

# La geoquímica en los sedimentos de la llanura de inundación del Manzanares como medio para evaluar el impacto ambiental

P. Adánez, A. García Cortés y J. Locutura

Instituto Geológico y Minero de España. Ríos Rosas, 23. 28003, Madrid  
p.adanez@igme.es; garcia.cortes@igme.es; j.locutura@igme.es

## RESUMEN

Las llanuras de inundación son componentes importantes de los sistemas de drenaje, actuando como canales de transporte durante el paso de las inundaciones y como zonas de almacenamiento o sumideros para el sedimento en suspensión depositado durante tales inundaciones. El estudio geoquímico en los sedimentos de las llanuras de inundación es un método fiable para reconstruir la evolución de la contaminación antrópica a lo largo del tiempo en una cuenca. Como aplicación del método, se ha estudiado la llanura de inundación del río Manzanares (Madrid) como ejemplo de ambiente urbano. Se han tomado muestras en los perfiles verticales de la llanura en dos puntos de la cuenca seleccionados aguas arriba y aguas abajo de la ciudad de Madrid. Estas muestras se han tamizado para obtener seis fracciones de tamaños de grano, en los cuales se han realizado un análisis de elementos traza mediante ICP-MS y INAA. Gracias a este estudio se ha puesto de manifiesto, primeramente un aumento de los contenidos en elementos contaminantes en el perfil de la llanura de inundación muestreado aguas abajo, así como un enriquecimiento de estos elementos a medida que el sedimento es más reciente.

Palabras clave: Elementos traza, geoquímica, llanura de inundación, Madrid, Manzanares

## ***The geochemistry in the Manzanares river floodplain sediments as a way to assess environmental impact***

### ABSTRACT

*Floodplains are an important component of drainage systems, as they act like transport channels and stores or sinks for suspended sediment deposited during the floods. A geochemical study in floodplain sediments is a reliable method to reconstruct the evolution of anthropic contamination through time in a basin. As an application of this method, the floodplain of the Manzanares River (Madrid) has been examined, as an example of urban environment. Samples have been collected through the floodplain vertical profile at two different selected sites upstream and downstream the city of Madrid. The samples have been sieved at six sizes of grain in which trace elements have been analysed by ICP-MS and INAA. This study highlights an increase in the contents of contaminant elements in the profile sampled downstream as well as an enrichment of these elements as the sediment is younger.*

*Key words: floodplain, geochemistry, Madrid, Manzanares, trace elements*

## **Introducción**

Los depósitos de llanura de inundación se definen como depósitos de acreción vertical formados mediante la descarga del material en suspensión transportado por la corriente al desbordarse un cauce (Allen, 1964).

La utilización de los sedimentos de llanura de inundación como medio de muestreo para realizar una cartografía geoquímica regional, fue propuesta en primer lugar por Ottesen *et al.* (1989) y más recientemente por Bölviken *et al.* (1996). Propusieron que los datos obtenidos para generar esta cartografía regional, también podían ser utilizados para comparar tanto los contenidos geoquímicos naturales,

como los afectados por la actividad humana. La teoría general es que estos sedimentos ofrecen la posibilidad de comparar geoquímicamente concentraciones de elementos en sedimentos post-industriales y pre-industriales utilizando el mismo medio de muestreo y en el mismo punto (Ottessen *et al.*, 1989; Sweenen y Van der Sluys, 1998; 2002). Otra ventaja de este tipo de depósitos, según Ridgway *et al.* (1995), De Vos *et al.* (1996) y Walling *et al.* (1996) es que además, pueden representar extensas áreas de drenaje, lo que permite una menor densidad de muestreo para la cartografía.

Durante la inundación, la corriente en el canal, más profundo, es más rápida y competente para transportar sedimento en suspensión que en la llanu-

ra de inundación, más somera y amplia, donde la corriente es más tranquila (Marriot, 1996). Como se observa en la Fig. 1, el sedimento transportado desde el canal hacia la llanura, se difunde y sobrecarga la corriente relativamente incompetente de la llanura, depositándose la mayor parte de la carga en suspensión (Pizzuto, 1987).

Wallin *et al.* (1996) ha dirigido la atención a los depósitos de llanura de inundación como sumideros de estos contaminantes adsorbidos en los sedimentos finos y según Hudson-Edwards *et al.* (1998) estos sedimentos actúan como focos de deposición y almacenes a corto y largo plazo de metales. Sucesivas inundaciones harán que los sedimentos se depositen en niveles superpuestos a los sedimentos depositados en las inundaciones anteriores (Ottesen *et al.*, 1989, Brown, 1996). De esta forma, estratos casi horizontales de sedimentos se construyen a lo largo de dilatados periodos de tiempo. Según Ottesen *et al.* (1989), una sección vertical, va a representar, por tanto, un registro de las inundaciones históricas con el tiempo. Además, en cada inundación, se abren nuevas fuentes de sedimento, y el origen de la carga en suspensión es múltiple.

Estos depósitos han sido utilizados en este trabajo para diagnosticar el grado de contaminación de la cuenca del río Manzanares. Ésta ha sido seleccionada como ejemplo de cuenca afectada por un ambiente urbano ya que atraviesa la ciudad de Madrid. Concretamente, las aguas de este río se componen, en años de bajas precipitaciones, de hasta un 60% de aguas urbanas procedentes de las plantas de tratamiento. (De Miguel *et al.*, 2005).

En este artículo se pretende caracterizar geoquímicamente dos zonas de la llanura de inundación del Manzanares y así poder investigar la relación entre la actividad a lo largo de la historia en la cuenca, sobre todo en el casco urbano, y la evolución de la composición geoquímica de los sedimentos de llanura de inundación. Se comparan los contenidos de dos perfiles muestreados de la llanura de inundación, uno aguas arriba del casco urbano de Madrid y otro aguas abajo, cercano a su confluencia con el Jarama. A parte, se muestra la variación a lo largo de la vertical de ambos perfiles. Así mismo, se comprueba la procedencia bien natural, o bien antrópica de los diferentes elementos traza analizados.

