3	17.0	21.2	3.7	10.3
MEDIA	43.6	7.9	8.5	0.9	38.5	26.3	11.5	23.6
ZONA 2								
L-4	22.8	7.6	3.1	0.5	37.9	35.1	5.8	21.1
L-7	14.5	7.0	2.9	0.4	38.9	30.2	5.2	25.6
L-8	16.9	6.9	7.1	0.5	36.9	25.7	6.5	31.0
L-9	21.7	8.2	11.0	1.1	42.4	35.2	6.3	15.0
L-10	11.2	6.8	5.2	0.3	53.5	31.6	5.7	9.3
L-11	3.1	6.6	1.6	0.5	42.2	26.3	8.0	23.5
L-12	13.7	7.2	4.3	0.3	53.4	31.9	7.8	7.8
L-20	16.5	6.9	3.6	0.2	36.8	36.8	6.2	20.2
L-21	41.0	8.1	2.3	0.1	32.9	26.6	9.6	30.9
L-22	46.0	8.3	1.9	0.1	17.5	16.9	17.0	48.6
L-23	0.0	5.4	2.8	0.2	63.8	25.9	2.8	7.5
L-24	18.6	7.0	4.3	0.2	44.3	25.5	8.4	21.9
L-25	17.1	7.0	3.0	0.1	62.0	28.0	2.3	7.7
L-26	10.4	6.4	2.7	0.1	47.4	36.1	6.1	10.4
V. MAXIMO	46.0	8.3	11.0	1.1	63.8	36.8	17.0	48.6
V. MINIMO	0.0	5.4	1.6	0.1	17.5	16.9	2.3	7.5
MEDIA	18.1	7.1	4.0	0.3	43.6	29.4	6.9	20.0

TABLA 1 (Continuación)
Resultados de analisis generales por zonas

MUESTRA	Carbonatos g kg ⁻¹	pH en agua	Carbono g kg ⁻¹	Nitrógeno g kg ⁻¹	Ar. Gruesa	Análisis Granulométrico (%) Arena fina	Limo	Arcilla
ZONA 3								
L-1	1.6	5.8	3.1	0.4	64.0	24.2	3.2	8.7
L-2	7.8	6.0	1.6	0.3	50.0	33.6	2.9	13.6
L-3	24.4	7.9	3.4	0.6	47.2	28.5	6.0	19.8
L-28	10.4	6.2	3.9	0.5	63.9	24.9	5.0	6.1
L-36	0.0	5.4	3.1	0.3	65.4	25.8	4.7	4.0
L-37	66.7	8.0	2.2	1.8	26.2	23.3	17.2	33.4
L-38	13.3	6.8	5.3	1.7	47.9	27.0	7.0	18.0
V. MAXIMO	66.7	8.0	5.3	1.8	65.4	33.6	17.2	33.4
V. MINIMO	0.0	5.4	1.6	0.3	26.2	23.3	2.9	4.0
MEDIA	17.7	6.6	3.2	0.8	52.1	26.8	6.6	14.8
ZONA 4								
L-27	13.3	7.6	6.3	0.7	52.7	32.3	4.9	10.1
L-29	10.4	6.4	1.7	0.3	73.0	20.9	3.3	2.8
L-30	16.0	8.1	6.2	0.7	44.9	30.5	6.9	17.8
L-31	11.9	7.3	6.2	0.6	37.0	35.2	8.7	19.1
L-32	12.6	6.6	5.3	0.6	51.6	37.6	6.0	4.8
L-33	19.3	7.5	3.1	0.1	66.2	22.0	3.7	8.2
L-34	13.3	7.8	3.0	0.2	63.7	25.4	4.5	6.3
L-35	14.8	6.3	7.6	0.7	50.9	31.6	6.8	10.8
V. MAXIMO	19.3	8.1	7.6	0.7	73.0	37.6	8.7	19.1
V. MINIMO	10.4	6.3	1.7	0.1	37.0	20.9	3.3	2.8
MEDIA	14.0	7.2	4.9	0.5	55.0	29.4	5.6	10.0

TABLA 2

Metales pesados en suelos por zonas (mg kg⁻¹).

