

INFLUENCIA ANTROPOGÉNICA EN LA EXISTENCIA DE ANOMALÍAS GEOQUÍMICAS DE FORMACIONES SUPERFICIALES

*[Anthropogenic influence on the existence of geochemical anomalies
in surface formations]*

María Nuria BERNAL (*)

María Dolores PEREIRA (*)

José FORTEZA (**)

(*): Dpto. de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Salamanca

(**): IRNA-CSIC. C/ Cordel de Merinas, 40-52. 37008 Salamanca

(FECHA DE RECEPCIÓN: 2003-11-13) (FECHA DE ADMISIÓN: 2003-11-18)

BIBLID [0211-8327 (2003) 39: 37-54]

RESUMEN: El estudio de las concentraciones de elementos químicos, tanto mayores como trazas, en un perfil transversal de la antigua carretera N-630, en las proximidades de Béjar (Salamanca), ha permitido apreciar y diferenciar, si las variaciones geoquímicas encontradas en dichos suelos se deben a causas intrínsecas al sustrato sobre el que se desarrollan, o por lo contrario se deben a la influencia de las actividades antropogénicas desarrolladas en sus cercanías.

Palabras clave: Metales pesados, geoquímica, suelo, carretera, Béjar (Salamanca).

ABSTRACT: Chemical concentration, including mayor and trace elements, in a section profile from the N-630 road, in the proximity of Béjar (Salamanca), has allowed us to identify and study whether the geochemical differences found in such soils are due to intrinsic characteristic of the sustrato or, on the contrary, are due to the anthropogenic activities taking place on the surrounding areas.

Key words: Heavy metals, geochemistry, soil, road, Béjar (Salamanca, Spain).

INTRODUCCIÓN

Los elementos minoritarios que se encuentran en los suelos evolucionan en su concentración según la evolución del suelo. El aumento de la concentración de algunos elementos puede hacer que éstos sean tóxicos para los organismos. Dentro de este grupo de elementos son muy importantes los denominados *metales pesados*. Algunos en pequeñas dosis pueden ser beneficiosos para los organismos vivos y, de hecho, son utilizados como micronutrientes, pero pasado un umbral se convierten en elementos nocivos para un determinado ecosistema, y en muchos casos, un peligro para las plantas que en ellos se desarrollan, así como para los animales que las ingieren, quedando incorporados a la cadena trófica.

Los datos químicos obtenidos en este trabajo se compararon con los que la Normativa Holandesa estima como *valores objetivo* y *valores de intervención*, que son los que se toman como referencia en toda Europa. Dicha comparación tiene como objetivo una mera interpretación preliminar, puesto que esta Normativa utiliza un protocolo analítico distinto del que se ha seguido en la elaboración de este trabajo. Según esta Normativa, se denomina *valor objetivo* a aquel valor para el cual un suelo es apto para una función determinada; *valor de intervención* es el valor que indica una clara contaminación y a partir del cual habría que elaborar un protocolo de recuperación, diferente para cada tipo de actividad a la que se quiere someter al suelo. El establecimiento de niveles estándar de elementos traza para la valoración de la contaminación del suelo, constituye el principal requisito de calidad y protección de las funciones agrícolas y ecológicas (KABATA PENDIAS & PENDIAS, 1992; KABATA PENDIAS, 1995; MARTIN, 2000; PÉREZ *et al.*, 2000).

El área objeto de estudio se encuentra en la parte sur-occidental de la Comunidad de Castilla y León, dentro la provincia de Salamanca, concretamente en la antigua carretera N-630 en las proximidades de Béjar, dentro de la Hoja 553-III (Béjar) del Mapa Topográfico Nacional de España a escala 1:25.000.

OBJETIVOS

Este trabajo tiene como objetivo fundamental identificar si las variaciones geoquímicas que se producen en los suelos se deben a la composición del sustrato sobre el que se desarrollan, o bien si varían por influencia de las actividades antropogénicas desarrolladas en las cercanías de un importante foco de contaminación: la antigua carretera N-630, la cual tuvo en su día gran densidad de tráfico.

Con ello se pretende examinar si existe una gradación entre las concentraciones de metales pesados en los suelos con relación a la distancia del foco contaminante, además de ver la relación entre la geoquímica del suelo muestreado y el sustrato granítico del que procede. Además, se intentará hacer una comparación aproximada de los datos químicos obtenidos con los que la Normativa Holandesa estima como *valores objetivo* y *valores de intervención*.

ANTECEDENTES

Hay numerosa bibliografía sobre estudios referidos a contenidos de diferentes metales pesados en suelos y plantas en los entornos próximos a vías de comunicación, entre los que pueden citarse los de LAGERERFF & SPECHT, 1970; GISH & CHRISTENSEN, 1973; ÁLVAREZ GONZÁLLZ, 1978; SANCHIDRIÁN & MARIÑO, 1980.

El aprovechamiento de los recursos naturales y el imparable aumento de la actividad industrial, así como todo tipo de acciones que conllevan a una mejora en el nivel de vida de la sociedad, ha producido en todas las épocas pérdidas más o menos importantes de los propios recursos y de la calidad ambiental, como hemos visto en el punto anterior. Todo esto ha dado lugar a un aumento en la preocupación de los ciudadanos y autoridades competentes por el efecto que esta utilización de los recursos naturales y el aumento de las actividades industriales, evidentemente producen en el medio ambiente. Entre los muchos agentes contaminantes que, debido a la actividad del hombre, se

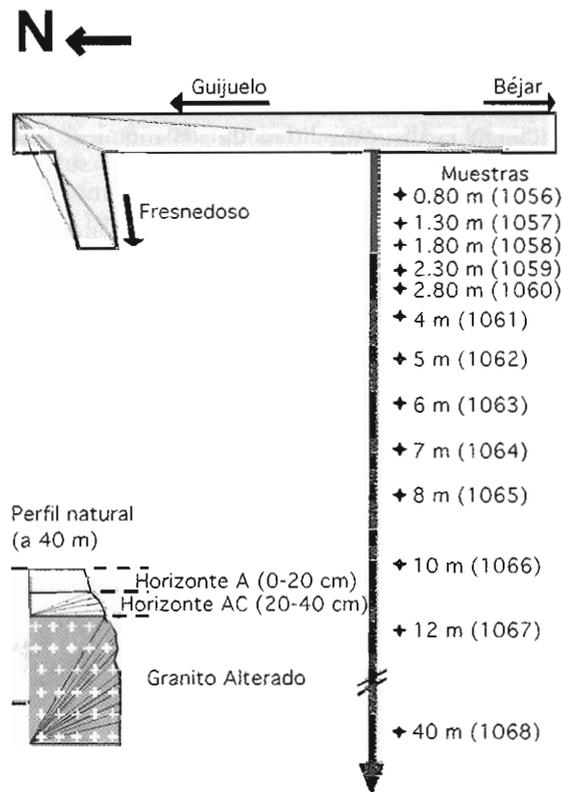


Figura 1. Situación y profundidad de las muestras analizadas respecto a la antigua carretera N-630.