### Encuadre geológico y ambiental

El río Manzanares nace en la Sierra de Guadarrama, a una altitud de unos 2100 m, en el término municipal de Manzanares el Real, al norte de la Comunidad de

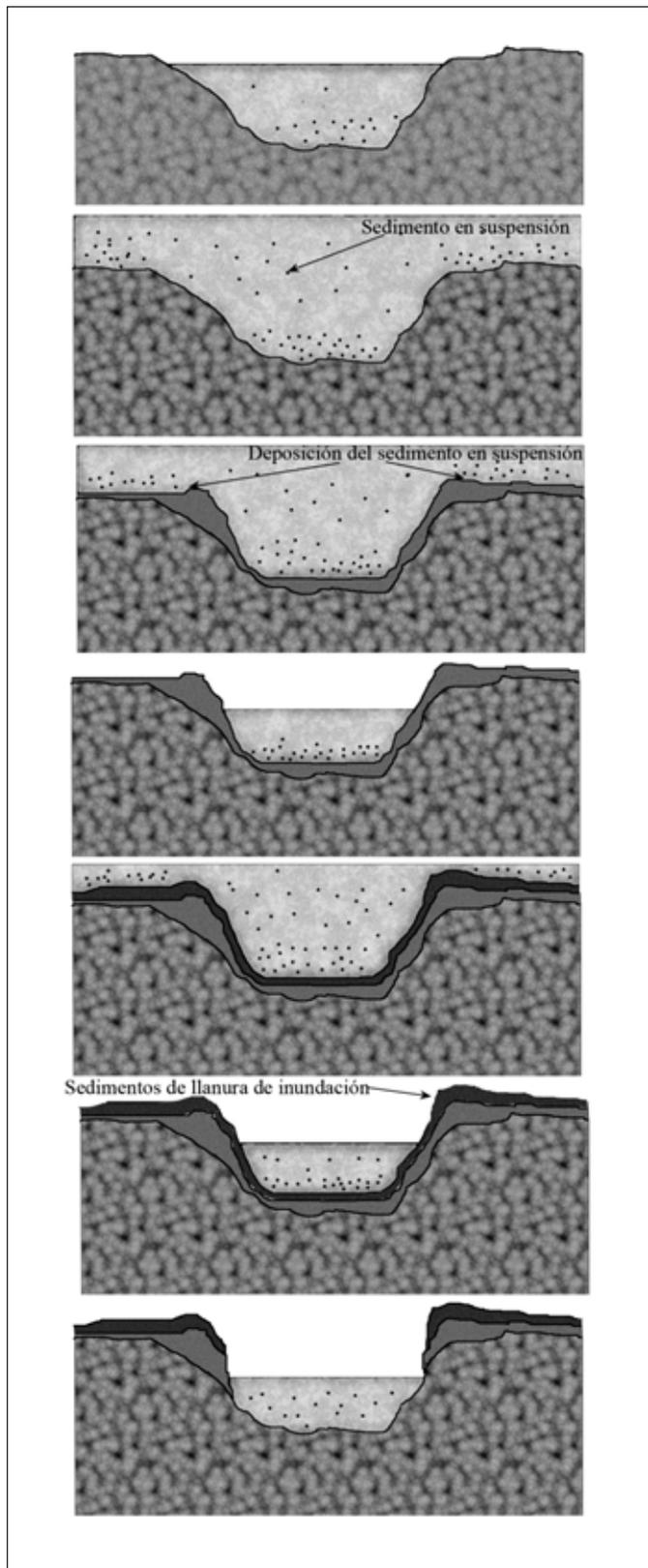


Figura 1. Deposición de los sedimentos en suspensión durante varias inundaciones  
*Figure 1. Suspended sediment deposition during several floods*

Madrid y es el único río que atraviesa el casco urbano de Madrid en dirección NW a SE. Una vez que sale de Manzanares el Real, sus aguas son acumuladas en el embalse de Santillana. Sigue su curso atravesando Colmenar Viejo, el Monte de El Pardo. Aquí sus aguas vuelven a embalsarse y más tarde entra en el casco urbano de Madrid, donde discurre canalizado. A su paso por la ciudad se regula su caudal, que al mismo tiempo, se incrementa con los vertidos previamente depurados. Una vez que el río deja la capital se dirige,

atravesando Getafe, hacia Rivas Vacia-Madrid, donde desemboca en el río Jarama, a unos 530 m de altitud, tras 92 km de recorrido. El área de la cuenca ocupa un total de 1240 km<sup>2</sup>.

Geológicamente, el río atraviesa formaciones cuyas edades se sitúan entre el Precámbrico y el Cuaternario (Fig. 2). Nace en el macizo granítico de la Pedriza, que forma parte del zócalo varisco, rejuvenecido por la Orogenia Alpina. Atraviesa tres tipos de granito que se caracterizan por tener un alto conteni-