Muestra	Zn	Pb	Cu	Cd	Muestra	Zn	Pb	Cu	Cd
ZONA 1					ZONA 2				
L - 5	83.6	69.0	35.0	0.036	L - 4	40.9	66.0	22.7	0.023
L - 6	91.6	67.8	16.9	0.036	L - 7	15.0	36.3	9.3	0.025
L - 13	38.3	23.1	26.1	0.020	L - 8	42.2	53.1	17.2	0.071
L - 14	116.2	84.2	22.6	0.310	L - 9	34.5	41.6	6.9	0.022
L - 15	66.2	28.3	15.5	0.048	L - 10	41.1	64.7	16.2	0.012
L - 16	45.7	20.4	12.9	0.045	L - 11	57.2	78.8	22.2	0.062
L - 17	95.7	44.4	21.2	0.059	L - 12	16.6	20.9	12.4	0.054
L - 18	118.6	81.3	21.7	0.058	L - 20	40.5	22.8	9.8	0.014
L - 19	40.4	22.4	10.9	0.155	L - 21	60.7	54.8	16.1	0.029
L - 39	43.6	34.8	17.0	0.049	L - 22	70.9	35.5	25.2	0.034
L - 40	45.5	47.5	18.2	0.053	L - 23	48.2	71.6	19.5	0.015
L - 41	112.8	181.8	13.5	0.024	L - 24	19.2	83.3	12.2	0.030
L - 42	31.3	69.7	14.0	0.024	L - 25	27.6	38.2	14.7	0.084
L - 43	41.4	46.8	7.9	0.025	L - 26	26.4	37.8	12.4	0.090
L - 44	25.6	27.9	11.8	0.023	L - 47	20.9	69.9	11.1	0.025
L - 45	180.3	140.5	50.0	0.078	L - 48	15.5	39.1	13.0	0.068
L - 46	48.9	35.8	16.4	0.047	L - 49	16.2	32.8	12.4	0.198
					L - 50	34.8	39.2	9.9	0.058
V. Máximo .	180.3	181.8	50.0	0.310	V. Máximo .	70.9	83.3	25.2	0.198
V. Mínimo .	25.6	20.4	7.9	0.020	V. Mínimo .	15.0	20.9	6.9	0.012
Media	72.1	60.3	19.5	0.064	Media	34.9	49.3	14.6	0.051
ZONA 3					ZONA 4				
L - 1	17.5	25.1	10.1	0.287	L - 27	64.2	88.0	9.8	0.017
L - 2	31.9	43.1	14.0	0.093	L - 29	21.0	26.2	7.6	0.017
L - 3	46.9	39.9	26.6	0.097	L - 30	39.0	39.7	5.7	0.050
L - 28	10.3	31.8	8.1	0.015	L - 31	51.7	37.5	5.5	0.079
L - 36	14.8	46.8	9.1	0.074	L - 32	24.5	41.3	4.7	0.014
L - 37	42.2	17.0	18.7	0.010	L - 33	30.0	33.1	15.3	0.022
L - 38	39.2	77.5	21.1	0.062	L - 34	16.2	25.3	6.2	0.024
L - 51	23.8	25.4	16.2	0.119	L - 35	31.3	34.5	15.3	0.015
L - 52	42.2	66.8	24.1	0.358					
V. Máximo .	46.9	77.5	26.6	0.358	V. Máximo .	64.2	88.0	15.3	0.079
V. Mínimo .	10.3	17.0	8.1	0.010	V. Mínimo .	16.2	25.3	4.7	0.014
Media	29.9	41.5	16.4	0.132	Media	34.7	40.7	8.8	0.030