vierten al suelo, agua y atmósfera, modificando las condiciones naturales del medio ambiente, se encuentran los metales pesados (Zn, Pb, Cu y Cd, especialmente), que tienen gran importancia por su efecto nocivo y carácter acumulativo hasta una profundidad de 35 a 40 cm (SANCHIDRIÁN & MARIÑO, 1979; SEOÁNEZ CALVO, 2000). La acumulación máxima de estos metales se concentra en la superficie (primeros centímetros), por lo que el problema se presenta cuando se quiere saber si la parte asimilable sigue el mismo proceso de distribución o si éste es completamente distinto. Varios autores coinciden en afirmar que la concentración de las fases asimilables permanece invariable durante años, presentándose en el suelo como contaminantes persistentes e irreversibles, lo que puede dar origen a graves perturbaciones, tanto en los vegetales como en los animales que los consuman (SEOÁNEZ CALVO, 2000). Existe en la actualidad un número amplio de referencias sobre la calidad del aire y del agua, y también hay numerosos trabajos sobre las consecuencias que un aumento en la acidez produce en los suelos.

Los suelos son el principal agente protector de los sistemas hídricos y biológicos superficiales. Por esto es muy importante conocer sus características, además de su capacidad para neutralizar los ácidos, y en el caso de que se observen irregularidades en su composición, actuar a tiempo para que no se altere su capacidad tampón o amortiguadora (SEOÁNEZ CALVO, 1999). Al mismo tiempo, varios investigadores afirman que el intercambio de cationes y las quelaciones de la materia orgánica son los principales procesos que facilitan la disponibilidad de los metales. Esta disponibilidad facilita o dificulta el mecanismo de sorción cuando sube el pH del suelo (SEOÁNEZ CALVO, 1999-2000).

La contaminación de suelos puede ocurrir mediante diversas vías: a través de fuentes que dispersan los metales pesados, o bien a través de fuentes puntuales que originan la acumulación de éstos en áreas restringidas (GONZÁLEZ HERNÁNDEZ *et al.*, 2002). Como ejemplos de ambos tipos de fuentes, podemos citar la polución que genera el tráfico como contaminante difusor, y los residuos de las fábricas como contaminación puntual. En este trabajo vamos a enfocar nuestro estudio en la caracterización geoquímica de un perfil horizontal, tomado al borde de una carretera.

En trabajos anteriores realizados en la provincia de Salamanca, se determinó la existencia de variaciones geoquímicas dependiendo del sustrato sobre el que se desarrollaba la formación superficial o de que se hallase la zona muestreada cerca de un foco contaminante (GONZÁLEZ HERNÁNDEZ *et al.*, 2002; BERNAL *et al.*, 2001). También se observó que la concentración variaba dependiendo del horizonte donde nos encontremos, pudiéndose determinar máximos a una determinada distancia y profundidad del foco contaminante (GONZÁLEZ HERNÁNDEZ *et al.*, 2002).

Son varias las fuentes de emisión de un automóvil: el tubo de escape (por donde se emiten la mayoría de los contaminantes), el cárter, el depósito de combustible y el carburador, siendo los principales contaminantes emitidos por los vehículos automóviles el CO, NO, NO₂, hidrocarburos, partículas, plomo y SO₂.

* **Las partículas:** En los motores de gasolina la emisión de partículas no es significativa. Las emisiones son de tres clases: plomo, partículas orgánicas (incluido el hollín) y sulfatos (este último caso cuando hay catalizadores de oxidación).

Es en los motores diesel donde la formación de partículas adquiere importancia. Durante el proceso de combustión, al alcanzarse elevadas presiones (de 50 a 100 atm) y temperaturas (de 1.000 a 2.800 °K) con falta de oxígeno, puede suceder que la cadena del hidrocarburo comience a fracturarse y deshidrogenarse, quedando fácilmente convertida en carbono.

* **El plomo:** Se utiliza en la fabricación de baterías, de municiones, en la industria plúmbica, como anticorrosivo, en las pinturas de exterior, etc., si bien actualmente una de las principales fuentes de plomo como consecuencia de la actividad humana la constituye la combustión de gasolinas que lo contienen como aditivo, principalmente en forma de plomo tetraetilo ($C_2H_5)_4Pb$, siendo la cantidad de Pb variable según el octanaje y legislación de cada país (SANCHIDRIÁN & MARINO, 1979). Durante el proceso de combustión esta sustancia reacciona dando, entre otros compuestos, óxidos de plomo que se depositan en válvulas, bujías y paredes de la cámara de combustión, lo que afecta al funcionamiento del motor debido principalmente a la aparición de puntos calientes.

Por ello, uno de los ecosistemas más afectados lo constituye el entorno de las autopistas y carreteras con gran densidad de tráfico, identificando los compuestos de plomo además del sulfato como compuesto mayoritario (OLSON & SKOGERBE, 1975; SANCHIDRIÁN & MARINO, 1979).

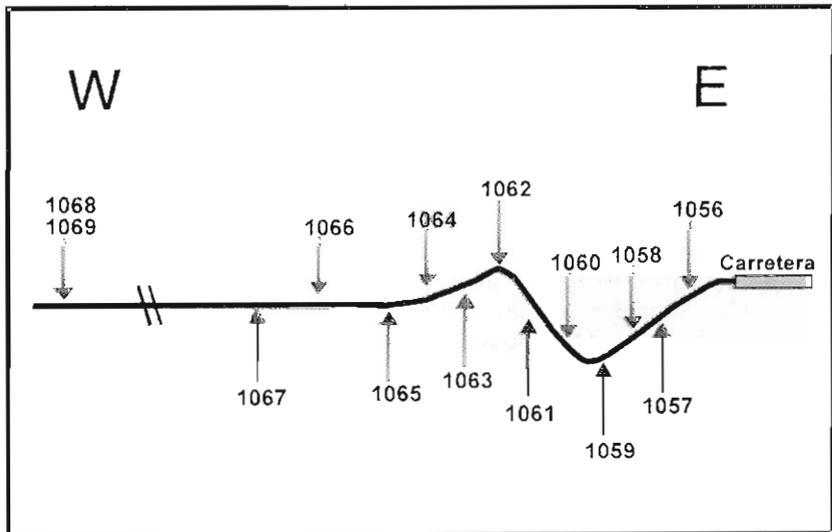


Figura 2. Perfil transversal de la antigua carretera N-630, y situación de las muestras analizadas.