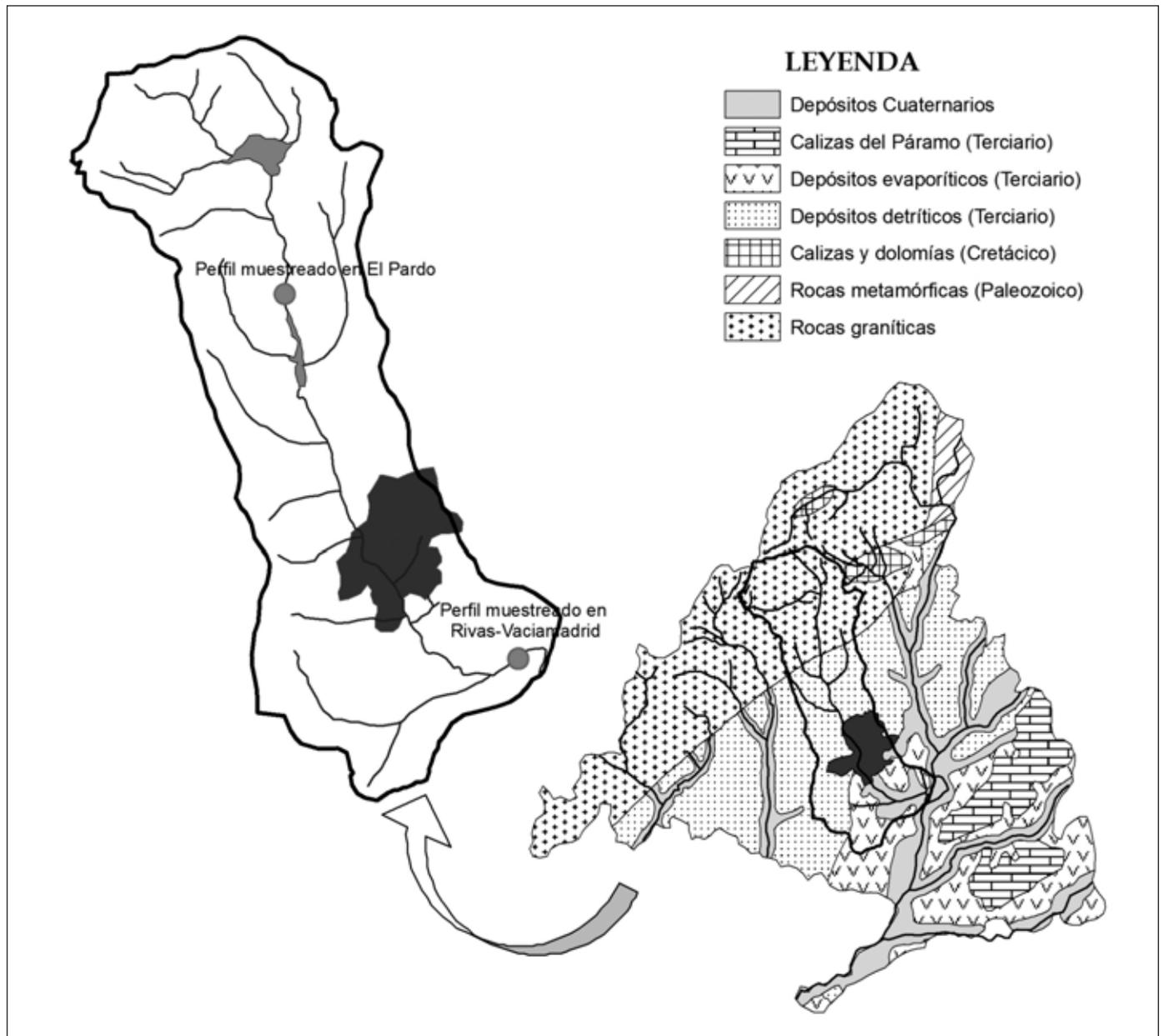


Figura 2. Geología de Madrid (modificada de Aguiló, 1983), cuenca del río Manzanares y localización de los perfiles muestreados  
Figure 2. Geology of Madrid (modified from Aguiló, 1983), River Manzanares basin and location of the sampled profiles

do en sílice y se diferencian en sus contenidos en aluminio. También atraviesa leucogranitos que tienen, además de un altísimo contenido en sílice, un alto contenido en Rb. Se observa en toda esta formación, una proporción muy baja en ferromagnesianos. El Manzanares discurre atravesando estas formaciones ígneas hasta que comienza su represamiento en el Monte de El Pardo, donde se adentra en los materiales sedimentarios neógenos constituyentes del relleno de la Cuenca de Madrid (Díaz de Neira *et al.*, 2000). Estos materiales se componen de arcosas, arcillas y limos procedentes de los procesos erosivos sufridos por los materiales graníticos y metamórficos del Sistema Central (Aguiló, 1983). A la altura del distrito de la Arganzuela, aproximadamente, se observa un cambio de facies, que pasan a arcillas, arenas finas y sílex (facies intermedias), y que rápidamente se transforman en las llamadas facies centrales procedentes de la sedimentación química y formadas mayoritariamente por yesos y margas yesíferas, donde se intercala algún episodio detrítico y que culminan con las calizas del páramo, que aparecen hacia el oeste de la Comunidad (Martin Bourgon *et al.*, 1975; San José *et al.*, 1989)

Desde un punto de vista ambiental, la mayor influencia sobre la contaminación del río Manzanares la ejerce su paso por el casco urbano de Madrid. Existen, aquí, varias fuentes de contaminación. Por ejemplo, la combustión de carbón aporta elementos como el Al, As, Se, Cr, Co y Cu y la combustión de crudos de petróleo y gasoil, V, Ni, Al, Cu, Pb, Fe y S. El Ca es utilizado en la construcción de edificios como parte del cemento (de Miguel, 1995). Por último, el tráfico o la actividad industrial que se desarrolla en el casco urbano y afueras de Madrid, emiten al exterior elementos como el Pb, Br o Ba, Zn, Cd y Sb. Aparte, a lo largo de su curso, el río se encuentra con cierta actividad minera, sobretodo en el curso alto. Este es el caso de la mina Asturias, en la confluencia del arroyo Jaramillo con el Manzanares, cerca de la central eléctrica de la Marmota. En la mina, activa hasta el año 1984, se extraía estaño de una mineralización de casiterita, que contenía también scheelita y wolframita. Se clausuró por motivos medioambientales. En las proximidades de la central de Navallar, en Colmenar Viejo, se ha encontrado un indicio de Uranio, aunque no se ha explotado. También se encuentran numerosas canteras de granito en la zona (Díaz de Neira *et al.*, 2000). En los alrededores del casco urbano de Madrid, la actividad minera se centra en la extracción de rocas industriales, así como arenas y gravas para áridos en las terrazas del río en los términos municipales de Getafe y Arganda (San José *et al.*, 1989). Por otra parte, en todo su recorrido, el río es regulado por

varias estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) como las de Viveros, La China, Butarque, Sur y Sur Oriental, que depuran los efluentes líquidos generados en diversos municipios.

El clima es muy variable en la cuenca del Manzanares. Las temperaturas oscilan entre 0 y 18 °C de media en la Sierra de Guadarrama y entre 5 y 24 °C en la capital. De la misma manera, los valores de pluviometría varían entre 1000 mm en la zona de Navacerrada y 500 mm en la zona centro de la provincia.

### Muestreo y análisis

Se han seleccionado dos puntos de muestreo en la cuenca del Manzanares con el fin de comprobar cómo influye el paso del río por la ciudad de Madrid a lo largo de la llanura de inundación y poder comparar tanto los resultados aguas arriba y aguas abajo de la ciudad, como la respuesta a la contaminación en la llanura de inundación en ambas zonas. En primer lugar, mediante fotografía aérea fueron seleccionadas zonas donde existía mayor probabilidad de desarrollo de llanuras de inundación.

De acuerdo con Macklin *et al.* (1994), que considera que una buena selección del punto de muestreo es imprescindible, los puntos donde se tomaron finalmente las muestras fueron cuidadosamente elegidos en campo para procurar que fueran lo más representativos posible y su perfil tuviera un mejor desarrollo.

Ambos perfiles se sitúan inmediatamente al borde del canal. Para recoger las muestras se tomó la precaución de que el nivel de agua fuese lo más bajo posible. En ambos, se muestreó el perfil completo de la llanura de inundación, que se dividió en tramos diferenciables. Estos tramos corresponden a secuencias completas de una única inundación o a una agrupación de secuencias, cuando éstas tenían escaso desarrollo vertical. En el caso en que existiera un tramo aparentemente homogéneo de un espesor considerable, éste se dividió en tramos de aproximadamente 30 cm. El muestreo se realizó practicando una roza y las muestras se tomaron de muro a techo para evitar contaminaciones por caída de material. Así mismo, se tuvo la precaución de limpiar los centímetros más superficiales, que corresponden a materia vegetal en descomposición. De cada tramo muestreado se recogieron aproximadamente 10 kg de muestra para asegurar que ésta fuese lo suficientemente representativa (Sweenen y Van der Sluys, 1998) y asegurar una cantidad suficiente de material analizable para todas las fracciones.

El primer punto de muestreo se sitúa aguas arriba

del embalse de El Pardo, dentro del Monte del Pardo. A unos 300 m de la central eléctrica abandonada de la Marmota. En este caso, el perfil tiene un espesor de 1,30 m. Las secuencias no son diferenciables pero sí que se advierten cuatro niveles con características algo distintas, por lo que se aprovechó esta circunstancia para diferenciar los tramos en los que se ha dividido el perfil (Fig. 3). Éste comienza a muro con un tramo de 30 cm de espesor de carácter arenoso y de color marrón-rojizo y continúa con un nivel más arcilloso de color grisáceo oscuro de 50 cm de grosor. A éste se superpone un tercer nivel de 15 cm más arenoso que el anterior y que contiene cantos de hasta 5 cm de diámetro, formado probablemente por alguna avenida de mayor capacidad de transporte. El tramo más superficial, de 30 cm de espesor es un nivel arcilloso, oscuro, de tono marrón grisáceo.