Cd de los materiales originales de estos suelos son en general bajos (Cano, 1992), por lo que las concentraciones existentes en ellos estarán relacionadas con los diferentes procesos edáficos y posibles aportes externos. Los suelos analizados (Tablas 2 y 3), presentan una concentración de Zn muy variable entre 10 y 180 mg kg⁻¹, con media de 46 mg kg⁻¹ sobrepasando dicha media un número considerable de muestras. Algunas de ellas, situadas en la zona 1, superan los 110 mg kg⁻¹, tratándose de muestras próximas a posibles fuentes contaminantes (carreteras, mataderos, cementerios, industria siderúrgica y granjas), con pH elevado y proporciones considerables de CaCO₃, características del suelo que favorecen la retención del Zn en el mismo. Los contenidos en Cu se encuentran entre 5 y 50 mg kg⁻¹, con media de 16 mg kg⁻¹, siendo pocas las muestras que sobrepasan 25 mg kg⁻¹. Los máximos valores coinciden con suelos próximos a carreteras, con pH elevado y porcentajes de CaCO₃ también altos, parámetros que contribuyen a su retención. Los valores de Pb obtenidos en los

suelos estudiados se encuentran entre 17 y 182 mg kg⁻¹, con media de 50 mg kg⁻¹, observándose en general los más elevados en muestras próximas a fábricas de muebles, pinturas, barnices, artes gráficas, cementerios, granjas y mataderos. Un gran número de muestras presentan valores superiores a la media de 50 mg kg⁻¹, coincidiendo en algunas de ellas con altos contenidos de Zn y Cu. Las proporciones de Cd están entre 0.36 y 0.01 mg kg⁻¹ con media de 0.065 mg kg⁻¹; solamente algunas muestras sobrepasan los 0.15 mg kg⁻¹.

Estudiando los contenidos por zonas se observa que las medias más elevadas se encuentran en la zona 1 para Zn, Cu y Pb y en la zona 3 para Cd, con los valores individuales también más altos; la zona 4 presenta las medias más bajas para el Cu, Pb y Cd, y la zona 3 para el Zn.

Los valores máximos obtenidos de los cuatro elementos estudiados no superan los límites dados por la Comunidad Económica Europea en la Directiva 181/10/86 para suelos con pH entre 6 y 7 que pueden ser sometidos a tratamiento con lodos residuales.

TABLA 3

Parámetros estadísticos de metales pesados en suelos (mg kg⁻¹).

	Total Zn	Total Pb	Total Cu	Total Cd
MEDIA	46.159	50.216	15.628	0.065
D. TIPICA	32.087	29.774	7.886	0.073
VARIANZA.	1029.592	886.503	62.191	0.005
V. MAXIMO.	180.270	181.840	49.950	0.358
V. MINIMO	10.274	17.012	4.719	0.010
I. CONF. MEDIA	37.4	42.1	13.5	0.0
	54.9	58.3	17.8	0.1

Realizado un análisis estadístico se observa que los contenidos de metales en suelos cumplen una distribución normal para un elevado porcentaje de muestras, según la siguiente secuencia: Cd (89 %) < Pb (90 %) < Zn (92 %) < Cu (99 %), desechando valores fuera de los límites (0.15 a -0.02 para Cd, 88 a 12.4 para Pb, 91.7 a 0.59 para Zn y 34.95 a 3.69 para Cu). Las anomalías encontradas para 3 o 2 elemen-

tos corresponden a muestras (L-45, L-41 y L-14) localizadas en puntos próximos a focos de contaminación.

Establecidas las relaciones lineales entre los contenidos de cada uno de los elementos totales y los parámetros edáficos, mediante las correspondientes rectas de regresión, (Tabla 4), se obtienen valores de coeficientes de correlación inferiores a lo que cabría esperar, probablemente por el incremento de las proporció-

TABLA 4

Ecuaciones de las rectas de regresión de Zn, Pb, Cu y Cd, y parámetros edáficos. n = 38.

