

Aplicación de fórmulas empíricas en el cálculo de valores de referencia de elementos traza en suelos de la Comunidad de Madrid

I. Vázquez⁽¹⁾, J. A. Martín Rubí⁽¹⁾, A. M. Moreno García⁽²⁾ y J. González Parra⁽²⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España. La Calera, 1. 28760 Tres Cantos. Madrid.

(2) Dpto. de Edafología, Facultad de Farmacia. Universidad Complutense de Madrid. 28040 Madrid.

RESUMEN

El objeto de este trabajo ha sido establecer los valores de referencia de elementos traza en suelos desarrollados sobre material granítico y carbonatado de la Comunidad de Madrid. Para ello se determinaron los niveles de fondo o "background" y se establecieron los índices de acumulación edáfica, es decir, relaciones de contenidos de elementos traza en suelos y materiales litológicos, con el fin de comprobar la ausencia de contaminación. Se han deducido los valores de referencia mediante la aplicación de fórmulas empíricas que consideran los niveles de fondo de los elementos y los parámetros edáficos con los que se correlacionan y que intervienen en la adsorción/desorción de metales.

Palabras clave: Índices de acumulación edáfica, Material carbonatado, Material granítico, Niveles de fondo, Valores de referencia.

Application of empiric formulae for the calculation of trace elements reference values in soils of the Community of Madrid

ABSTRACT

The aim of this study has been to establish the reference values of trace elements in soils derived from granite material and carbonate material of the Community of Madrid. Therefore background levels were determined as well as pedological accumulation indexes, that means relationships between contents of trace elements in soils and in parent materials in order to prove there is no contamination in soils. Reference values since empiric formulae were deduced. These formulae take in account the background levels of elements and the pedological parameters which are correlated with them and that take part in the adsorption and desorption of metals.

Key words: Background levels, Carbonate material, Granite material, Pedological accumulation indexes, Reference values.

INTRODUCCIÓN

La contaminación de un suelo puede asociarse a dos conceptos: a un aumento en los contenidos de componentes causado por actividades humanas, o bien a un aumento de riesgos al provocar efectos negativos en el funcionamiento del suelo o sobre la calidad de productos vegetales con repercusión humana.

Para poder establecer si un suelo está contaminado por distintas sustancias es necesario el conocimiento previo de los contenidos existentes en el material original a partir del cual se forma el

suelo. Los componentes químicos del suelo son herederos del material original y su distribución en el perfil está influida por los procesos edafogénicos. Se incrementan cuando existen aportes antropogénicos pudiendo alcanzar niveles de contaminación, de ahí que los contenidos existentes en suelos no contaminados sean la base para calcular el *nivel de fondo* o "background".

Los *índices de acumulación edáfica* reflejan la distribución de los elementos en el suelo, la cual está influida por varios factores: contenido en materia orgánica, mineralogía, textura, drenaje, vegetación y grado de evolución del suelo.

El *valor de referencia o nivel A* de cada elemento traza indicativo de nivel de calidad (VROM, 1991; LABO, 1995), cantidad de un elemento que puede existir en el suelo sin que pierda su multifuncionalidad, se puede calcular mediante dos métodos (TCB, 1987; IHOBE 1993 y Vegter, 1995). 1) Estableciendo las correlaciones entre arcilla y/o materia orgánica del suelo no contaminado y los contenidos en metales, $VR=VP+a$ (arcilla) + b (materia orgánica), siendo a y b las pendientes de las rectas de regresión y VP el valor de partida (media aritmética o geométrica de los contenidos en metales); 2) El valor de referencia también se puede obtener cuando no existen correlaciones o no son significativas, sumando a la media de contenidos dos veces la desviación típica (S).

El nivel A o de referencia significa que el riesgo es desdeñable y por debajo de él es posible cualquier uso del suelo.

MATERIALES Y METODOLOGÍA ANALÍTICA

Características litológicas y fisiográficas

La zona de estudio I se localiza en Cerceda, km 47 de la carretera M-607. Geológicamente se encuadra en el dominio litológico-estructural de La Sierra de la Comunidad de Madrid (I.T.G.E., 1998). Está constituida fundamentalmente por rocas adamellíticas y granodioritas.

Fisiográficamente corresponde a una llanura de pie de monte de las grandes elevaciones de la Sierra.

La zona de estudio II está situada en el Canal de la Parra (carretera Torrelaguna-El Atazar), los materiales son carbonatados, calizas y margas Cretácicas en contacto con pizarras y cuarcitas.

Puntos muestreados

En la zona I la vegetación corresponde a un encinar adhesionado de la Serie supramesomediterránea (Rivas Martínez, 1982). La selección y recogida de muestras se llevó a cabo a profundidades de 0-10 cm y 10-20 cm, correspondiendo a horizontes A y C de suelos poco evolucionados (cuatro perfiles: CE-1, CE-2, CE-3 y CE-4). Los perfiles

CE-2 y CE-4 se tomaron fuera de la influencia de la encina, no existiendo cubierta vegetal en el perfil CE-2 en el momento del muestreo. El perfil CE-4 se tomó próximo a la carretera y presenta una cubierta de pastizal.

En la zona II la vegetación es de matorral con algún pino de repoblación. La recogida de muestras se llevó a cabo en todos los horizontes de los suelos carbonatados, hasta 120 cm de profundidad (tres perfiles T-1, T-2 y T-3).

Metodología

Las muestras de aproximadamente 1,5 kg de peso se homogeneizaron para la realización de un desmuestre por cuarteo mediante cuarteador modelo Jones y se tomó una muestra representativa de 125 g. Posteriormente se trituró en minitrituradora a 2 mm y fue molida en molino Tema a $<63 \mu\text{m}$. Las siguientes determinaciones analíticas se realizaron en la fracción menor de 2 mm (ISRIC, 1993): Análisis granulométrico (Método Internacional), pH en agua 1:2,5, carbonatos (método gasométrico con calcímetro de Bernard), caliza activa (Droineau, 1943), carbono orgánico (Walkley y Black, 1974), nitrógeno total (método Kjeldhal), capacidad de intercambio catiónico (acetato amónico 1N a $\text{pH}=7$).