El punto de muestreo aguas abajo de la ciudad de Madrid se ha tomado en las inmediaciones del pueblo de Rivas-Vaciamadrid, a unos 500 m de la Escuela de Protección Civil. En este caso, la llanura de inundación tiene un espesor de 3 m aproximadamente. El perfil se dividió en nueve tramos de entre 25-40 cm, que agrupaban, cada uno, varias secuencias de inundación (Fig. 4). En total se contabilizaron 22 secuencias de deposición granodecrescentes desde el tamaño arena hasta el de arcilla. Este perfil comienza, a muro, con secuencias de predominancia arcillosa hasta aproximadamente los 2,65 m de profundidad. Le sigue otra secuencia similar pero que culmina con

un paquete más arenoso, hasta 2,40 m de profundidad. Hasta los 2 m de profundidad se encuentra un nivel de arenas, que corresponde a la tercera muestra tomada. A éste se superponen de nuevo secuencias arena-arcilla hasta el techo del perfil. Este nivel de 2,05 m de secuencias, bastante monótono, se dividió en seis tramos de muestreo.

A las profundidades de 1,50 m u 0,50 m aproximadamente se ha encontrado abundancia de fragmentos de cerámica. Estos restos cerámicos se han recogido para su futura datación por métodos de termoluminiscencia. A una profundidad de 2,40-2,65, se tomó además una muestra de sedimento de llanura de inundación, del que se extrajeron pequeños tallos carbonizados para su datación por Carbono 14. Enviada al laboratorio Beta Analytic Inc. de Miami, arrojó una edad de  $170 \pm 40$  años bp.

Las muestras tomadas se disgregaron y se secan durante cinco días en estufa a 40 °C. Una vez secas, se obtuvieron mediante tamizado, las siguientes fracciones granulométricas: >500 µm, 500-250 µm, 250-177 µm, 177-125 µm, 125-63 µm y <63 µm. De todas las fracciones, se extrajeron alrededor de 70 g, que se molieron a un tamaño <63 µm. Estas muestras pulverizadas fueron separadas para realizar los análisis de los elementos traza tanto mediante ataque total como por ataque parcial (este último únicamente sobre las fracciones <63 µm), así como un análisis de

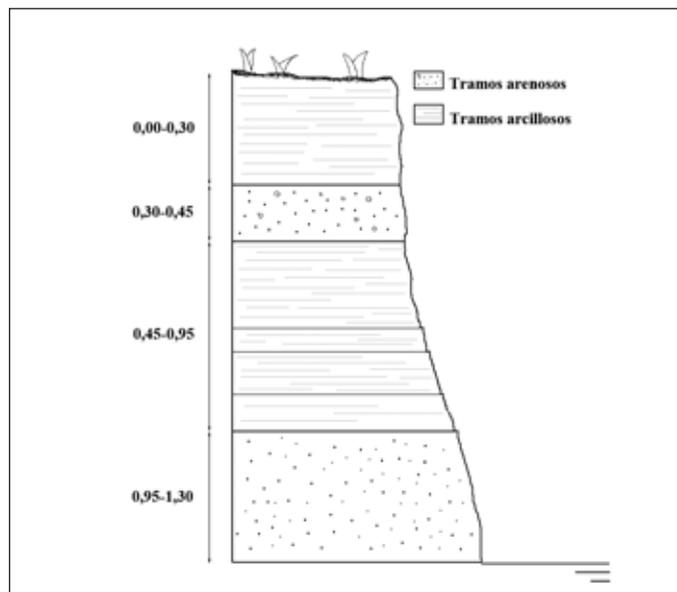


Figura 3. Esquema del perfil muestreado en el Monte del Pardo  
Figure 3. Scheme of the vertical profile sampled in Monte del Pardo

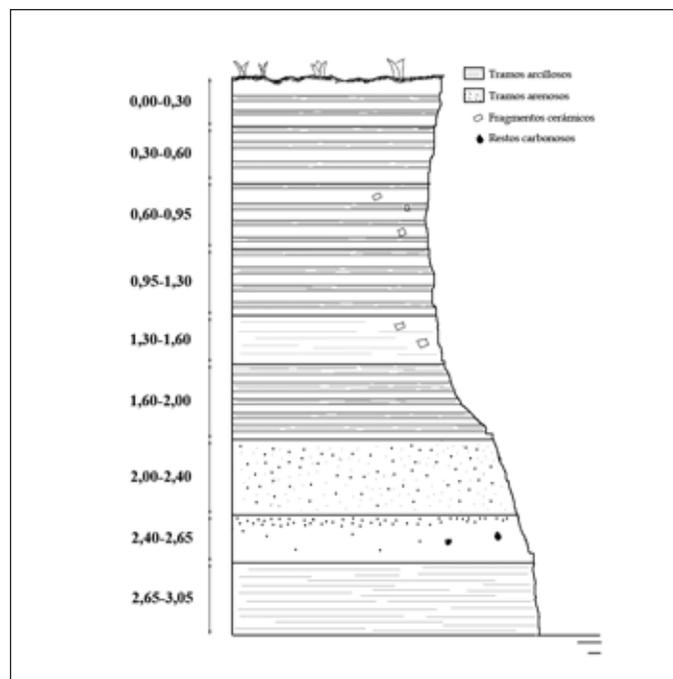


Figura 4. Esquema del perfil muestreado en Rivas-Vaciamadrid  
Figure 4. Scheme of the vertical profile sampled in Rivas-Vaciamadrid

Carbono Orgánico Total. Los análisis de las muestras sometidas a ataque total y parcial se realizaron en los laboratorios Actlabs, en Canadá. Las muestras sometidas a ataque total, por ataque tetraácido (HF, HClO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub> y HCl) fueron analizadas por ICP-MS y INAA, donde se analizaron 56 elementos traza, mientras que las muestras sometidas a ataque parcial con agua regia, se analizaron mediante ICP-MS, analizándose 62 elementos. Los análisis de Carbono Orgánico Total se llevaron a cabo en los laboratorios del Instituto Geológico y Minero de España.

## Resultados y discusión

### Variación de contenidos con granulometría

Se han comparado los resultados obtenidos en cada tramo muestreado para ver el comportamiento de los elementos analizados con el tamaño de grano. A grandes rasgos, estos elementos pueden dividirse en dos grupos. En el primero, los elementos no presentan grandes variaciones en sus contenidos en las diferentes granulometrías. Estos son, en su mayoría los elementos formadores de rocas (fundamentalmente silicatos), como por ejemplo, Al, Ca, K, Na, etc. En el segundo grupo sí se aprecia una variación sustancial con la granulometría. Se pone de manifiesto, una tendencia general en estos elementos al aumento de sus contenidos conforme la granulometría es más fina. En otras palabras, estos elementos como el Cu, Pb, Zn, Au, As o Ba se concentran en los tamaños de grano más finos. En este último grupo de elementos,

sus contenidos disminuyen suavemente en algunos casos, mientras que en otros, como el Au, muestran un descenso muy rápido al principio y luego se estabilizan (Fig. 5).