Zn - pH H ₂ O:	y =	19.019 x - 91.684	r = 0.57
Zn - CaCO ₃ :	y =	9.539 x + 23.078	r = 0.69
Zn - m. o.:	y =	27.366 x + 21.177	r = 0.51
Zn - arcilla:	y =	1.072 x + 26.102	r = 0.43
Zn - arena:	y =	-0.859 x + 109.245	r = 0.46
Pb - pH H ₂ O:	y =	0.537 x + 42.269	r = 0.02
Pb - pH H ₂ O (< 6.5):	y =	-23.913 x + 182.769	r = 0.65
Pb - pH H ₂ O 6.5 - 7.5:	y =	-51.586 x + 405.921	r = 0.53
Pb - CaCO ₃ :	y =	1.725 x + 42.135	r = 0.16
Pb - m. o.:	y =	9.595 x + 37.713	r = 0.23
Pb - arcilla:	y =	0.094 x + 4.445	r = 0.05
Pb - arena:	y =	-0.038 x + 49.001	r = 0.03
Cu - pH H ₂ O:	y =	2.544 x - 3.112	r = 0.30
Cu - CaCO ₃ :	y =	2.112 x + 10.297	r = 0.59
Cu - m. o.:	y =	1.528 x + 13.853	r = 0.11
Cu - arcilla:	y =	0.280 x + 10.207	r = 0.43
Cu - arena:	y =	-0.204 x + 30.525	r = 0.42
Cd - pH H ₂ O:	y =	-0.005 x + 0.098	r = 0.07
Cd - CaCO ₃ :	y =	0.004 x + 0.047	r = 0.14
Cd - m. o.:	y =	0.006 x + 0.053	r = 0.05
Zn - pH - arena:	y =	15.370 x ₁ - 0.349 x ₂ - 39.421	r = 0.59
Cu - pH - arena:	y =	0.601 x ₁ - 0.185 x ₂ + 24.714	r = 0.43

Nivel de significación = 0.01.

nes de estos elementos por contaminación.

Las concentraciones de Zn total en estos suelos presentan relación lineal significativa y directa con parámetros como pH, CaCO_3 , materia orgánica, arcilla y limo; inversa con arena, y menos significativa y directa con el pH en agua para valores superiores a 7.5. Los contenidos de Cu total en los suelos no presentan correlación lineal significativa con pH y materia orgánica, siendo significativa para los constituyentes granulométricos, y proporción de carbonatos. No se encuentra correlación lineal significativa entre el Pb y Cd totales y los distintos parámetros edáficos, excepto para el Pb con el pH en agua a valores inferiores a 6.5 y de 6.5 a 7.5. Se observa en general que el Zn total y Cu total se relacionan significativamente con los parámetros edáficos, llegándose a las mismas conclusiones al considerar las correlaciones múltiples elemento total-pH-arena.

En el análisis de muestras vegetales, realizado con el fin de establecer las relaciones entre los niveles de metales pesados en suelos y plantas, con repercusión en la cadena alimentaria, se han obtenido los resultados que se muestran en la Tabla 5. El contenido de Zn en plantas se encuentra entre 188 y 4 mg kg^{-1} destacando las muestras L-6 (habas) y L-18 (hojas de gramíneas) por sus altos contenidos en este elemento (188.5 y 145 mg kg^{-1} respectivamente), que se corresponden con valores elevados de Zn total en el suelo (91.6 y 118.6 mg kg^{-1}). Los contenidos de Cu se encuentran entre 0.8 y 68.3 mg kg^{-1} , presentando menos de 20 mg kg^{-1} la mayoría de las muestras. Destaca la

muestra de granos de habas con concentración próxima a 70 mg kg^{-1} , debido quizá a que las leguminosas forman complejos de Cu con proteínas y aminoácidos en los que es rica esta especie vegetal. Los contenidos de Pb se encuentran entre 0.04 y 29.21 mg kg^{-1} . Se observa que casi el 50 % de las muestras presentan valores superiores a 3 mg kg^{-1} , correspondiendo los mayores en general a valores elevados de Pb total en el suelo. El Cd en las plantas analizadas oscila entre 0.44 a 0.01 mg kg^{-1} , encontrándose las mínimas concentraciones en granos y las máximas en hojas, con algunas excepciones.