Así pues, el Pb procedente de las gasolinas pasa al suelo por sedimentación y precipitación de las partículas ya citadas, con mayor concentración en las zonas más próximas a las autopistas, dependiendo también de variables como son la densidad de tráfico, la edad de las carreteras, la dirección y velocidad de los vientos, tipo de suelo, tipo de vehículos, etc. La movilidad del Pb es escasa debido a la naturaleza insoluble de los compuestos bajo cuyas formas se encuentra en el suelo, quedando por tanto limitada su acumulación a los primeros centímetros de la superficie (SANCHIDRIÁN & MARIÑO, 1979-1980).

* **El cadmio y cinc:** El cadmio se encuentra en la naturaleza generalmente asociado al cinc y ambos son ampliamente utilizados por el hombre. En la industria automovilística se utilizan en la fabricación de radiadores y baterías, en la galvanización de tanques y conducciones, como antioxidante en los aceites y también en el proceso de vulcanización de los neumáticos. Por lo cual, estos elementos también se hallan como contaminantes en los entornos de las autopistas y carreteras (SANCHIDRIÁN & MARIÑO, 1979 y 1980).

El cadmio es un elemento de gran toxicidad y de fácil asimilación por las plantas y, al igual que con el plomo, la absorción es función del tipo de suelo.

* **El níquel, cromo y cobre:** Estos tres elementos son utilizados en multitud de industrias. En los automóviles se utiliza el níquel en las baterías, magnetos, contactos y electrodos. El cromo se usa como anticorrosivo y el cobre en todo el sistema eléctrico. Por lo cual se puede originar un aumento de concentración de estos elementos en los lugares próximos a carreteras con gran densidad de tráfico (SANCHIDRIÁN & MARIÑO, 1979 y 1980).

La Geomedicina estudia los grupos de elementos que pueden ocasionar trastornos orgánicos de un mismo tipo, bien sea por su exceso o por su defecto. Algunos elementos que presentan características comunes entre ellos, como el V, el Mo, el Ba, el Na, el S, el Si, el Al y el Ni, que son esenciales para algunos organismos pero pueden llegar a ser tóxicos cuando su concentración es alta o forman parte de otros compuestos. Incluso el cobre y el fósforo, que en bajas concentraciones son necesarios, tienen un efecto letal en dosis altas (REIMANN & CARITAT, 1998).

El litio, el potasio, el cinc, el manganeso y el magnesio son elementos esenciales, teniendo en común que no son elementos tóxicos bajo circunstancias normales, siendo las deficiencias un problema más extendido que las ocasionadas por toxicidad (SANCHIDRIÁN & MARIÑO, 1979-1980; REIMANN & CARITAT, 1998; GARCÍA & DORRONSORO, 2002). El hierro es esencial, pero puede llegar a ser tóxico para el hombre si se ingiere agua con niveles mayores de 200 mg/l (REIMANN & CARITAT, 1998). En el caso del cromo, el componente Cr⁶⁺ es extremadamente tóxico, y algunos de sus compuestos son altamente cancerígenos. Mientras, la acción dañina del cadmio se debe a su capacidad de sustitución en el organismo de Cu, Fe y Al. En el caso del plomo, su acción tóxica se produce por acumulación en el hígado, pulmón, encéfalo y huesos (SANCHIDRIÁN & MARIÑO, 1979 y 1980; REIMANN & CARITAT, 1998).

El berilio y el estroncio son tóxicos en todos los casos, pudiendo llegar a ser cancerígenos.

Por último, el calcio es el mayor nutriente y en ningún caso tóxico (REIMANN & CARITAT, 1998; TARVAJINEN, 1996).

MATERIAL Y MÉTODOS

Es importante determinar el material geológico sobre el que se desarrollan las formaciones superficiales, puesto que determinados elementos traza pueden acumularse preferentemente en determinados minerales constituyentes de la roca. Al poner en disolución la muestra, parte de estos elementos pasan a la solución, sin tener ninguna relación con la actividad antropogénica que pudiera haber influido en las características geoquímicas del suelo.

Las principales unidades de suelos encontrados en la zona de estudio corresponden a Leptosoles úmbricos desarrollados sobre granitos. Son suelos delgados, limitados en profundidad por una roca continua sin otros horizontes de diagnóstico más que un horizonte A úmbrico, con o sin horizonte B cámbico.

Las características físicas y químicas de los suelos son las siguientes:

- Se trata de suelos arenosos con un 80% de arena en superficie y un 85% en profundidad, que ocasiona una permeabilidad elevada.
- Tienen una elevada acidez, con pH aproximado a 5,5, y contenido medio en materia orgánica del 3%, que desciende fuerte y drásticamente hasta 0,3% a los 40 cm de profundidad, bajando la capacidad de intercambio catiónico de acuerdo con los contenidos en arcilla y materia orgánica.

Las muestras han sido preparadas siguiendo dos metodologías distintas: preparación de las muestras en disolución parcial y preparación de las muestras en disolución total.

TRABAJO DE CAMPO: RECOGIDA DE MUESTRAS

En la antigua carretera N-630 se han analizado 12 muestras del horizonte A del suelo, que representan los 10 cm superiores del mismo, tomadas perpendicularmente a la dirección de la carretera y hasta una distancia de 12 metros de la misma (figuras 1 y 2). También se han analizado 2 muestras más de los horizontes A (0-10 cm) y AC (20-30 cm) de un perfil edáfico natural situado a una distancia de unos 40 metros de la carretera, tomando esta distancia como nivel de referencia donde la actividad de la carretera no hubiese afectado a la composición química del suelo. El muestreo se ha realizado en los meses de julio y agosto para evitar un exceso de agua de lluvia y con ello endurecer el proceso de secado en el laboratorio. Las muestras se han introducido en bolsas de plástico, en cantidad aproximada

de 2 kg, numeradas de forma que pudieran relacionarse fácilmente. Al mismo tiempo, se elaboraba una ficha, con datos sobre la distancia y profundidad a la que se tomaban las muestras con respecto a la carretera.

TRABAJO DE LABORATORIO

Para cumplir los objetivos del trabajo, las muestras han sido preparadas para estudiarlas en disolución parcial y en disolución total, siguiendo metodologías distintas:

Preparación de las muestras para su análisis en disolución parcial:

Las muestras húmedas fueron colocadas sobre papel de filtro en el laboratorio, disgregando a mano, si era posible, los terrones existentes. Se mantenían a temperatura ambiente hasta que se secaban.