Los contenidos de *componentes mayoritarios* se determinaron mediante la Técnica de Fluorescencia de Rayos X. Los *contenidos de elementos traza* se determinaron por Espectrofotometría de Emisión de Plasma acoplado inductivamente (ICP-AES), previo ataque triácido de las muestras llevadas a sequedad ($\text{HF} + \text{HClO}_4 + \text{HNO}_3$) y posterior disolución en HCl. El análisis de cadmio y cobre se realizó mediante la técnica de Espectrometría de masas con fuente de excitación (ICP-MS).

RESULTADOS

A) Zona I (Cerceda)

Parámetros edáficos

Los suelos corresponden a Leptosoles eutrícos (FAO, 1998) con una secuencia de horizontes A,

C. En cuanto a la *textura* (Tabla 1) presentan porcentajes de arena muy superiores a los de fracción fina, lo que indica que ha existido una alteración física como proceso fundamental en la formación del suelo, con proporciones medias de arcilla de 6%. Los horizontes A tienen reacción ligeramente ácida con *valores de pH* en agua comprendidos entre 5,7 y 6,2, intervalo algo superior que en horizontes C, consecuencia de la naturaleza granítica del material original y de la influencia de la vegetación.

La proporción de *carbono orgánico* en horizontes A varía de 9,9 a 54,9 gkg⁻¹ según el aporte de restos orgánicos, siendo el humus mull eutrófico.

Los valores de *capacidad de intercambio catiónico* en A están en el intervalo 8-17 cmol+kg⁻¹, relacionados fundamentalmente con los contenidos en materia orgánica, influyendo en menor medida las proporciones de arcilla.

Componentes mayoritarios

La composición es óxidos de elementos mayoritarios es similar en horizontes A y C (Tabla 2), lo que indica la escasa evolución de estos suelos. Los contenidos en elementos mayoritarios son semejantes en todos los perfiles y reflejan la naturaleza mineralógica heredada del material

Horizonte A	Arcilla	Limo	A.gruesa	A.fina	pH _{agua}	C.O.	N	C/N	CIC
Media	6.4	8.6	66.7	18.2	5.89	28.2	2.3	11	12.8
Mínimo	2.4	3.7	37.0	10.5	5.72	9.9	1.3	8	8.6
Máximo	15.4	20.7	83.3	27.0	6.25	54.9	4.3	13	17.6
Horizonte C	Arcilla	Limo	A.gruesa	A.fina	pH _{agua}	C.O.	N	C/N	CIC
Media	6.2	7.9	65.5	20.4	5.57	9.3	0.9	10	6.8
Mínimo	3.6	5.0	46.2	17.0	5.13	6.1	0.6	9	5.3
Máximo	12.4	15.0	74.4	26.3	6.00	17.9	1.8	11	10.1

Tabla 1.- Valores estadísticos correspondientes al análisis granulométrico (%), pH, contenidos en C orgánico y N total (g kg⁻¹). Relaciones C/N. Capacidad de intercambio catiónico (cmol+kg⁻¹).

Table 1.- Statistical values of texture fractions (%), pH values, organic carbon and total N contents (g kg⁻¹). Relationships C/N. Cationic exchange capacity (cmol+kg⁻¹).

Perfil	Horizonte	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MnO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	PPC
CE-1	A	71.51	12.86	1.54	0.44	0.21	0.10	4.71	0.66	2.70	0.27	5.00
	C	72.60	13.81	1.76	0.35	0.23	0.09	4.82	0.78	2.56	0.33	2.66
CE-2	A	72.63	13.31	1.68	0.47	0.24	0.09	4.80	0.44	2.70	0.22	3.40
	C	72.78	13.71	1.77	0.41	0.24	0.10	4.74	0.43	2.70	0.16	2.95
CE-3	A	71.54	11.28	1.51	0.45	0.15	0.07	4.85	0.45	1.89	0.16	6.65
	C	74.54	12.66	1.69	0.29	0.18	0.06	5.20	0.29	2.02	0.06	3.00
CE-4	A	63.20	13.50	2.28	0.49	0.29	0.09	4.17	0.53	1.75	0.22	13.47
	C	68.62	14.61	2.25	0.33	0.28	0.08	4.94	0.45	1.89	0.16	6.40

Tabla 2.- Porcentajes en óxidos de elementos mayoritarios. Pérdida por calcinación (%).

Table 2.- Oxides porcentages of majority components. Loss by calcination (%).

original, en la que predomina cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa sódica y minerales micáceos.

Si se considera que el Al_2O_3 es un componente fijo durante el proceso de transformación roca-suelo, la relación de valores obtenidos para componentes mayoritarios frente a valores calculados, próximos a la unidad, dan idea de la débil

intensidad de alteración y de la escasa movilidad de los elementos (Tabla 3).

Contenidos de elementos traza

Existe similitud en los contenidos de elementos traza, igual que en los mayoritarios, en horizontes A y C (Figuras 1 a/b, 2 a/b, 3 a/b, 4 a/b) debido

Componente	Calculado	Obtenido	Obtenido-Calculado	Obtenido/Calculado
SiO ₂	67.13	69.72	2.59	1.04
Fe ₂ O ₃	1.74	1.75	0.01	1.01
CaO	0.32	0.46	0.14	1.44
TiO ₂	0.21	0.22	0.01	1.05
MnO	0.07	0.08	0.01	1.14
K ₂ O	4.59	4.63	0.04	1.01
MgO	0.46	0.52	0.06	1.13
Na ₂ O	2.13	2.26	0.13	1.06
P ₂ O ₅	0.17	0.22	0.05	1.29