Teniendo en cuenta las medias de contenidos de metales en plantas por especies se han obtenido las siguientes secuencias:

- Zn: Habas >> hojas espinacas >> hojas gramíneas > brotes maíz > vegetación barbecho > granos trigo > hojas coliflor > hojas vid > granos cebada.
- Cu: Habas >> hojas gramíneas > = hojas espinacas > brotes maíz > = granos de trigo > hojas coliflor > hojas vid > granos cebada.
- Pb: Hojas gramíneas > hojas coliflor > = granos trigo > = hojas espinacas > = habas > hojas vid > grano cebada >> brotes maíz.
- Cd: Hojas espinacas > hojas coliflor > hojas gramíneas > brotes maíz > = hojas vid > = granos trigo > = habas > granos cebada.

Comparando estas secuencias se observa similitud entre las de Cu y Zn, siendo diferentes las de Pb y Cd.

Los contenidos de metales en plantas cumplen una distribución

TABLA 5

Metales pesados en plantas.

	MUESTRA	Zn	Pb	Cu	Cd
Grano de trigo	L - 1	25.2	0.3	5.7	0.017
	L - 2	33.5	7.6	6.9	0.012
	L - 4	32.9	17.6	14.5	0.072
	L - 5	41.2	2.5	3.7	0.034
	L - 44	8.5	0.0	0.9	0.076
	Media	28.3	5.6	6.3	0.042
	V. Máximo . . .	41.2	17.6	14.5	0.076
	V. Mínimo . . .	8.5	0.0	0.9	0.012
Grano de cebada	L - 3	18.7	4.5	4.1	0.010
	L - 47	20.5	0.0	3.0	0.041
	Media	19.6	2.3	3.6	0.026
	V. Máximo . . .	20.5	4.5	4.1	0.041
	V. Mínimo . . .	18.7	0.0	3.0	0.010
Hojas de gramíneas	L - 7	36.9	7.6	21.2	0.160
	L - 8	27.8	11.9	15.8	0.150
	L - 14	42.7	10.7	7.8	0.440
	L - 18	145.0	20.1	24.4	0.100
	L - 22	9.1	2.1	0.8	0.025
	L - 23	14.1	1.1	2.5	0.057
	L - 24	9.6	2.0	11.3	0.021
	Media	40.7	7.9	12.0	0.136
	V. Máximo . . .	145.0	20.1	24.4	0.440
	V. Mínimo . . .	9.1	1.1	0.8	0.021
Vegetación en barbecho	L - 10	75.3	3.0	15.6	0.130
	L - 11	52.1	29.2	6.2	0.076
	L - 39	53.0	8.2	4.6	0.044
	L - 41	9.7	2.7	3.4	0.012
	L - 42	16.3	2.8	6.8	0.010
	L - 49	46.9	3.7	11.0	0.092
	L - 52	3.9	0.3	5.2	0.024
	Media	36.7	7.1	7.5	0.055
	V. Máximo . . .	75.3	29.2	15.6	0.130
	V. Mínimo . . .	3.9	0.3	3.4	0.010
Habas	L - 6	188.5	4.9	68.3	0.041
Hojas de coliflor	L - 9	22.8	2.8	10.1	0.068
	L - 45	23.8	13.3	3.5	0.290
	L - 50	22.1	1.5	3.9	0.360
	Media	22.9	5.9	5.8	0.239
	V. Máximo . . .	23.8	13.3	10.1	0.360
V. Mínimo . . .	22.1	1.5	3.5	0.068	
Espinacas	L - 13	82.5	5.1	7.3	0.410
Brotos de maíz	L - 51	38.7	0.1	6.5	0.050
Hojas de vid	L - 12	19.9	3.7	3.9	0.045

normal, en porcentajes de muestras que oscilan entre el 79 % y 85 %: Cd (79 %) < Cu (81.3 %) < Zn = Pb (85 %). Las anomalías encontradas para 3 o 2 elementos corresponden a las muestras L-18 (hojas de gramíneas), L-45 (hojas de coliflor), L-6 (semillas de habas) y L-13 (espinacas).