### Variación de contenidos en la vertical del perfil

En ambos perfiles se han comparado los contenidos de todos los elementos analizados a lo largo del perfil muestreado. Se pretende así ver cómo varían los elementos con la profundidad y conforme los sedimentos de llanura de inundación son más recientes.

Se ha representado la distribución de cada uno de los elementos analizados en los dos perfiles con la profundidad. Se aprecia un incremento gradual en la concentración de algunos elementos, hacia el techo del perfil. Es en el perfil muestreado en Rivas-Vaciamadrid donde esta variación de contenidos, en su mayoría metales pesados, es más importante. Es el caso, por ejemplo del Zn y Cu, que triplican sus contenidos. El Zn, de 70 a 240 ppm y el Cu, de 35 a 120 ppm, desde la parte más baja del perfil a la parte más alta. Otros elementos que muestran en este perfil un fuerte incremento de su concentración en sentido ascendente son el Cd (de 0,3 a 0,8 ppm) y Sb (de 1,8 a 4,8 ppm). El Ni también experimenta un aumento en los contenidos conforme la muestra es más superficial (de 9 a 22 ppm). Mientras, el Pb y el Ba, también incrementan sus contenidos aunque no de forma tan drástica (el Pb varía de 125 a 275 ppm, con algún pico mayor intermedio y el Ba de 600 a 900 ppm). Esta asociación es típica de la contamina-

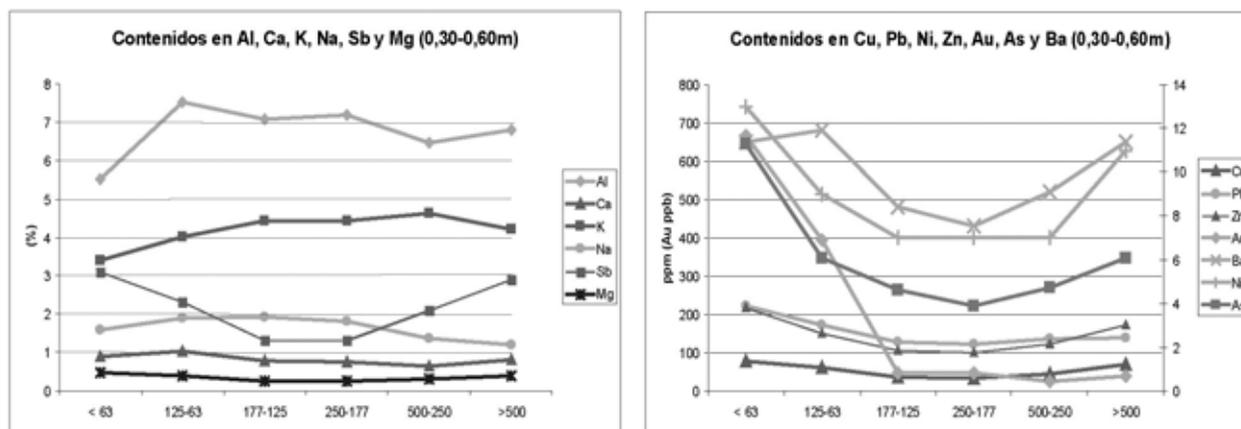


Figura 5. Representación de los dos comportamientos observados, según el tamaño de grano, en algunos elementos, en el tramo de 0,30 a 0,60 m en el perfil de Rivas-Vaciamadrid

Figure 5. Representation of the two behaviours observed according to grain size in some elements, at 0,30 to 0,60 m deep of the Rivas-Vaciamadrid profile

ción antrópica procedente del casco urbano. Son elementos aportados por el tráfico (gasolina, gasoil, motores), actividades industriales, combustión fósil o incineración de residuos. En la Fig. 6 se ha representado la distribución vertical de algunos de estos elementos en los dos perfiles.

En el caso del perfil muestreado en El Pardo, los contenidos no muestran un aumento tan acusado, aunque en algunos casos, en el nivel de 0,30 a 0,60 m, las concentraciones de algunos elementos son mayores. En general, a lo largo del perfil, se mantienen bastante constantes y similares a los mínimos del perfil de Rivas-Vaciamadrid. Sin embargo, hay casos en que los contenidos son mayores en el perfil de El

Pardo. Así por ejemplo, el As y el W (Fig. 6), aunque no muestran una variación acusada a lo largo del perfil, presentan contenidos mayores que en el de Rivas-Vaciamadrid. Esto puede deberse a la actividad minera desarrollada sobre mineralizaciones Sn-W-As-Cu, frecuentes en la parte alta del Manzanares.

**Relación de contenidos totales-parciales**

Una forma de deducir la posible presencia de contaminaciones en las muestras es la comparación de los resultados de los análisis obtenidos tras someter las muestras a extracción total frente a los obtenidos tras