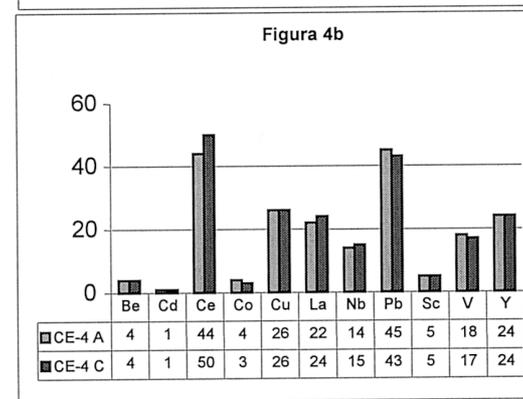
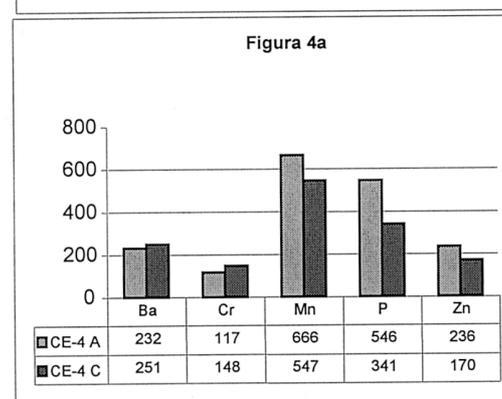
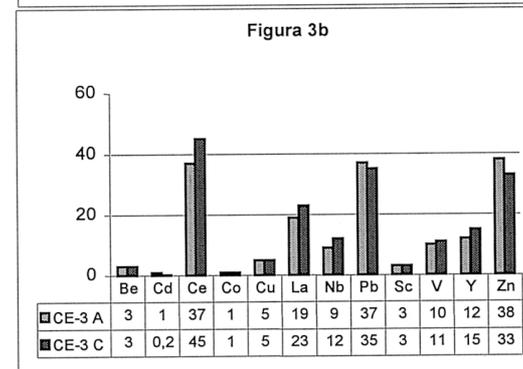
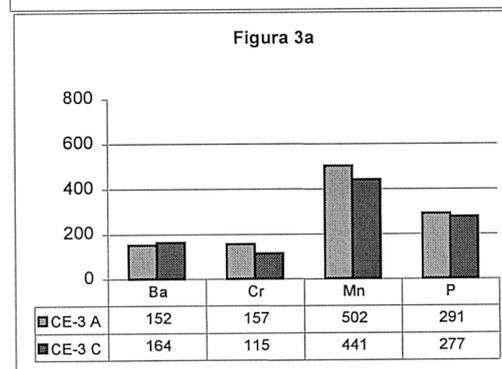
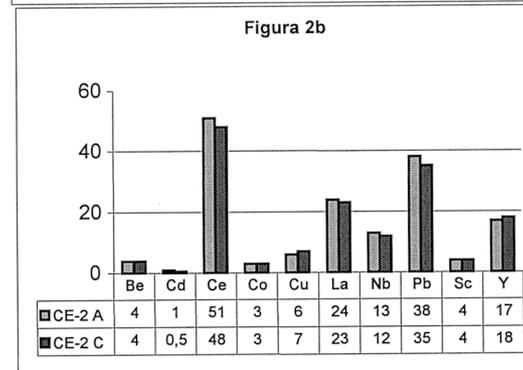
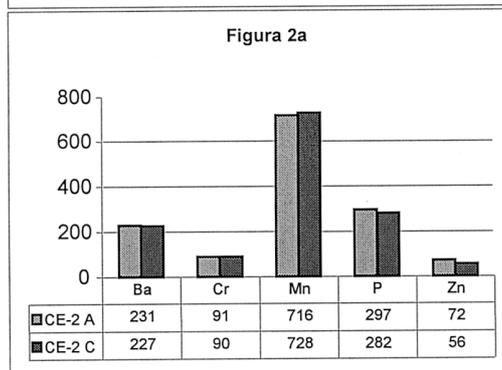
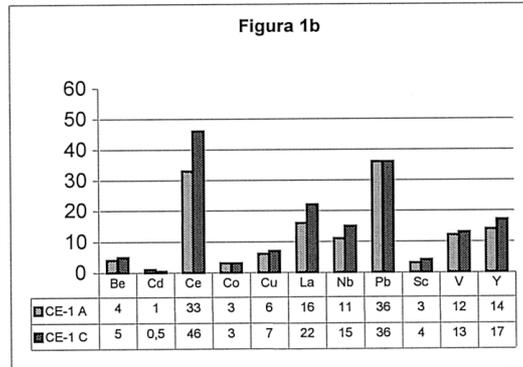
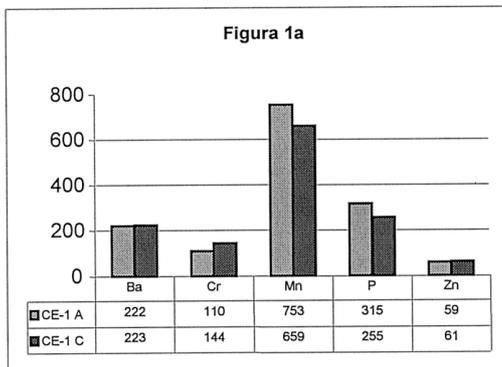
Tabla 3.- Valores medios de componentes mayoritarios considerando Al_2O_3 fijo.

Table 3.- Mean values of majority components when Al_2O_3 is considered fix.

Horizonte A	Ba	Be	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	La	Mn	Nb	P	Pb	Sc	V	Y	Zn
Media	209	4	0.9	41	3	119	11	20	659	12	362	39	3.7	13	16	101
X geométrica	206	4	0.9	41	2.5	116	8.3	20	652	12	349	39	3.7	13	16	79
S	38	0.5	0.2	8	1.3	28	8.7	3	111	2.2	123	4	0.9	3	5	91
Mínimo	152	3	0.9	33	1	91	5.2	16	502	9	291	36	3	10	12	38
Máximo	232	4	1.2	51	4	157	25.6	24	753	14	546	45	5	18	24	236
Horizonte C	Ba	Be	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	La	Mn	Nb	P	Pb	Sc	V	Y	Zn
Media	216	4	0.5	47	3	124	11.2	23	594	13	289	37	4	13	18.5	80
X geométrica	214	4	0.5	47	2	122	8.9	23	583	13.4	287	37	4	13	18.2	66
S	37	1	0.3	2	1	27	10	0.8	126	1.7	37	0.6	0.8	2.5	3.9	61
Mínimo	164	3	0.2	45	1	90	5.2	22	441	12	255	35	3	11	15	33
Máximo	251	5	1	50	3	148	26.3	24	728	15	341	43	5	17	24	170

Tabla 4.- Valores estadísticos de elementos traza en horizontes A y C.

Table 4.- Statistical values of trace elements in A and C horizons.