Se han establecido las relaciones lineales entre los contenidos de metales pesados totales en suelo y totales en planta, no obteniéndose una correlación significativa.

Del valor del cociente entre el contenido en plantas y el total en suelos (Tabla 6) se deduce que en general se produce una acumulación de Cd en planta en más del 50 % de las muestras; para el Zn la acumulación es inferior, y sólo un 20 % de las muestras presentan contenidos superiores a los del suelo, siendo para el Cu aún menor (sólo un 15 % de las muestras tienen valores mayores que los del suelo); no se observa acumulación de Pb en los vegetales en relación al suelo para ninguna de las muestras analizadas. La secuencia de acumulación de metales en planta respecto al contenido total en suelos es: Cd > Zn > Cu > Pb. Los diferentes índices de acumulación podrían justificarse por la existencia de una deposición superficial de metales procedentes de contaminación aérea (Page *et al.*, 1971; Rodríguez y Mariño, 1979; Serrano y Perelló, 1981),

absorción posterior a este aporte, y absorción a partir de las formas asimilables del suelo. Para el Cd parece fundamental la deposición superficial, no habiéndose encontrado correlación significativa entre las concentraciones de este metal en suelo y los parámetros edáficos, ni entre contenidos en suelo y planta. Las bajas relaciones planta/suelo para el Pb podrían deberse a la escasa absorción foliar de este elemento, quedando susceptible al lavado, así como a la baja movilidad con acumulación predominante en la raíces (Jones y Hatch, 1945), no existiendo, como en el caso del Cd, correlación entre contenido en suelo y parámetros edáficos, ni entre los de suelo y planta.

Estudiando el grado de acumulación por especies se observa que el Zn se acumula fundamentalmente en espinacas (2.16) y habas (2.06); el Cu en habas (4.03); la acumulación de Cd es en general mayor en hojas (espinacas 20.25, hojas de coliflor 4.33, hojas de gramíneas 2.41) que en granos (granos de trigo 1.51, granos de habas 1.14, granos de cebada 0.87) lo cual parece indicar la presencia de este elemento en la planta procedente de deposición aérea; para el Pb no existe acumulación en ninguna especie vegetal estudiada.

CONCLUSIONES

Los valores máximos obtenidos para Zn, Cu, Pb y Cd en suelos, no superan los límites propuestos por la Comunidad Europea para suelos con

pH entre 6 y 7 a los que se pretende tratar con lodos residuales.

En la zona 1 (Pinto), los contenidos medios de Zn, Cu y Pb en suelos

TABLA 6

Planta/Suelo.