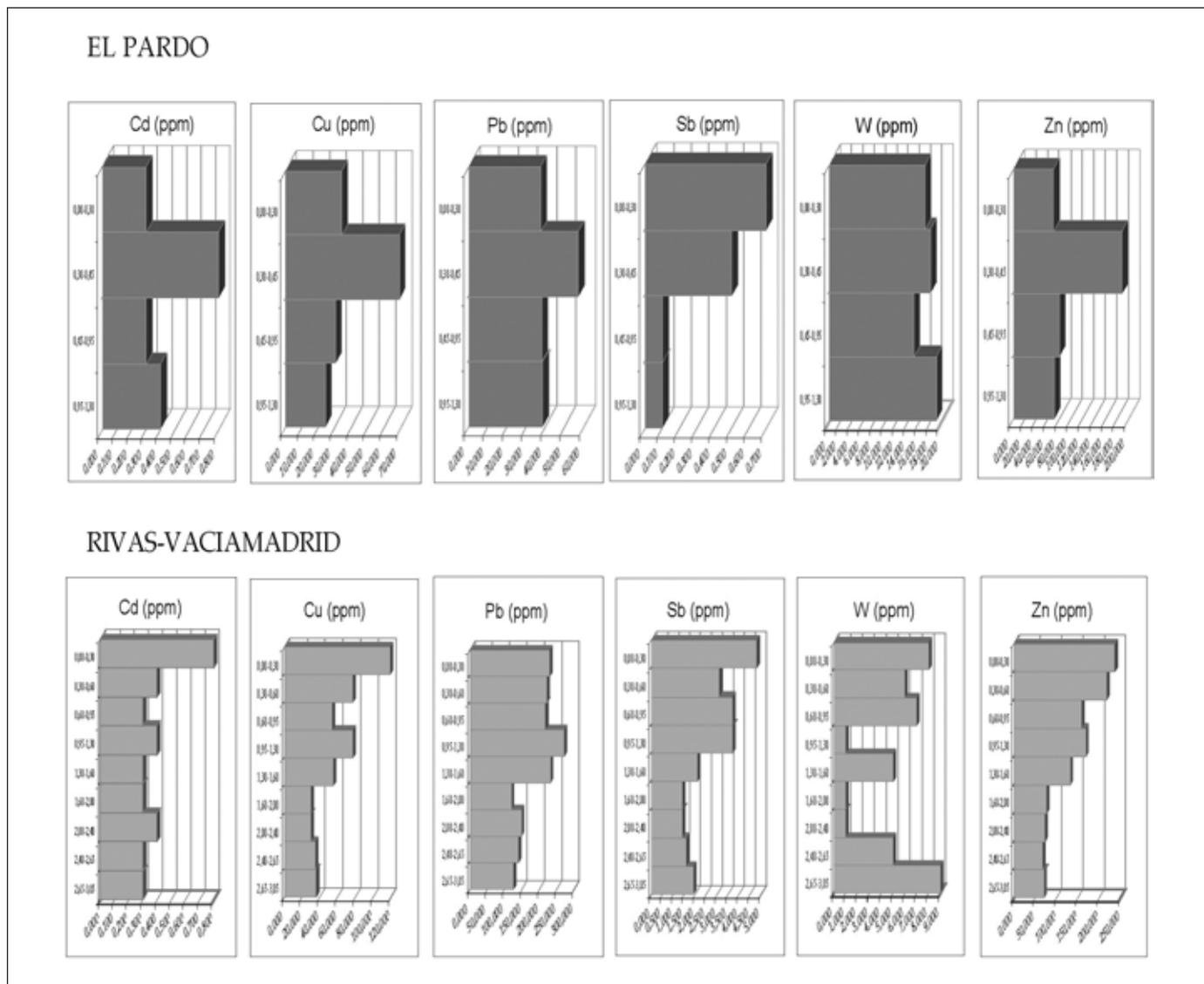


Figura 6. Distribución vertical del Cd, Cu, Pb, Sb, W y Zn en los perfiles de El Pardo y Rivas-Vaciamadrid  
 Figure 6. Vertical distribution of Cd, Cu, Pb, Sb, W and Zn of El Pardo and Rivas-Vaciamadrid profiles

extracción o ataque parcial. Los análisis de las muestras sometidas a ataque parcial, son más indicativos de los elementos que, o bien están adsorbidos, o bien forman parte de los carbonatos y son, por tanto, extraíbles con los ácidos utilizados en el ataque de la muestra. El ataque parcial se ha realizado con agua regia, mezcla de ácido nítrico y ácido clorhídrico (ISO standard 11466, 1995). Estos elementos coinciden, en su mayoría, con los que forman parte de lo que también se denomina fracción móvil (De Miguel *et al.*, 2005). Por tanto, con este tipo de análisis se puede llegar a tener una aproximación de los contenidos de los elementos potencialmente indicadores de contaminación y que no forman parte de la red de los silicatos. Dicho de otra forma, con la relación total/parcial se puede tener una idea del origen (contaminación o no) de cada elemento, ya que una proporción cercana a la unidad, se traduce en que prácticamente todo el contenido de ese elemento en la muestra, es extraíble y que por tanto, es ajeno a la composición litológica del sedimento silicatado. En cambio, cuanto mayor sea la proporción total/parcial, habrá una mayor proporción de ese elemento formando parte de la estructura de los silicatos, probablemente próximo a los contenidos primarios.

Puesto que los elementos potencialmente contaminantes se concentran en las granulometrías más finas, como se ha visto en un apartado anterior, se decidió realizar los análisis con ataque parcial únicamente sobre la fracción <63 µm.

Estas diferencias entre los resultados de los análisis totales y parciales se aprecian mejor en el perfil muestreado en Rivas-Vaciamadrid. A parte, se ha tenido en cuenta la proporción de los contenidos totales y parciales en los niveles analizados y cómo ésta varía con la profundidad en cada uno de los perfiles. En los casos en los que la proporción se mantiene constante, quiere decir que el aporte de dichos elementos tiene el mismo origen a lo largo de la formación de la llanura. Dentro de esta tendencia, existen dos grupos diferenciables. El primero, mantiene la constancia con valores altos de la proporción (Fig. 7.1a). En el segundo grupo, la proporción total/parcial es igual o cercana a la unidad, lo que indica que existe contaminación, pero que ésta tiene la misma incidencia a lo largo de las sucesivas inundaciones (Fig. 7.1b). Estos elementos, son en su mayoría elementos metálicos. Se ha diferenciado otro grupo en el que se observa una tendencia de la proporción a crecer conforme más profunda es la muestra (Fig. 7.2). Esto indicaría que la contaminación en dichos elementos aumenta a lo largo del tiempo en la llanura de inundación.

### Análisis de Componentes Principales

A fin de describir e interpretar mejor los resultados obtenidos y comprobar que realmente existen aso-