Las muestras se tamizaron con una malla de 0,75 mm de luz (correspondiente a arena de tamaño grueso y menores), almacenando sólo la porción que pasaba por el tamiz.

Se pesaron 5 gr de muestra seca y tamizada en una balanza SAC-63, introduciendo éstos en vasos de precipitado de 100 ml de capacidad.

Su puesta en disolución consistió en añadir 50 ml de ClH 0,1 M con un dosificador POLIFIX 50 ml. Esta solución se ha sometido a agitación y calentamiento durante dos horas y media en un agitador orbital ROTATERM a 50 °C y 140 rpm, intentando emular condiciones extremas a las que puedan estar sometidos los suelos, afectados por lluvias y aguas de escorrentía ácidas.

Una vez obtenida la disolución parcial de la muestra, se filtró en matraces y se enrasaron con ClH hasta los 50 ml. La solución resultante se introdujo en frascos que se llevaron al laboratorio para su análisis.

Preparación de las muestras para su análisis en disolución total:

Se machacó toda la muestra, primero con una machacadora de mandíbulas de acero endurecido RECI, y posteriormente con un molino de aros excéntricos HERZOG, en mortero de acero endurecido.

Una vez reducido el tamaño, la muestra fue atacada con una mezcla de ácido nítrico y fluorhídrico.

Posteriormente, fue calentada en un horno microondas de alta presión.

El análisis químico se ha realizado con un ICP-ES, en el Servicio de Análisis Químico de la Universidad de Salamanca, al igual que las muestras analizadas mediante disolución parcial. Se han determinado un total de 26 elementos, entre mayores y traza.

RESULTADOS

Los elementos analizados en las muestras de estudio son Si, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, Ti, P, Ba, Sr, S, Zn, Li, Cu, Cr, V, Be, Mo, Ni, Pb, Cd, Co, As, Se. Los datos adquiridos para algunos de ellos (P, S, As y Se), están muy cerca del límite de detección del método analítico utilizado, por lo que han de utilizarse con precaución.

1.1. COMPORTAMIENTO DE LOS ELEMENTOS EN LAS MUESTRAS DE SUELO EN DISOLUCIÓN PARCIAL

En lo que hace referencia a las muestras tomadas en carretera y los resultados obtenidos en el análisis de disolución parcial, se observan varios tipos de comportamientos muy bien diferenciados que corresponden a los siguientes:

El Zn, el Cu, el Ni y el Pb presentan un comportamiento muy parecido, caracterizado por presentar las mayores concentraciones hasta los 2,30 m de distancia de la carretera, continuando con una tendencia al descenso hasta la muestra recogida en el horizonte A del perfil de referencia localizado a 40 m. Hay que señalar, además, que todos ellos muestran un pico en la muestra situada a 1,30 m.

El Ba y el Sr presentan, en general, una conducta paralela, dando las concentraciones más bajas en el intervalo de entre 1,30 m y 2,30 m de la carretera. Igual que el Mo, siempre se sitúan muy cerca de los valores que presenta la muestra del horizonte A del perfil de referencia, sin variaciones importantes.

El Co y el V muestran la concentración más alta a 0,80 m de la carretera, presentando sus valores más altos hasta los 5 m (de forma similar al S). A partir de dicha distancia, los valores siguen una tendencia al descenso hasta los 10 m, donde sufren un ligero aumento hasta llegar al perfil de referencia.

El Ca y el K presentan las concentraciones más bajas hasta los 2,30 m, teniendo la mínima a 1,30 m de distancia. A partir de esos 2,30 m los valores tienden a aumentar, teniendo picos por encima de la muestra del horizonte A del perfil de referencia.

El Ti, el Li y el Cr mantienen un comportamiento muy similar al de los elementos anteriores. Hasta los 2,30 m de la carretera presentan las mayores concentraciones (excepto el Cr, que presenta un pico a los 7 m), mientras que a partir de los 2,80 m van disminuyendo y se sitúan muy próximas a los niveles observados en el perfil de referencia. El Li y el Cr siempre presentan concentraciones por encima de las obtenidas en el perfil de referencia, pero hay que tener en cuenta que todos los valores están muy cercanos al límite de detección del método analítico.

Los elementos restantes no siguen un comportamiento determinado, por lo que no se hace mención de ellos en este apartado.