MUESTRA		Zn	Pb	Cu	Cd
Grano de trigo	L - 1	1.44	0.01	0.57	0.06
	L - 2	1.05	0.18	0.50	0.13
	L - 4	0.81	0.27	0.64	3.13
	L - 5	0.49	0.04	0.11	0.94
	L - 44	0.33	0.00	0.08	3.30
	Media	0.82	0.10	0.38	1.51
	V. Máximo . . .	1.44	0.27	0.64	3.30
	V. Mínimo . . .	0.33	0.00	0.08	0.06
Grano de cebada	L - 3	0.40	0.11	0.16	0.10
	L - 47	0.98	0.00	0.27	1.64
	Media	0.69	0.06	0.21	0.87
	V. Máximo . . .	0.98	0.11	0.27	1.64
	V. Mínimo . . .	0.40	0.00	0.16	0.10
Hojas de gramíneas	L - 7	2.46	0.21	2.29	6.39
	L - 8	0.66	0.22	0.92	2.10
	L - 14	0.37	0.13	0.34	1.42
	L - 18	1.22	0.25	1.12	1.71
	L - 22	0.13	0.06	0.03	0.73
	L - 23	0.29	0.02	0.13	3.85
	L - 24	0.50	0.02	0.93	0.70
	Media	0.80	0.13	0.82	2.41
	V. Máximo . . .	2.46	0.25	2.29	6.39
	V. Mínimo . . .	0.13	0.02	0.03	0.70
Vegetación en barbecho	L - 10	1.83	0.05	0.96	10.57
	L - 11	0.91	0.37	0.28	1.22
	L - 39	1.22	0.24	0.27	0.90
	L - 41	0.09	0.01	0.25	0.50
	L - 42	0.52	0.04	0.49	0.42
	L - 49	2.90	0.11	0.89	0.46
	L - 52	0.09	0.01	0.22	0.07
	Media	1.08	0.12	0.48	2.02
	V. Máximo . . .	2.90	0.37	0.96	10.57
	V. Mínimo . . .	0.09	0.01	0.22	0.07
Habas	L - 6	2.06	0.07	4.03	1.14
Hojas de coliflor	L - 9	0.66	0.07	1.48	3.07
	L - 45	0.13	0.09	0.07	3.72
	L - 50	0.63	0.04	0.40	6.21
	Media	0.48	0.07	0.65	4.33
	V. Máximo . . .	0.66	0.10	1.48	6.21
V. Mínimo . . .	0.13	0.04	0.07	3.07	
Espinacas . . .	L - 13	2.16	0.22	0.28	20.25
Brotos de maíz	L - 51	1.63	0.00	0.40	0.42
Hojas de vid . .	L - 12	1.20	0.18	0.31	0.84

son superiores a los obtenidos en el resto de las zonas, coincidiendo con una mayor actividad industrial.

Establecidas las relaciones lineales entre los elementos estudiados y parámetros edáficos, se deduce que el Zn en suelo presenta relación lineal significativa y directa con pH, CaCO_3 , materia orgánica, arcilla y limo. El Cu presenta relación lineal significativa y directa con CaCO_3 y fracciones granulométricas. Pb y Cd no presentan relación significativa con los parámetros edáficos, lo que podría interpretarse como índice de contaminación en suelos para estos dos elementos.

La secuencia de contenidos medios de metales en plantas, agrupadas por especies y partes de vegetal ana-

lizadas, es semejante para Cu y Zn: Habas >> Hojas gramíneas, espinacas > granos trigo > hojas coliflor > granos cebada. Para Pb y Cd siguen un orden diferente y no comparable.

No se ha obtenido correlación significativa entre las concentraciones de los elementos en suelo y planta.

Relacionando el contenido de metales en planta con el del suelo se puede establecer la siguiente secuencia de acumulación en planta: $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cu}$. Los índices de acumulación de Cd en hojas son elevados, indicando que el mecanismo de aporte de este elemento es fundamentalmente por deposición aérea. No se ha encontrado acumulación de Pb en los órganos vegetales analizados.