Figuras 1a, 2a, 3a, 4a.- Contenidos de elementos traza superiores a 50 mg kg⁻¹
 Figuras 1b, 2b, 3b, 4b.- Contenidos de elementos traza inferiores a 50 mg kg⁻¹
 CE: Cerceda. 1, 2, 3, 4: Perfiles. A, C: horizontes

a la ligera alteración química y a la escasez o falta de aportes contaminantes. Se observa que para Cd, Mn, P y Zn los contenidos medios son algo superiores en horizontes A (Tabla 4).

A partir de las proporciones de elementos traza se calculan los *índices de acumulación edáfica* (Tabla 5), relaciones entre los contenidos de elementos traza en A y C. Presentan en general valores iguales o inferiores a la unidad, dado el incipiente desarrollo de estos suelos y la escasez de aportes. Se observan valores algo superiores a la unidad para Cd, Mn, P y Zn, debido a la asociación de estos elementos con la materia orgánica, y puntualmente para Co y Cr. Elementos como el Ce, La e Y estarían en estructuras cristalinas sustituyendo isomórficamente a Ca^{2+} y Na^+ por similitud de radios iónicos, mientras que Nb y V estarían ocupando posiciones isomórficas de Fe^{2+} y Mg^{2+} .

B) Zona II (Torrelaguna, zona próxima al Pontón de la Oliva)

Parámetros edáficos:

Los suelos estudiados, Calcisoles háplicos (FAO, 1998), se han desarrollado a partir de material calcáreo (calizas arenosas y margosas), siendo la secuencia de horizontes A, B_{wkr} C.

Los valores medios de los resultados del *análisis granulométrico* (Tabla 6) indican predominio de la fracción arena (fundamentalmente arena fina) en todos los horizontes. Los *valores de pH* son

superiores a 7, incluso en horizontes A, con más bajo valor medio que en horizontes inferiores por influencia de la vegetación. Son suelos carbonatados con un horizonte B_{wkr} , con acumulación de CaCO_3 tanto *equivalente* como *activo* procedente del lavado de este componente desde horizontes superiores, por acción de la materia orgánica.

Los *contenidos en C orgánico* disminuyen intensamente en horizonte B. El humus es tipo mull carbonatado. Los valores de *capacidad del intercambio catiónico* son más elevados en horizontes organominerales, disminuyendo al profundizar, de lo que se deduce la influencia predominante de la materia orgánica.

Componentes mayoritarios

Los resultados expresados en la Tabla 7 (valores medios) ponen de manifiesto la pérdida de calcio por lavado de carbonatos durante el proceso de transformación de roca a suelo y posterior movilización a lo largo del perfil, formándose horizontes cálcicos en los que también aumenta el MgO. El resto de componentes por lo general experimentan un ligero incremento en el paso horizonte C \rightarrow horizontes superficiales.

Contenidos de elementos traza

En horizontes A se observan mayores concentraciones medias preferentemente de Mn, P, Pb y Zn, elementos que se asocian a la materia orgánica (Tabla 8). A partir de las proporciones de ele-

PERFIL	Ba	Be	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	La	Mn	Nb	P	Pb	Sc	V	Y	Zn
CE-1	1	0.8	1.9	0.7	1	0.8	0.9	0.7	1.1	0.7	1.2	1	0.7	0.9	0.8	0.9
CE-2	1.0	1	2.1	1.0	1	1.0	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	1.1	1	0.9	0.9	1.3
CE-3	0.9	1	3.9	0.8	1	1.4	1	0.8	1.1	0.8	1.0	1.1	1	0.9	0.8	1.1
CE-4	0.9	1	1.2	0.9	1.3	0.8	0.9	0.9	1.2	0.9	1.6	1.0	1	1.1	1	1.4

Tabla 5.- Índices de acumulación edáfica de elementos traza (relación de contenidos en elementos traza entre horizontes A y C).

Table 5.- Edafical accumulation indexes of trace elements (relationship between trace elements contents in A and C horizons).

Horizonte A	Arcilla	Limo	A.G.	A.F.	pH_{agua}	CaCO₃	CaCO₃ activo	C.O.	N	C/N	CIC
Media	26,4	15,1	4.2	54.3	7.73	120	1.5	37.4	3.8	10	39.6
Mínimo	7,8	9.1	3.5	45.0	7.04	86.5	0.8	15.9	2.4	8	27.6
Máximo	34.5	32.8	5.9	61.6	7.90	156	4	136.9	10	6	77.4
Horizonte B_{wk}	Arcilla	Limo	A.G.	A.F.	pH_{agua}	CaCO₃	CaCO₃ activo	C.O.	N	C/N	CIC
Media	22.4	15.4	5.6	56.7	8.28	301.4	15.8	5.7	1.4	5	17.1
Mínimo	17.1	9.9	4.8	43.9	8.20	253.5	7.3	4.5	0.5	2	14.8
Máximo	28.8	22.5	6.5	66.9	8.37	311.6	27.3	8.2	2.3	8	20.0
Horizonte C	Arcilla	Limo	A.G.	A.F.	pH_{agua}	CaCO₃	CaCO₃ activo	C.O.	N	C/N	CIC
Media	17.4	13.3	15.9	53.3	8.60	383.5	21.5	-	-	-	15.3
Mínimo	10.6	8.8	6.6	43.9	8.54	326.9	9.6	-	-	-	8.9
Máximo	28.5	20.9	20.77	58.28	8.66	439.6	29	-	-	-	23.9

Tabla 6.- Valores estadísticos correspondientes al análisis granulométrico (%), pH, CaCO₃(gkg⁻¹) y CaCO₃ activo (g kg⁻¹). Contenidos en C orgánico y N total (g kg⁻¹). Relaciones C/N. Capacidad de intercambio catiónico (cmol+kg⁻¹).

Table 6.- Statistical values of texture fractions (%), pH values, organic carbon and total N contents (g kg⁻¹). Relationships C/N. Cationic exchange capacity (cmol+kg⁻¹).