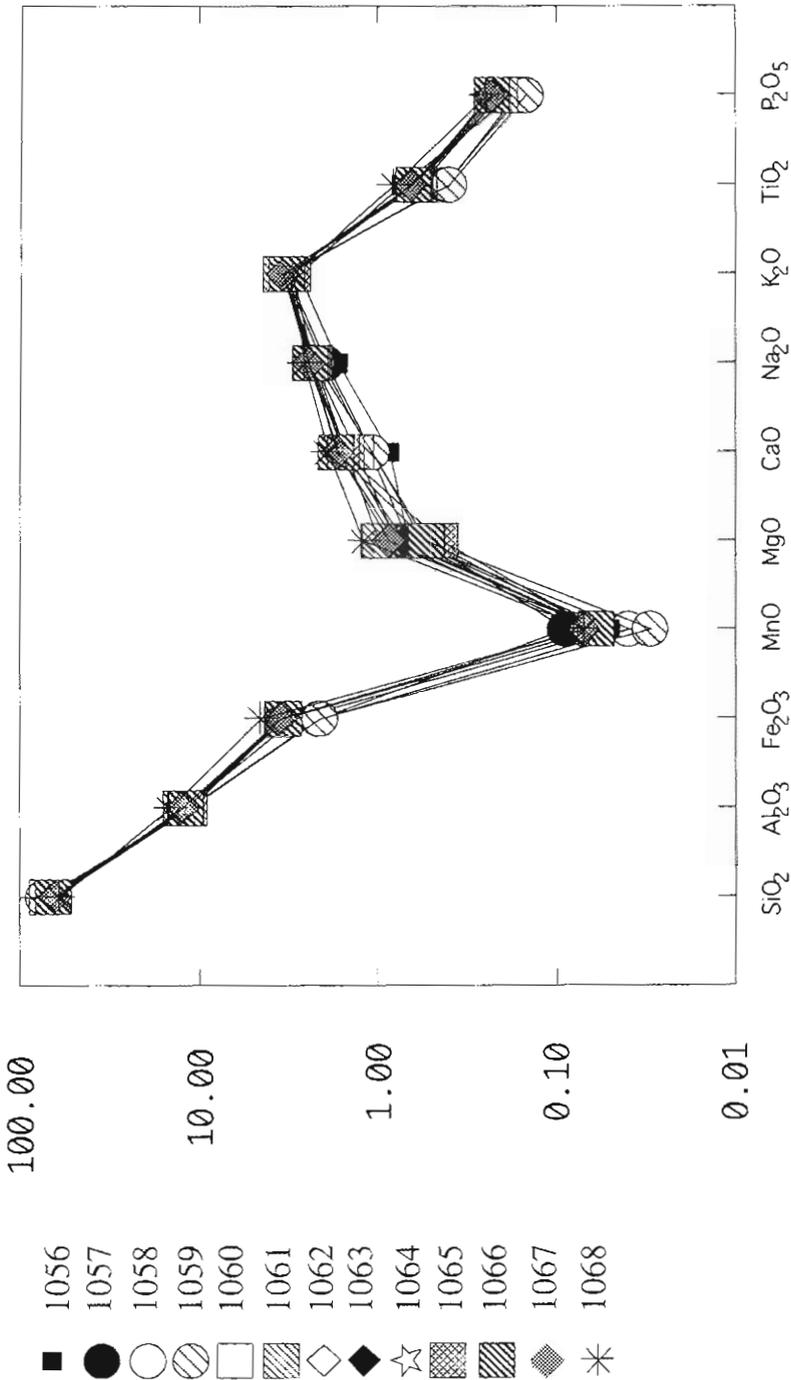


Figura 3. Representación de los datos de elementos mayores en disolución total. Las concentraciones figuran en escala logarítmica.

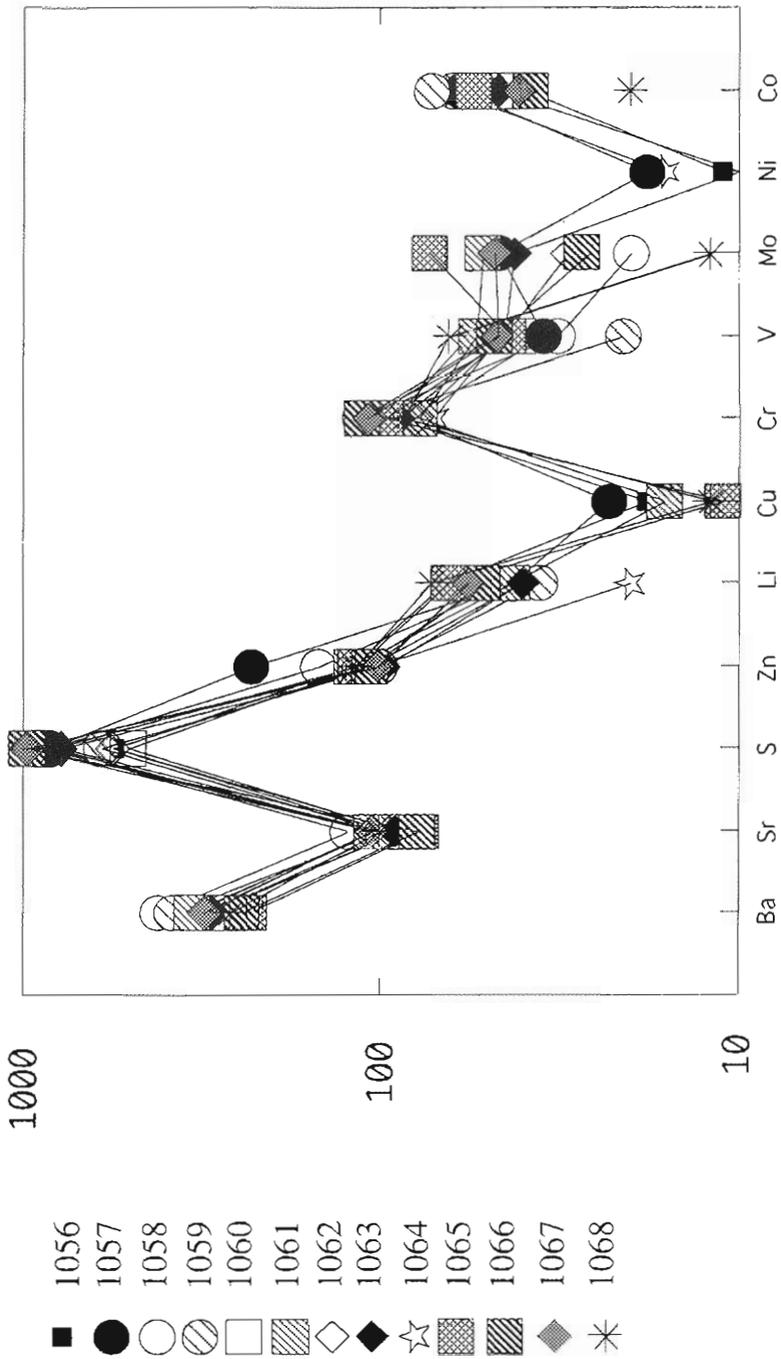


Figura 4. Representación de los datos de elementos traza en disolución total. Las concentraciones figuran en escala logarítmica.

Teniendo en cuenta solamente las dos muestras tomadas en el perfil de referencia a 40 m de la carretera, en dos horizontes distintos (el horizonte A (0-10 cm) y el horizonte AC [20-30 cm]), se observa:

Los elementos mayores, excepto el Si, disminuyen su concentración cuando pasamos del horizonte A al horizonte AC.

Los elementos traza no siguen la misma pauta:

El S, el Zn, el Cu, el Mo, el Pb, el Cd, el Co y el Se disminuyen su concentración al pasar del horizonte A al AC.

El Cr, el V y el Ni no varían sus concentraciones.

El Ba, el Sr, el Li, el Be y el As aumentan ligeramente. El Be presenta la concentración más alta de todas las muestras recogidas.

1.2. COMPORTAMIENTO DE LOS ELEMENTOS EN LAS MUESTRAS DE SUELO EN DISOLUCIÓN TOTAL

En los resultados obtenidos en el análisis de disolución total, se observan varios comportamientos muy bien diferenciados (figuras 3 y 4):

El Si, el Al, el P y el Cr apenas varían su concentración a medida que nos alejamos de la carretera, mientras que en los resultados obtenidos de los análisis de disolución parcial, hay mayor diferencia.

El Sr y el Ba van cambiando paralelamente, alcanzando la concentración más alta a 1,80 m de distancia. A partir de ahí siguen una tendencia al descenso sin variaciones importantes, de la misma forma que lo hacían en los análisis de disolución parcial.