BIBLIOGRAFIA

- ADRIANO, D. C., 1986. Trace elements in the Terrestrial Environment. Springer-Verlag, New York. 533.
- ALVAREZ GONZALEZ, A. M., RODRIGUEZ SANCHIDRIAN, J. y GUERRA DELGADO, A., 1985. Estudio edafo-geoquímico de las series detrítica y evaporítica de la provincia de Madrid. IV. Análisis en componentes principales aplicado a suelos de la provincia de Madrid. An. Edafol. Agrobiol., 44: 1567-1582.
- ALBASET, N. and COTTENIE, A., 1985. Heavy metals uptake from contaminated soils as affected by peat, lime and chelates. Soil Sci. Soc. Am., 49: 385-390.
- ARCHER, F. C. and HODGSON, I. H., 1987. Trace elements survey in England and Wales. J. Soil Sci., 38: 421-431.
- BOLUDA, R., 1988. Relaciones estadísticas de los valores de metales pesados (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn) con el pH, contenido en materia orgánica, carbonatos totales y arcilla de los suelos de la comarca de la Plana de Requena. Utiel (Valencia). An. Edafol. Agrobiol., 47: 1503-1524.
- CALA RIVERO, V., RODRIGUEZ SANCHIDRIAN, 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. II. Análisis estadístico. An. Edafol. Agrobiol., 44: 1595-1622.
- CALA RIVERO, V., JIMENEZ BALLESTA, R., RODRIGUEZ SANCHIDRIAN, J. y GUERRA DELGADO, A., 1986. Contribución a la evolución edáfica de suelos mediante el estudio del comportamiento de diversos metales pesados. An. Edafol. Agrobiol., 45: 681-696.
- CANO, M. A., 1992. Facultad de Farmacia. Universidad Complutense de Madrid.

- CRUZ CAÑADAS, R., RODRIGUEZ SANCHIDRIAN, J. y CALA RIVERO, V., 1986. Distribución de Pb, Cd, Cu y Cr entre distintas fases sólidas en algunos tipos de suelos. An. Edafol. Agrobiol., 45: 613-630.
- DIRECTIVA 181/6-12, 4 julio 1986, relativa a la Protección del Medio Ambiente, y en particular de suelos, en la utilización de lodos de depuradora en agricultura. Diario Oficial de las Comunidades Europeas.
- ELIAS, F. y RUIZ, L., 1977. Agroclimatología de España. Cuaderno I.N.I.A., núm. 7.
- GARCIA, J. F. y HERNANZ, M., 1987. Salud y Medio Ambiente. Estrategias para una planificación Regional. Comunidad de Madrid. Consejería de Salud y Bienestar Social. Instituto Regional de Estudios. Madrid.
- HODGSON, J. F., 1963. Chemistry of the micronutrient elements in soils. Adv. Agron., 15: 119-161.
- MC LAREN, R. G., WILLIAMS, J. G. and SWIFT, R. S., 1983. The adsorption of copper by soils samples from Scotland at low equilibrium solution concentration. Geoderma, 31: 97-106.
- MONTURIOL, F. y ALCALA, L., 1989. Cartografía de suelos. Instituto de Edafología y Agrobiología. C. S. I. C. Madrid.
- PAGE, A. L., GANJE, T. J. and JOSHI, M. S., 1971. Lead quantities in plant, soil and air near some major highway in Southern California. Hilgardia, 41: 1-44.
- PAPADOPOULOS, P. and ROWEL, D. L., 1989. The reaction of copper and zinc calcium carbonate surfaces. J. Soil Sci., 40: 39-48.
- RIVAS, S., 1987. Memoria del Mapa de Series de Vegetación de España. ICONA. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- RODRIGUEZ SANCHIDRIAN, J. y MARIÑO, M., 1979. Estudio de la contaminación de suelos y plantas por metales pesados en los entornos de la autopistas que confluyen en Madrid. I. Autopistas de Barajas y Valencia. An. Edafol. Agrobiol., 38: 1377. 1388.
- RODRIGUEZ SANCHIDRIAN, J. y MARIÑO, M., 1980. Estudio de la contaminación de suelos y plantas por metales pesados en los entornos de las autopistas que confluyen en Madrid. II. Contaminación de Suelos. III. Contaminación de plantas. An. Edafol. Agrobiol., 39: 2101-2127.
- STEVENSON, F. J. and ARDAKANI, M. S., 1972. Organic matter reactions involving micronutrients in soils. Soil Sci. Soc. Am., 5: 79-114.

Recibido: 2-3-92.

Aceptado: 22-10-92.