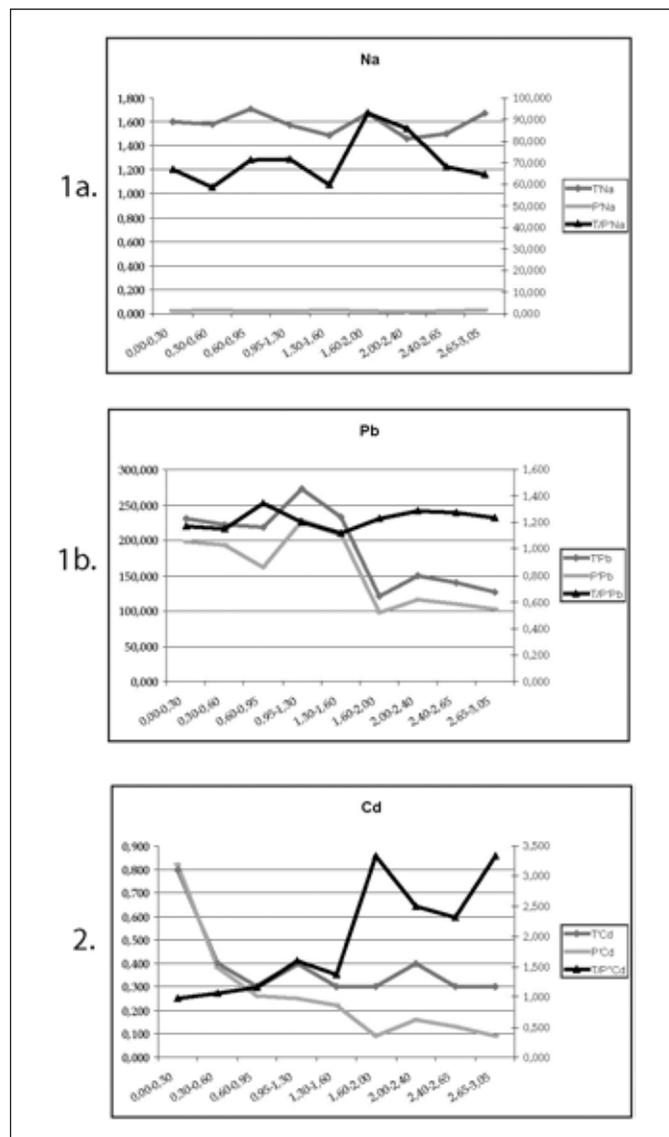


Figura 7. Representación de los tres comportamientos más repetidos de la relación total/parcial en los elementos traza analizados. En (1a) se ha representado el Na como ejemplo de tendencia constante y valores altos. En (1b) se ha representado el Pb como ejemplo de tendencia constante cercana a la unidad. Por último, en (2) se ha representado el Cd como ejemplo de tendencia creciente con la profundidad

Figure 7. Representation of the three behaviours more repeated of the total/partial proportion in analyzed elements. In (1a), Na has been represented as an example of a constant tendency and high values. In (1b), Pb has been represented as an example of a constant tendency approached to one. Finally, in (2), Cd has been represented as an example of a growing tendency with depth

ciaciones de elementos con procedencias distintas y discriminar grupos con comportamientos diferentes, se ha llevado a cabo un análisis de componentes principales de los resultados obtenidos, tanto para el ataque total como para el ataque parcial. Este análisis se ha realizado en el perfil de Rivas-Vaciamadrid. Se ha conseguido discriminar los elementos analizados en tres factores bien diferenciados.

El Factor 1 agrupa a los elementos U, Lu, Tb, Sm, Ce, La, Th y Yb, que, en este caso, pueden caracterizar las rocas ígneas. Este conjunto de elementos puede proceder de las litologías del norte de la Comunidad de Madrid, es decir, los materiales ígneos y metamórficos del Sistema Central o las arcosas formadas a partir de aquéllos.

El Factor 2 agrupa a los elementos Cu, Zn, Cd, Sb, TOC, Pb y Ni, es decir elementos, en su mayoría, metálicos y Carbono Orgánico Total. Esta asociación presenta elementos típicos de la contaminación urbana, procedentes, como se ha mencionado en apartados anteriores, de actividades industriales, combustiones de calderas, incineración de residuos o de la contaminación por tráfico rodado.

El Factor 3 agrupa a los elementos Fe, K, Rb, Al, Cs, V, Mg, As. Este conjunto de elementos es característico de las arcillas, margas y yesos, litologías muy abundantes en el sureste de la Comunidad de Madrid y atravesadas en su último tramo por el río Manzanares.

Esta diferenciación se ha obtenido tanto para el ataque total como para el parcial. Representando la

variación de cada uno de los factores con la profundidad se diferencian varias tendencias. Tanto el Factor 1 como el Factor 3, muestran una tendencia bastante errática a lo largo de todo el perfil. Cabe explicar esta aleatoriedad por el hecho de que las tormentas generadoras de inundaciones se hayan producido en diferentes puntos de la cuenca, con lo que el material depositado puede proceder de fuentes distintas. Como se observa en la Fig. 8A y 8B, puede decirse que existe una complementariedad entre ambos factores, ya que, por lo general, en los picos mínimos de uno, el otro presenta picos máximos.

El Factor 2, sin embargo, muestra una clara tendencia a disminuir conforme aumenta la profundidad de la muestra. Esto quiere decir que el factor de contaminación aumenta conforme las inundaciones son más recientes y refleja el aumento de la contaminación en el tiempo. Así mismo puede observarse que la parte más profunda del perfil, en el que el Factor 2 tiene unos valores muy bajos, debió sedimentarse con antelación al desarrollo urbano e industrial de Madrid, lo que concuerda con la datación realizada.

### Conclusiones

El estudio de las distribuciones de los perfiles estudiados en la llanura de inundación del río Manzanares ha servido para poner de manifiesto que este tipo de sedimentos suministran información sobre la evolución de la contaminación procedente del casco urba-

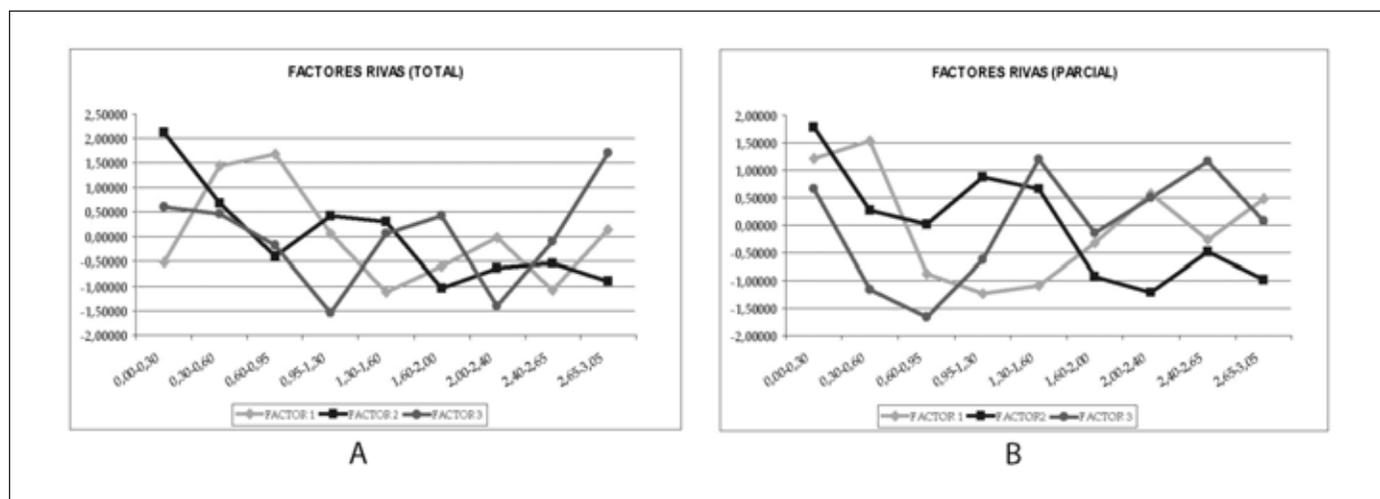


Figura 8. Representación de los factores tras el Análisis de Componentes Principales para las muestras sometidas a ataque total y parcial. El factor de contaminación aumenta conforme la muestra es más reciente