Horizonte A	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	TiO₂	MnO	K₂O	MgO	Na₂O	P₂O₅	PPC
Media	60.6	10.2	3.0	4.3	0.54	0.04	2.3	2.5	0.26	0.13	16.3
Mínimo	50.1	6.5	1.8	3.7	0.38	0.03	1.2	2.1	0.14	0.11	13.6
Máximo	65.3	12.5	3.4	6.1	0.58	0.05	2.6	3.8	0.37	0.15	32.8
Horizonte B_{wk}	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	TiO₂	MnO	K₂O	MgO	Na₂O	P₂O₅	PPC
Media	52.0	8.9	2.6	11.8	0.44	0.02	1.9	4.3	0.20	0.12	17.6
Mínimo	47.1	7.9	2.5	8.8	0.43	0.02	1.8	2.9	0.16	0.12	13.7
Máximo	61.5	10.3	2.8	13.8	0.5	0.03	2.0	5.1	0.27	0.12	19.5
Horizonte C	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	TiO₂	MnO	K₂O	MgO	Na₂O	P₂O₅	PPC
Media	57.7	8.3	1.9	13.3	0.45	0.012	1.8	2.5	0.08	0.10	13.7
Mínimo	51.1	6.8	1.5	8.1	0.44	0.009	1.5	2.3	0.07	0.09	10.9
Máximo	67.5	11.1	2.2	16	0.46	0.020	2.1	2.9	0.09	0.12	16.4

Tabla 7.- Análisis de óxidos de elementos mayoritarios. Pérdida por calcinación (%).

Table 7.- Analysis of oxides of majority elements. Loss by calcination (%).

Horizonte A	Ba	Be	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	La	Mn	Nb	P	Pb	Sc	V	Y	Zn
Media	236	2.6	0.17	58.1	7	24.5	7.6	29.3	335	12	459	29.1	5.1	33.9	9.9	26.6
Xgeométrica	220	2.2	0.17	54.4	6.0	21.9	7.6	27.5	309	11.7	446	30.6	4.5	30.8	9.5	27.8
S	48	0.9	0.03	9.7	2.2	7.9	0.4	5.2	59	1.6	71	4.2	1.6	10.2	1.7	5.4
Mínimo	148	1	0.136	38	3	11	7	19	219	9	368	26	2	18	7	23
Máximo	284	3	0.216	62	9	31	8	32	381	13	561	36	6	45	11	36
Horizonte C	Ba	Be	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	La	Mn	Nb	P	Pb	Sc	V	Y	Zn
Media	172	2	0.02	36	5	21	6.8	18.6	124	10	232	16	4.7	24.3	7.3	11
Xgeométrica	168	1.8	0.02	35.8	4.9	18.7	6.4	18.5	124	10.2	229	16	4.5	21.8	7.2	10.7
S	47.7	1	0.002	5.2	1	12.5	3.2	2.9	10.5	2.3	54.2	4.2	1.5	14.6	1.5	3.5
Mínimo	127	1	0.019	33	4	11	4.4	17	114	9	188	13	3	14	6	9
Máximo	222	3	0.023	42	6	35	10.5	22	135	13	293	21	6	41	9	15

Tabla 8.- Valores estadísticos de elementos traza en horizontes A y C.

Table 8.- Statistical values of trace elements in A and C horizons.

Perfil	Horizonte	Ba	Be	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	La	Mn	Nb	P	Pb	Sc	V	Y	Zn
T-1	A/C	1.3	3	1	1.8	1.4	1.4	1.3	1.7	3.3	1.3	1.9	2.0	1	1.8	1.4	2.4
	B _{wk} /C	1	3	1.7	1.2	1.2	1	1.0	1.2	2.3	1.2	1.1	1.4	0.9	1.1	1.1	1.2
T-2	A/C	1.3	0.7	6.6	1.4	1.1	1.4	1.7	1.4	2.0	1.4	2.0	2.3	1.1	1.6	1.3	2.5
	B _{wk} /C	1.5	1.5	2.2	1.7	1.5	1.8	1.2	1.7	2.3	1	1.5	2	1	1.7	1.6	1.4
T-3	A/C	1.2	1	8.4	1.4	1.3	0.9	0.7	1.4	2.6	0.94	2.1	1.4	1	1	1.2	2.2
	B _{wk} /C	1.1	1	3.2	1.1	1.1	0.8	0.8	1.1	1.9	0.92	1.5	1	1	0.9	1.1	1.5

Tabla 9.- Índices de acumulación edáfica de elementos traza (relación de contenidos en elementos traza entre los horizontes superiores y el horizonte C).

Table 9.- Edafical accumulation indexes of trace elements (relationships between contents in trace elements in top horizons and C horizons).

mentos traza se calcularon los índices de acumulación edáfica, (relaciones A/C y B_{wk}/C) (Tabla 9) con valores por lo general bajos, excepto para elementos como el Cd, Mn, P, Pb y Zn. Los hori-

zontes cálcicos (B_{wk}), donde se acumula CaCO₃, tienden a presentar menores proporciones de elementos traza que en horizontes A, como puso de manifiesto Baize (1998) en suelos de Francia.

MO	$y = 31,72 + 1,78x$	Coefficiente de	56,3734	Nivel de	Relación entre
CERCEDA	Ecuación de regresión lineal	correlación	R ² (%)	confianza (%)	variables
Cd - MO	$y = 0,50 + 0,008x$	0,7048	49,6867	90	moderada/ fuerte
Cu- Fe total	$y = -36,75 + 4,59x$	0,9528	90,7840	99	bastante fuerte
Arcilla	$y = -0,63 + 1,85x$	0,9690	93,8966	99	bastante fuerte
MO	$y = 4,73 + 0,19x$	0,6275	39,3795	90	moderada/ fuerte
Nb- Fe total	$y = 4,39 + 0,80x$	0,7354	54,0889	95	moderada/ fuerte
P- Fe total	$y = -30,25 + 34,20x$	0,7080	50,1325	95	moderada/ fuerte
Arcilla	$y = 222,78 + 16,30x$	0,853	72,8172	99	moderada/ fuerte
MO	$y = 233,55 + 2,80x$	0,9182	84,3154	99	bastante fuerte
Pb- Fe total	$y = 20,28 + 1,70x$	0,8673	75,221	99	moderada/ fuerte
Arcilla	$y = 33,45 + 0,74x$	0,9470	89,6822	99	bastante fuerte
MO	$y = 35,00 + 0,095x$	0,7623	58,1119	95	moderada/ fuerte
Sc- Fe total	$y = -0,27 + 0,40x$	0,9186	84,3944	99	bastante fuerte
Arcilla	$y = 2,92 + 0,15x$	0,8762	76,7844	99	moderada/ fuerte
V- Fe total	$y = -1,40 + 1,40x$	0,9603	92,2303	99	bastante fuerte
Arcilla	$y = 9,76 + 0,55x$	0,9539	90,9941	99	bastante fuerte
Y- Fe total	$y = -5,59 + 2,23x$	0,9797	96,0	99	bastante fuerte
Arcilla	$y = 12,29 + 0,85x$	0,9394	88,2571	99	bastante fuerte
Zn- Fe total	$y = -270,60 + 34,70x$	0,9175	84,198	99	bastante fuerte
Arcilla	$y = -1,77 + 14,66x$	0,9796	95,9786	99	bastante fuerte

El coeficiente de determinación R² se puede interpretar como la proporción de la varianza de "y" que puede atribuirse a la varianza de "x" siendo "x" e "y" conocidos.