El Ca, el Na y el K, tienen un comportamiento paralelo, y apenas cambian su concentración en las diferentes distancias. Sufren un ligero aumento, pero no lo hacen los tres de la misma manera, ya que el Ca presenta un mayor incremento, seguido del Na y del K. En disolución parcial no siguen un comportamiento tan paralelo.

El Fe y el Ti muestran un comportamiento caracterizado por presentar las concentraciones más bajas en el intervalo de 1,30 m a 2,30 m de la carretera. A partir de los 2,80 m los valores apenas varían, pero siguen una tendencia al alza hasta el perfil de referencia, donde alcanzan la máxima concentración.

El Zn, el Cu y el Ni presentan la máxima concentración a 1,30 m de distancia de la carretera, mientras que a partir de dicha distancia siguen un comportamiento aleatorio, sin una tendencia clara.

En las dos muestras tomadas en el perfil de referencia a 40 m de la carretera, en dos horizontes distintos en disolución total, se puede diferenciar:

En cuanto a los elementos mayores, Si, Fe, Na y Ti aumentan su concentración cuando pasamos del horizonte A al horizonte AC, mientras que Al, Mn, Mg, Ca, K y el Ti disminuyen.

Los elementos traza tienen un comportamiento más o menos similar en todos ellos. La mayoría, excepto el Cr, el V y el Ni, presentan una concentración menor en el horizonte A que en el horizonte AC. Hay que tener en cuenta que el Be, el Mo, el Ni, el Pb, el Cd, el As y el Se tienen valores por debajo del límite de detección.

Además, debemos destacar que el Al, el Mn, el Mg, el Ca, el K, el P, el S, el Zn, el Mo y el Co disminuyen sus concentraciones al pasar del horizonte A al horizonte AC en ambas disoluciones, lo que significa que si son contaminaciones, no se filtran.

DISCUSIÓN

Cuando hablamos de muestras de suelo en disolución parcial o total, cabe destacar el comportamiento del Pb, que en el primer caso presenta concentraciones por encima del límite de detección, mientras que en el segundo todos los valores están por debajo. Parece que hay mayor concentración de Pb en la fracción tamizada con la que se ha realizado el análisis en disolución parcial (cuyo tamaño es menor de 0,75 mm), puesto que en el análisis de disolución total no se han tamizado las muestras.

Zn, Cu y Ni presentan el mismo comportamiento en ambos tipos de disolución, mientras que Ba y Sr lo hacen de forma paralela, pero de distinta manera si comparamos ambas disoluciones (en el intervalo donde muestran las menores concentraciones en disolución parcial, es donde presentan las mayores en disolución total). Si, Al, P y Cr presentan un comportamiento aleatorio. Lo único destacable es que hay una mayor diferencia de valores en la disolución parcial que en la total, aunque en ambas apenas varían las concentraciones a medida que nos alejamos de la carretera.

Se ha intentado relacionar los distintos elementos en ambas disoluciones con respecto a la distancia, viendo que existe una clara relación entre los elementos ligados a las fórmulas de las micas (Al, Fe, Mg, K, Ti y Li), feldespatos y plagioclasas (Ca y Na).

Reparando solamente en las dos muestras recogidas en el perfil de referencia a 40 m de la carretera, en disolución parcial son los elementos mayores los que muestran un comportamiento similar, disminuyendo su concentración al pasar del horizonte A al horizonte AC. En disolución total son los elementos traza los que tienen este comportamiento.

RELACIÓN ENTRE LA GEOQUÍMICA DEL SUELO Y EL SUSTRATO GRANÍTICO DEL QUE PROCEDE

A partir de los datos analíticos obtenidos de la disolución total de los suelos estudiados y de los datos geoquímicos del granito de Béjar (BERNAL, 2003) intentaremos ver si existe una correlación entre los elementos analizados en ambos materiales.

Si: Es uno de los elementos que menos varía. La relación entre la concentración en las muestras de suelo con el sustrato siempre oscila alrededor de uno. A medida que nos alejamos de la carretera esta relación disminuye, encontrando el máximo valor a 1,30 m y el mínimo en el perfil de referencia. Esto quiere decir que la concentración de Si en las muestras de la carretera es menor a medida que aumenta la distancia.

Al: En el caso del Al, las muestras de suelo siempre presentan menor concentración que las del sustrato, aunque sin mostrar apenas oscilación entre ambas concentraciones. El mínimo está desde los 1,30 m hasta los 2,30 m, encontrándose el máximo en la muestra recogida en el horizonte A del perfil de referencia a 40 m.

Fe: Muestra el mismo comportamiento que el Al. Presenta una relación entre el suelo y el sustrato más baja de los 1,30 m a los 2,30 m. Da valores cada vez más altos, y alcanza la relación más elevada en el perfil de referencia.

Mn: El valor más alto se obtiene a los 1,30 m de la carretera. Inmediatamente después descende, hasta tener el mínimo a los 2,30 m. A partir de los 2,80 m vuelve a tener más Mn el suelo que el sustrato, manteniendo un valor constante hasta los 12 m. En este punto vuelve a subir, pero sin alcanzar el valor conseguido a los 1,30 m.

Mg: Muestra una relación baja a los 1,30 m de distancia, pero no es hasta los 8 m donde alcanza el valor más bajo, llegando a alcanzar el máximo a los 40 m de la carretera. A medida que nos alejamos, el suelo tiende a acercarse a la concentración de Mg en el sustrato.

Ca: A 0,80 m de distancia muestra la relación suelo/sustrato más baja. A medida que nos alejamos de la carretera esta relación aumenta, hasta alcanzar el máximo en la muestra tomada a 40 m. Pasamos de tener más concentración de Ca en el sustrato a tener una relación a favor de las muestras de suelo.

Na: Tiene exactamente el mismo comportamiento que el Ca: a medida que aumenta la distancia, la relación es cada vez más alta. La diferencia está en que el Na siempre presenta concentraciones más bajas en el suelo que en el sustrato rocoso.

K: A 0,80 m presenta la relación más baja, estando el máximo en la muestra recogida a 4 m de la carretera. De la misma forma que el Na, el K no llega a tener concentraciones superiores a las que presenta el sustrato rocoso en ninguna de las muestras recogidas.

Ti: A 0,80 m de distancia de la carretera, presenta uno de los valores más altos obtenidos para dicho elemento. De 1,30 m a 2,30 m esta relación de suelo/sustrato se inclina a favor del sustrato, dando las relaciones más bajas y alcanzando el valor más alto en el perfil de referencia.

P: Muestra exactamente el mismo comportamiento que el Ti. Sin embargo, la relación suelo/sustrato siempre va a estar a favor de las muestras del sustrato rocoso, dando valores inferiores a uno en todos los casos.