Figure 8. Representation of the factors after a Principal Components Analysis for total and partial digestion. The contamination factor grows as the sediment is younger

no de Madrid. Se ha demostrado que, aguas abajo de la capital, los sedimentos de llanura de inundación, a medida que son más recientes, experimentan un enriquecimiento en elementos pertenecientes a asociaciones típicas de la contaminación urbana, como el Pb, Ba, Zn, Cd, Cu, Ni y Sb. Mediante tan sólo dos puntos de muestreo se ha llevado a cabo un diagnóstico del grado de contaminación que ha sufrido la cuenca del río Manzanares en los últimos años. En el perfil muestreado en Rivas-Vaciamadrid, aguas abajo de la ciudad de Madrid, tan sólo los contenidos en estos elementos en la parte inferior del perfil se asemejan a los contenidos del perfil muestreado en el Monte del Pardo, aguas arriba del casco urbano. Se puede afirmar, por tanto, que la influencia del paso del río por la ciudad de Madrid se comprueba por el enriquecimiento de los sedimentos de llanura de inundación en elementos contaminantes. Por otra parte, en el perfil de El Pardo, se han encontrado elementos con mayores concentraciones que el perfil de Rivas-Vaciamadrid, como por ejemplo el W, que en El Pardo tiene unos contenidos entre 16 y 21 ppm, y en Rivas-Vaciamadrid, los contenidos son de 8 a 9 ppm. Esto se explica por la actividad minera que ha existido en la zona hasta hace unos años.

Sin embargo también se han puesto de manifiesto algunas carencias derivadas de tan escasos puntos de muestreo, como la imposibilidad de localizar las diferentes fuentes de contaminación detectadas, más allá de que éstas proceden del casco urbano.

Otra de las limitaciones observadas es la dificultad de correlacionar los niveles analizados con eventos determinados en el tiempo si no se dispone de una datación precisa y exhaustiva del perfil. En este caso sólo se pudo localizar un nivel datable con  $^{14}\text{C}$  en el perfil aguas abajo del casco urbano, pero no se han podido correlacionar los niveles más contaminados con épocas concretas. Con el fin de subsanar esta dificultad, se tiene previsto, en el futuro, otros métodos de datación, como la termoluminiscencia de los fragmentos cerámicos que se recolectaron en algunos niveles.

## Referencias

Aguiló, M. 1983. *El agua en Madrid*. Diputación Provincial de Madrid, 250 pp.  
 Allen, J. R. L. 1964. A review of the origin and characteristics of recent alluvial sediments. *Sedimentology*, 5, 89-191.  
 Bölviken, B., Bogen, J., Demetriades, A., de Vos, W., Ebbing, J., Hindel, R., Langedal, M., Locutura, J., O'Conner, P., Ottesen, R.T., Pulkkinene, E., Salminen, R., Schermann, O., Swennen, R., Van der Sluys, J., Volden, T. 1996.

Regional geochemical mapping of Western Europe towards the year 2000. *Journal of Geochemical Exploration*, 56, 141-166.  
 Brown, A. G. 1996. Floodplain Palaeoenvironments. En: Anderson, M. G., Walling, D. E y Bates, P. D. (ed.), *Floodplain Processes*. John Wiley and Sons, Chichester, U. K, 94-138.  
 De Miguel, E. 1995. *Geoquímica urbana de elementos traza*. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Química y Combustibles. ETSI Minas, Universidad Politécnica de Madrid.  
 De Miguel, E., Charlesworth, S., Ordóñez, A. y Seijas, E. 2005. Geochemical fingerprints and controls in the sediments of an urban river: River Manzanares, Madrid (Spain). *Science of the Total Environment*, 340, 137-148  
 De Vos, W., Ebbing, J., Hindel, R., Schalich, J., Swennen y Van Keer, I. 1996. Geochemical mapping on overbank sediments in the heavily industrialised border area of Belgium, Germany and the Netherlands. *Journal of Geochemical Exploration*. 56, 91-104.  
 Díaz de Neira, J. A., Cabra, P., Hernaiz, P.P., y López Olmedo, F. 2000. *Mapa geológico a escala 1:50.000 de la Hoja 534 (Colmenar Viejo)*. Instituto Geológico y Minero de España. 2 mapas y 1 memoria de 129 p.  
 Hudson-Edwards, K. A., Macklin M. G., Curtis, C. D. y Vaughan, D. J. 1998. Chemical remobilization of contaminant metals within floodplain sediments in an incising river system: Implications for dating and chemostratigraphy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 671-684.  
 Macklin, M. G., Ridgway, J., Passmore, D. G. y Rumsby, B. T. 1994. The use of overbank sediment for geochemical mapping and contamination assessment: results from selected English and Welsh floodplains. *Applied Geochemistry*, 9, 689-700.  
 Marriot, S. B. 1996. Analysis and modelling of overbank deposits. En: Anderson, M. G., Walling, D. E y Bates, P. D. (ed.), *Floodplain Processes*. John Wiley and Sons, Chichester, U. K, 63-93.  
 Martín Bourgón, P., Campos, C., Vegas, R., Pérez-González, A. y Míguez, F. 1975. *Mapa geológico a escala 1:50.000 de la Hoja 582 (Getafe)*. Instituto Geológico y Minero de España. 1 mapa y 1 memoria de 26 p.  
 Ottesen, R. T., Bogen, J., Bölviken, B. y Volden, T. 1989. Overbank sediment: a representative sample medium for regional geochemical mapping. *Journal of Geochemical Exploration*, 32, 257-277.  
 Pizzuto, J. E. 1987. Sediment diffusion during overbank flows. *Sedimentology*, 34, 301-317.  
 Ridgway, J., Fligh, D. M. A., Martiny, B., Gómez-Caballero, A. y Macias-Romo, C. 1995. Overbank sediments from central Mexico: an evaluation of their use in regional geochemical mapping and in studies of contamination from modern and historical mining. *Applied Geochemistry*, 10, 97-109  
 San José, M. A., Vegas, R., Calvo Sorando, J. P., Goy, J. L., Morales, J y Gallego, E.. 1989. *Mapa geológico a escala 1:50.000 de la hoja 559 (Madrid)*. Instituto Geológico y Minero de España. 1 mapa y 1 memoria de 71 p.

- Swennen, R. y Van der Sluys, J. 1998. Zn, Pb, Cu and As distribution patterns in overbank and medium-order stream sediment samples: their use in exploration and environmental geochemistry. *Journal of Geochemical Exploration*, 65, 27-45.
- Swennen, R. y Van der Sluys, J. 2002. Anthropogenic impact on sediment composition and geochemistry in vertical overbank profiles of river alluvium from Belgium and Luxembourg. *Journal of Geochemical Exploration*, 75, 93-105.
- Walling, D.E., He, Q. y Nicholas, A.P. 1996. Floodplains as Suspended Sediment Sinks. En: Anderson, M. G; Walling, D. E y Bates, P. D. (ed.), *Floodplain Processes*. John Wiley and Sons, Chichester, U. K, 399-440.

Recibido: abril 2009

Revisado: junio 2009

Aceptado: julio 2009

Publicado: julio 2009