Tabla 10.- Ecuaciones de regresión lineal entre elementos traza y parámetros edáficos.

Table 10.- Linear regression equations between trace elements and edafical parameters.

TORRELAGUNA		Ecuación de regresión lineal	Coefficiente de correlación	R² (%)	Nivel de confianza	Relación entre variables
Ba-	Fe total	$y = 62,20 + 10,00x$	0,9296	86,4245	95	bastante fuerte
	Arcilla	$y = 113,20 + 4,50x$	0,9650	93,1402	99	bastante fuerte
	MO	$y = 276,17 - 0,50x$	-0,8906	79,3336	95	moderada/ fuerte
Be-	Fe total	$y = -0,59 + 0,18x$	0,9468	89,6594	95	bastante fuerte
	Arcilla	$y = 0,52 + 0,08x$	0,8945	80,0236	95	moderada/ fuerte
Ce-	Fe total	$y = 22,41 + 2,03x$	0,9511	90,4613	95	bastante fuerte
	Arcilla	$y = 33,93 + 0,86x$	0,9349	87,4124	95	bastante fuerte
	MO	$y = 66,19 - 0,11x$	-0,9524	90,7141	95	bastante fuerte
Co-	Fe total	$y = -1,07 + 0,46x$	0,9639	92,9107	99	bastante fuerte
	Arcilla	$y = 1,57 + 0,19x$	0,9424	88,8130	95	bastante fuerte
	MO	$y = 8,72 - 0,02x$	-0,8959	80,2672	95	moderada/ fuerte
Cr-	Fe total	$y = -2,15 + 1,57x$	0,9079	82,4283	95	bastante fuerte
	Arcilla	$y = 5,03 + 0,74x$	0,9851	97,0509	99	bastante fuerte
La-	Fe total	$y = 10,91 + 1,00x$	0,9281	86,1549	95	bastante fuerte
	Arcilla	$y = 16,13 + 0,48x$	0,9766	95,3803	99	bastante fuerte
	MO	$y = 33,62 - 0,06x$	-0,9122	83,2167	95	bastante fuerte
Mn-	Fe total	$y = 126,69 + 11,80x$	0,9046	81,8418	95	bastante fuerte
	MO	$y = 372,87 - 0,59x$	-0,8360	69,8949	90	moderada/ fuerte
Pb-	MO	$y = 26,52 + 0,04x$	0,8693	75,5815	90	moderada/ fuerte
Sc-	Fe total	$y = -0,45 + 0,33x$	0,9036	81,6598	95	bastante fuerte
	Arcilla	$y = 1,01 + 0,15x$	0,9865	97,33	99	bastante fuerte
	MO	$y = 6,49 - 0,02x$	-0,8696	75,6250	90	moderada/ fuerte
V-	Fe total	$y = 0,35 + 1,97x$	0,8808	77,5912	95	moderada/ fuerte
	Arcilla	$y = 9,40 + 0,92x$	0,9552	91,2583	95	bastante fuerte
Y-	Fe total	$y = 4,22 + 0,33x$	0,9070	82,2820	95	bastante fuerte
	Arcilla	$y = 5,81 + 0,15x$	0,9687	93,8485	99	bastante fuerte

Tabla 10 (continuación)

Table 10 (continuation)

ECUACIONES DE REGRESIÓN Y DEDUCCIÓN DE VALORES DE REFERENCIA

Se han establecido las ecuaciones de regresión lineales $y = b + mx$ (Tabla 10) entre los contenidos de elementos traza de los horizontes A y los parámetros edáficos correspondientes del suelo standard, con el fin de saber si existen correlaciones entre ellos y en qué medida deben figurar dichos parámetros en el cálculo de los valores de referencia. Únicamente se tuvieron en cuenta aquellas relaciones que eran estadísticamente significativas (valor $p \leq 0,1$). En casi todos los casos las correlaciones son positivas, con un nivel de confianza elevado ($\geq 90\%$) y con coeficientes de correlación de 0,62 a 0,97.

El valor de la constante (b) de las ecuaciones de

regresión lineales es sustituido por el valor de fondo (VF) (Xg en el horizonte A en suelos CE y Xg ponderada en los 25 cm superiores en suelos T) (Tabla 11).

La variable (x) se sustituyó por la media geométrica (Xg) de cada parámetro edáfico considerado en el horizonte A cuando la distribución de los elementos traza y parámetros edáficos es logaritmo-normal (Tabla 12).

Mediante las ecuaciones de regresión se calcularon los valores de referencia para cada elemento traza a partir de la fórmula (1):

$$VR = NF + aMO + bFe + cA + dCC$$

donde se integran los parámetros edáficos que

Perfil	Ba	Be	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	La	Mn	Nb	P	Pb	Sc	V	Y	Zn
CE	206	4	0.9	41	2,5	116	8	20	652	12	349	39	4	13	16	79
T	220	2	0.17	54	6	22	7,6	28	309	12	446	31	4,5	31	9,5	28

Tabla 11.- Niveles de fondo (NF) de elementos traza en perfiles CE y T.

Table 11.- Background levels of trace elements in CE and T profiles.

Perfil		Horizonte A			
		Fe total	Arcilla	M. Orgánica	CaCO ₃
Cerceda	X	10.5	6,4	50,1	-
	Xgeométrica	9.8	4,8	40,9	-
	S	2.3	6,1	36,2	-
	Máximo	13.4	15,5	100,3	-
	Mínimo	8.4	2,4	17,1	-
Torrelaguna	X	16.1	26,4	65,6	120,2
	Xgeométrica	15	22	75,1	118,7
	S	4.6	10,6	82,5	29,4
	Máximo.	20.2	34,1	90,3	139,4
	Mínimo	8.7	23,8	43,9	95,5

Tabla 12.- Valores estadísticos de Fe total (%), arcilla (%), materia orgánica (g kg⁻¹) y CaCO₃ (g kg⁻¹) en horizontes A de suelos standard.