Ba: No tiene un comportamiento tan estructurado como los elementos anteriormente descritos. A 1,80 m de la carretera presenta el valor más alto y más cercano a uno, pero a partir de ahí la relación suelo/sustrato aumenta y disminuye hasta los 8 m. Aquí alcanza el valor bajo, con una relación entre las muestras de suelo y sustrato de casi 1:0,5.

Sr: Muestra un comportamiento paralelo con el Ba, dando la máxima relación a 1,80 m y la mínima a los 8 m.

Zn: El Zn, junto al Cr y Mo, es uno de los elementos que da la relación suelo/sustrato más alta. Da los valores más altos en el intervalo de 1,30 m a 1,80 m de la carretera, oscilando posteriormente hasta los 6 m, donde encontramos el valor más bajo. En todas las muestras recogidas, la concentración de Zn es mayor que la obtenida en el sustrato.

Li: Presenta un comportamiento oscilatorio, ya que a medida que nos vamos alejando de la carretera los valores no siguen una pauta definida. Encontramos la relación más baja a los 7 m, y la más alta en el perfil de referencia, a 40 m de distancia.

Cu: Hay que destacar que cuatro de las muestras recogidas en el suelo dan valores por debajo de los límites de detección, por lo que no se han podido comparar con el sustrato. La relación suelo/sustrato más alta se encuentra a 1,3 m de la carretera. A partir de aquí, oscila sin seguir un orden.

Cr: En todo el perfil, se puede ver que las muestras de suelo siempre van a presentar concentraciones mucho más altas de Cr que el sustrato. Los valores más altos de esta relación se encuentran en el intervalo de 1,80 m a 2,80 m, volviendo a alcanzarlos a los 10 m y 12 m. Entre tanto, a los 7 m se encuentra la relación más baja, aun estando a favor de las muestras de suelo.

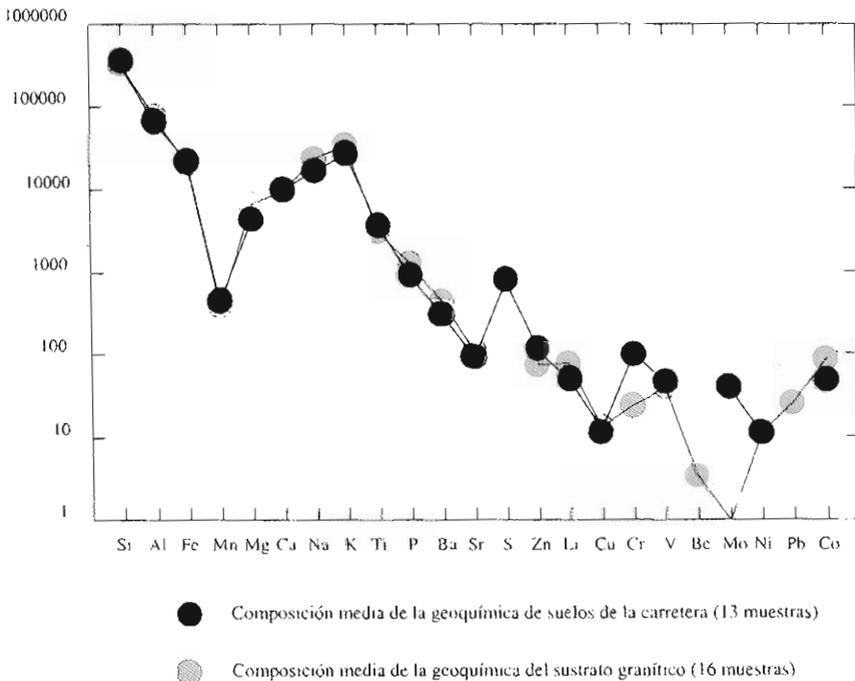


Figura 5. Comparación de composiciones medias del suelo y del sustrato granítico. Las concentraciones figuran en escala logarítmica

V: Presenta una relación suelo/sustrato en el intervalo de 1,30 m y 2,30 m, a favor del sustrato. A partir de 2,80 m, y a medida que nos alejamos de la carretera, la concentración de V en el suelo va siendo mayor, alcanzando el valor más alto en el perfil de referencia.

Mo: Igual que pasaba con el Cu, tenemos cuatro muestras por debajo del límite de detección. La relación más alta se da a 8 m de la carretera. En este elemento, se encuentran concentraciones muy elevadas en las muestras de suelo, pudiendo existir una contaminación causada por la molienda previa al análisis.

Ni: Teniendo en cuenta las cinco muestras que han dado concentraciones por debajo del límite de detección, vemos que la relación suelo/sustrato más alta se encuentra a 1,30 m de distancia, mientras que en el intervalo de 2,80 m a 5,00 m apenas tenemos Ni en las muestras de suelo.

Co: Presenta la relación suelo/sustrato más alta en el intervalo de 1,30 m a 2,30 m de la carretera. A partir de dicha distancia, esta relación es paulatinamente menor, hasta que a los 40 m se obtiene el valor más bajo.

Si hacemos una media de la geoquímica de los suelos del perfil de la carretera, en los resultados obtenidos en disolución total, y una media de la geoquímica del sustrato granítico, y las comparamos, podemos apreciar las siguientes observaciones (figura 5):

- La similitud de las concentraciones de los elementos mayores en ambos casos.
- Mayor diferencia con respecto a los elementos traza.
- Zn, Cr y Mo presentan un aumento considerable en las muestras tomadas en el perfil de la carretera con respecto a la geoquímica del sustrato granítico del que proceden.

CONCLUSIONES

De las interpretaciones preliminares de los resultados obtenidos en los análisis podemos concluir que en los suelos próximos a la carretera hay una clara relación entre los suelos estudiados y los datos geoquímicos del granito de Béjar. En el caso del Al, Fe, Mg, Ca, Na, Ti, P y V, dicha relación presenta los valores más bajos a una distancia comprendida entre los 0,80 m y los 2,30 m de la carretera. Este tramo corresponde con la bajada del nivel topográfico causada por la cuneta de la carretera (ver figura 1), por lo que puede ser debido al lavado producido por la escorrentía. En cuanto a la relación más alta de suelo/sustrato, la mayoría de dichos elementos la tienen en el perfil de referencia, situado a una distancia de 40 m. Sin embargo, Ba, Sr, Zn, Cu, Cr, Ni y Co presentan la máxima relación entre los 1,30 m y los 2,30 m, estando el mínimo a diferentes distancias.