Table 12.- Statistical values of total Fe (%), clay (%), organica matter (g kg⁻¹) and CaCO₃ (gkg⁻¹) in A horizons of standard soils.

Ecuaciones de regresión			
CERCEDA	con sustitución de NF36 y parámetros edáficos	VR = NF + a(MO)+ b(Fe) + c(A)	VR= NF+2S
Zn	$y = 79 + 1,78 \times 41 = 152$	$VR = 79 + 11,57 \times 10 + 4,89 \times 5 + 0,59 \times 41 = 243,5$	$79 + 2 \times 91 = 261$
Ba			$206 + 2 \times 38 = 282$
Be			$4 + 2 \times 0,5 = 5$
Cd	$y = 0,9 + 0,008 \times 41 = 1,2$	$VR = 0,9 + 0,008 \times 41 = 1,2$	$0,9 + 2 \times 0,2 = 1,3$
Ce			$41 + 2 \times 8 = 57$
Co			$2,5 + 2 \times 1,3 = 5,1$
Cr			$116 + 2 \times 28 = 172$
Cu	$y = 8 + 4,59 \times 10 = 53,9$ $y = 8 + 1,85 \times 5 = 17,25$ $y = 8 + 0,19 \times 41 = 15,8$	$VR = 8 + 1,53 \times 10 + 0,62 \times 5 + 0,06 \times 41 = 28,9$	$8 + 2 \times 8,7 = 25,4$
La			$20 + 2 \times 3 = 26$
Mn			$652 + 2 \times 111 = 874$
Nb	$y = 12 + 0,80 \times 10 = 20$	$VR = 12 + 0,80 \times 10 = 20$	$12 + 2 \times 2,2 = 16,4$
P	$y = 349 + 34,2 \times 10 = 691$ $y = 349 + 16,3 \times 5 = 430,5$ $y = 349 + 2,8 \times 41 = 463,8$	$VR = 349 + 11,4 \times 10 + 5,4 \times 5 + 0,93 \times 41 = 528,3$	$349 + 2 \times 123 = 595$
Pb	$y = 39 + 1,7 \times 10 = 56$ $y = 39 + 0,74 \times 5 = 42,7$ $y = 39 + 0,095 \times 41 = 42,9$	$VR = 39 + 0,57 \times 10 + 0,25 \times 5 + 0,03 \times 41 = 47,2$	$39 + 2 \times 4 = 47$
Sc	$y = 4 + 0,4 \times 10 = 8$ $y = 4 + 0,15 \times 5 = 4,75$	$VR = 4 + 0,2 \times 10 + 0,075 \times 5 = 6,3$	$4 + 2 \times 0,9 = 5,8$
V	$y = 13 + 1,40 \times 10 = 27$ $y = 13 + 0,55 \times 5 = 15,75$	$VR = 13 + 0,7 \times 10 + 0,25 \times 5 = 20,75$	$13 + 2 \times 3 = 19$
Y	$y = 16 + 2,23 \times 10 = 38,3$ $y = 16 + 0,85 \times 5 = 20,25$	$VR = 16 + 1,12 \times 10 + 0,43 \times 5 = 29,4$	$16 + 2 \times 5 = 26$

Tabla 13.- Ecuaciones de regresión lineal entre elementos traza y parámetros edáficos en Cerceda. Nivel de confianza (90-99%). Cálculo de valores de referencia.

Table 13.- Linear regression equations between trace elements and adafical parameters in Cerceda. Confidence level (90-99%). Calculation of reference values.

Torrelaguna	ECUACIONES DE REGRESIÓN con sustitución de NF y parámetros edáficos	VR = NF + a(MO)+ b(Fe) + c(A)	VR= NF+2S
Ba	y = 220 + 10 x 15 = 370 y = 220 + 4,5 x 22 = 319 y = 220 - 0,5 x 75 = 183	VR = 220 + 3,3x15 + 1,5x22 - 0,17x75 = 290	220 + 2 x 48 = 316
Be	y = 2 + 0,18 x 15 = 4,70 y = 2 + 0,08 x 22 = 3,76	VR = 2 + 0,09 x15 + 0,04x22 = 4,2	2 + 2 x 0,9 = 3,8
Cd			0,17 + 2 x 0,03 = 0,23
Ce	y = 54 + 2,03 x 15 = 84,45 y = 54 + 0,86 x 22 = 72,92 y = 54 - 0,11 x 75 = 45,75	VR = 54+ 0,68x15 + 0,29x22 - 0,04x75 = 67,6	54 + 2 x 9,7 = 73,4
Co	y = 6 + 0,46 x 15 = 12,9 y = 6 + 0,19 x 22 = 10,2 y = 6 - 0,02 x 75 = 4,5	VR = 6+ 0,15x15 + 0,06x22 - 0,007x75 = 9,05	6 + 2 x 2,2 = 10,4
Cr	y = 22 + 1,57 x 15 = 45,6 y = 22 + 0,74 x 22 = 38,3	VR = 22 + 0,79 x15 + 0,37x22 = 41,9	22 + 2 x 7,9 = 37,8
Cu			7,6 + 2 x 0,4 = 8,4
La	y = 28 + 1,0 x 15 = 43 y = 28 + 0,48 x 22 = 38,56 y = 28 - 0,06 x 75 = 23,5	VR =28 + 0,33x15 + 0,16x22 - 0,02x75 = 37,97	28 + 2 x 5,2 = 38,4
Mn	Y = 309 + 11,8 x 15 = 486 y = 309 - 0,59 x 75 = 264,8	VR = 309 + 5,9x15 - 0,30x75 = 375	309 + 2 x 59 = 427
Nb			12 + 2 x 1,6 = 15,2
P			446 + 2 x 71 = 588
Pb	y = 31 + 0,04 x 75 = 34	VR = 31 + 0,04 x 75 = 34	31 + 2 x 4,2 = 39,4
Sc	y = 4,5 + 0,33 x 15 = 9,5 y = 4,5 + 0,15 x 22 = 7,8 y = 4,5 - 0,02 x 75 = 3	VR = 4,5 + 0,11x15 + 0,05x22 - 0,006x75 = 6,8	4,5 + 2 x 1,6 = 7,7
V	y = 31 + 1,97 x 15 = 60,55 y = 31 + 0,92 x 22 = 51,24	VR = 31 + 0,99 x15 + 0,46x 22 = 55,97	31 + 2 x 10,2 = 51,4
Y	y = 9,5 + 0,33 x 15 = 14,45 y = 9,5 + 0,15 x 22 = 12,8	VR = 9,5 + 0,17x15 + 0,08x22 = 13,8	9,5 + 2 x 1,7 = 12,9
Zn			28 + 2 x 5,4 = 38,8

Tabla 14.- Ecuaciones de regresión lineal entre elementos traza y parámetros edáficos en Torrelaguna. Nivel de confianza (90-99%). Cálculo de valores de referencia.