A medida que nos alejamos de la carretera, vemos que la cantidad de Si en el suelo con respecto al sustrato es cada vez menor, mientras que la cantidad de Al, Fe, Ca, Na y K aumenta. Esto apoya la idea de que el suelo, al formarse a partir de un sustrato granítico, sus feldespatos, plagioclasas y micas al descomponerse han dado lugar a arcillas, lo que nos dará una relación

arcilla/cuarzo cada vez mayor a medida que la distancia aumenta. Del mismo modo ocurre con el P si tenemos en cuenta que forma parte de la red del apatito. Aunque la relación suelo/sustrato también aumenta con la distancia, esto podría estar relacionado con la acción de los fertilizantes en dichos suelos.

La mayoría de los elementos traza (excepto el Li y el V) tienen un comportamiento similar, presentando una relación suelo/sustrato alta en las muestras recogidas entre los 1,30 m y los 2,30 m de la carretera.

Parece, por tanto, que el comportamiento de los elementos mayores puede estar relacionado con el hecho de que, a medida que nos separamos de la carretera, está mejor conservado el perfil del suelo, mientras que los elementos traza parecen indicar un aporte de éstos por parte de agentes antropogénicos.

Comparando todos los datos obtenidos con los valores dados por la Normativa Holandesa, se observa que todos están por debajo del nivel de intervención señalado en dicha Normativa. Cu, Ni, Pb, Cd y As en todas las muestras recogidas dan concentraciones por debajo del valor objetivo. Ba, Mo y Co tienen concentraciones entre ambos valores.

Por tanto, las conclusiones al trabajo se resumen:

1. Aumento de Mn, Zn, Cu, Ni y Pb en la muestra 1057 (1,30 m), tanto en disolución parcial como en disolución total (teniendo en cuenta que no se ha detectado Pb en la segunda).
2. Disminución generalizada de trazas en función de la distancia a la carretera.
3. Con respecto al sustrato, lo más evidente es la similitud entre las concentraciones de elementos mayores y el aumento evidente de Zn, Cr, y Mo en todas las muestras de suelo estudiadas. En el caso del Si, Mn, Cu y Ni existe un aumento en las muestras tomadas a pie de carretera.
4. El Pb debe quedarse limitado a una determinada fracción (representada por la malla 0,75 mm y menores, utilizada en este trabajo).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de Francisco Miguel González en el trabajo de campo y las discusiones mantenidas sobre el tema. Este trabajo ha sido financiado con los proyectos SA11/00F de la Junta de Castilla y León, y 1FD97-0222, cofinanciado con fondos FEDER.

BIBLIOGRAFÍA

- ÁLVAREZ GONZÁLEZ, A. M. (1978): *Contaminación de suelos y plantas por efecto del tráfico rodado en el entorno de las carreteras*. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Madrid, 69 pp. (inédita).

- BERNAL, M. N.; GARCÍA BLÁZQUEZ, A. M.; PEREIRA GÓMEZ, M. D. & PEINADO, M. (2001): Aspectos de la geoquímica de las formaciones superficiales de la provincia de Salamanca: resultados preliminares. *Studia Geológica Salmanticensis*, **37**: 123-139.
- COMISIÓN MUNDIAL DEL MEDIO AMBIENTE Y DEL DESARROLLO (1988): *Nuestro futuro común*. Alianza Editorial, Madrid.
- GISIL, CH. D. & CHRISTENSEN, R. E. (1973): Cadmium, Nickel, Lead and Zinc in Earthworms from Roadside Soil. *Environ. Sci. Technol.*, **7** (11): 1060-1062.
- GONZÁLEZ HERNÁNDEZ, F. M.; PEREIRA, M. D.; GOY, J. L.; FORTEZA, J.; BERNAL, M. N.; GARCÍA, A. M. & MARTÍNEZ, A. (2002): Concentraciones de metales pesados en suelos de las inmediaciones de Béjar (Salamanca, España): impactos areales –vertederos de RSU– y lineales –carretera Salamanca-Cáceres–. Resúmenes del congreso: *Avances en Calidad Ambiental*, pp. 321-327.
- KABATA PENDIAS, A. (1995): Agricultural Problems related to excessive trace metal contents of soils. In: *Heavy Metals*. (Eds. SALOMONS, W., FÖRSINER, U. & MADER, P.). Springer, Berlin. 412 pp.
- KABATA PENDIAS, A. & PENDIAS, H. (1992): *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, 365 pp.
- LAGERFELF, J. V. & SPECHT, A. W. (1970): Contamination of Roadside Soil and Vegetation with Cadmium, Nickel, Lead and Zinc. *Environ. Sci. Technol.*, **4** (7): 583-585.
- MARTIN, C. W. (2000): Heavy metal trends in floodplain sediments and valley fill, River Lahn, Germany. *Catena*, **39**: 53-68.
- OLSON, K. W. & SKOGERBOE, R. K. (1975): Identification of soil lead compounds from automotive sources. *Environ. Sci. Technol.*, **9**: 227-230.
- PÉREZ, L.; MORENO, A. M. & GONZÁLEZ, J. (2000): Valoración de la calidad de un suelo en función del contenido y disponibilidad de metales pesados. *Edafología*, **7** (3): 113-120.
- REIMANN, C. & CARITAT, P. (1998): *Chemical Elements in the Environment. Factsheets for the Geochemist and Environmental Scientist*. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg.
- SANCHIDRIÁN, J. F. & MARIÑO, M. (1979): Estudio de la contaminación de suelos y plantas por metales pesados en los entornos de las autopistas que confluyen en Madrid. I Autopistas de Barajas y Valencia. *Anales de Edafología y Agrobiología*, **38** (7-8): 1377-1388.
- SANCHIDRIÁN, J. F. & 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. *Anales de Edafología y Agrobiología*, **39** (11-12): 2101-2115.
- SEOÁNEZ CALVO, M. (1999): *Contaminación del suelo: estudios, tratamiento y gestión*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- SEOÁNEZ CALVO, M. (2000): *Residuos: problemática, descripción, manejo, aprovechamiento y destrucción. Manual para políticos, técnicos, enseñantes y estudiosos de la Ingeniería del Medio Ambiente*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- SIEMCALSA (1998): *Mapa Geológico y Minero de Castilla y León*. Escala 1:400.000. Sociedad de Investigación y Explotación Minera de Castilla y León, S. A.
- TARVAINEN, T. (1996): *Environmental Applications of Geochemical Databases in Finland*. Geological Survey of Finland, Espoo. 75 pp. 11 figs.
- UGIDOS, J. M. (1990): Granites in the Central Iberian Massif as a paradigm of genetic processes of granitic rocks: I-types vs S-types. In: *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*. (Eds. DALLMAYER, R. D. & MARTÍNEZ GARCÍA, E.). Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, pp. 189-206.