Table 14.- Linear regression equations between trace elements and edafical parameters in Torrelaguna. Confidence level (90-99%). Calculation of reference values.

intervienen en la absorción/desorción de metales (materia orgánica, oxihidróxidos de Fe, arcilla y carbonato cálcico). "a, b, c y d" corresponden a la media de las pendientes (m) de las rectas de regresión dividida por su factor de contribución según el número de variables consideradas (MO, Fe, A y/o CC) (IHOBE, 1993). NF corresponde al nivel de fondo.

La media de los valores de referencia resultantes se compara con el valor obtenido mediante la fórmula empírica (2): $VR = NF + 2S$, donde S es la desviación típica o estándar del elemento traza en el horizonte superior. Esta fórmula es utilizada

cuando no existen correlaciones estadísticamente significativas entre los parámetros edáficos y los contenidos en elementos traza (IHOBE, 1993).

En base a la medida resultante de estas fórmulas (1) y (2) (Tablas 13 y 14) se propusieron unos valores de referencia con un margen de un $\pm 10\%$ (Tabla 15).

CONCLUSIONES

Los niveles litológicos de elementos traza (conte-

Elemento	VR = VF + aMO + bFe + cA + dCC		VR = VF + 2S		VR Propuesto	
	Cerceda	Torrelaguna	Cerceda	Torrelaguna	Cerceda	Torrelaguna
Ba	-	290	282	316	283 ± 30	303 ± 30
Be	-	4	5	4	5 ± 0,5	4 ± 0,5
Cd	1,2	-	1,3	0,23	1,3 ± 0,13	0,23
Ce	-	68	57	73	57 ± 6	71 ± 7
Co	-	9	5,1	10	5 ± 0,5	10 ± 1
Cr	-	42	172	38	172 ± 20	40 ± 4
Cu	29	-	25	8	28 ± 3	8 ± 1
La	-	38	26	38	26 ± 3	38 ± 4
Mn	-	375	874	427	874 ± 90	401 ± 40
Nb	20	-	16	15	18 ± 2	15 ± 2
P	528	-	595	588	562 ± 60	588 ± 60
Pb	47	34	47	39	47 ± 5	37 ± 4
Sc	6	7	6	8	6 ± 1	8 ± 1
V	21	56	19	51	20 ± 2	54 ± 5
Y	29	14	26	13	28 ± 3	14 ± 2
Zn	244	-	261	39	253 ± 30	39 ± 4

Tabla 15.- Valores de referencia propuestos en material granítico (Cerceda) y material carbonatado (Torrelaguna).

Table 15.- Proposed reference values in granite material (Cerceda) and carbonate material (Torrelaguna).

nidos en horizontes C) en materiales graníticos son superiores a los de materiales carbonatados, a excepción del V.

Los índices de acumulación edáfica en ambas zonas son próximos a la unidad, lo que indica la falta de aportes externos. Los valores de índices son superiores en suelos desarrollados sobre material carbonatado a pesar de que presentan niveles litológicos inferiores, debido a la influencia de materia orgánica, arcilla y carbonato cálcico en la retención de estos elementos.

Los valores de niveles de fondo en Cr, Mn Y y Zn en suelos desarrollados sobre material carbonatado son muy inferiores a los que presentan los suelos desarrollados sobre material granítico.

El elevado valor de fondo dado para el Mn en suelos ácidos es consecuencia del contenido de este elemento en el material litológico.

Los valores de referencia obtenidos aplicando las fórmulas empíricas $VR = NF + a(MO) + b(Fe) + c(A)$ y $VR = NF + 2S$ son similares para estos suelos no agrícolas y sin contaminación.

Los valores de referencia propuestos para suelos sobre material granítico son semejantes a los de material carbonatado, excepto para Cr, Cu, Mn, Y y Zn, superiores en suelos sobre material granítico, consecuencia del contenido de estos elementos en el material litológico.

La anormalmente elevada proporción de Zn dada

como valor de referencia en suelos ácidos, podría deberse a la existencia de otros materiales con mayor contenido en arcilla en alguno de los suelos de la zona.

REFERENCIAS

- Baize, D. 1998. *Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols. France*. Institut National de la Recherche Agronomique.
- Droineau, 1943. *Ann Agro*, 1, 16-18.
- FAO, 1998. *World reference base for soil resources*. Roma.
- IHOBE, 1993. *Calidad del suelo. Valores Indicativos de Evaluación*. Ed. Gobierno Vasco. Departamento de Urbanismo, Vivienda y Medio Ambiente.
- ISRIC, 1993. *Procedures for Soil Analysis*. Wageningen.
- ITGE, 1988. *Atlas Geocientífico del Medio Natural de la Comunidad de Madrid*. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid.
- LABO, 1995. *Soil Background and Reference Values in Germany*. Commission of Federal Environmental Agency (ALP-NET).
- Rivas Martínez, S. 1982. *Memoria del Mapa de Series de Vegetación de la Provincia de Madrid*. Diputación de Madrid.
- TCB, 1987. *List of Soil Quality Reference Values. Technical Soil Protection Committee*. Environmental Program of The Netherlands.
- Vegter, J.J. 1995. *Soil Protection in the Netherlands*. In Salomon, W., Föster, V. and Mader, P (Eds).
- VROM, 1991. *Environmental Quality standards for soil and water. Ministry of Housing, Physical Planning and Environment*. The Hague.
- Original recibido: Julio de 2000.
Original aceptado: Octubre de 2000.