

## VARIABILIDAD ESPACIAL DE PROPIEDADES HIDRAULICAS Y ELEMENTOS TRAZA EN SUELOS AFECTADOS POR EL VERTIDO DE AZNALCOLLAR SOMETIDOS A RECUPERACION

F. Moreno<sup>1</sup>, I.F. Girón<sup>1</sup> y F. Cabrera<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS), CSIC, Apartado 1052, 41080 Sevilla, fmoreno@irnase.csic.es.

**RESUMEN.** Después del accidente minero de Aznalcóllar (25/04/98) se llevaron a cabo las labores de recuperación de los suelos, consistentes en: a) la remoción de los lodos depositados sobre la superficie de los mismos, así como de una capa de suelo contaminado de hasta 20 cm de profundidad, y b) la aplicación de enmiendas. Como consecuencia de estas labores, quedaron enterradas en los suelos, cantidades variables de lodos, distribuidas aleatoriamente, lo que ha dado lugar a aumentos en las concentraciones totales de elementos contaminantes, respecto a las existentes inmediatamente después del vertido. La utilización de maquinaria pesada en las labores de recuperación alteró negativamente las propiedades físicas de estos suelos. Se ha estudiado la variabilidad espacial de las propiedades hidráulicas y de las concentraciones totales de los elementos traza en suelos sometidos a recuperación, de dos zonas de la cuenca del Guadiamar afectadas por el vertido: finca Los Lagares (suelo arcilloso) y vado de El Quema (suelo franco). En cada zona se estableció una malla de 50 x 50 m que cubre 10 ha, con 40 puntos, en los cuales 1) se midieron *in situ* las propiedades hidráulicas de la capa superficial en el intervalo próximo a saturación y 2) se tomaron muestras a las profundidades de 0-10, 10-20 y 20-30 cm para la determinación de las concentraciones totales de S, As, Cu, Fe, Pb y Zn. El análisis de los resultados se llevó a cabo por métodos geoestadísticos. En ambas zonas, los coeficientes de variación de la conductividad hidráulica fueron superiores al 70% y los correspondientes semivariogramas se ajustaron a modelos esféricos o lineales. La alta variabilidad de la conductividad hidráulica está fuertemente relacionada con los cambios en la textura del suelo. Las concentraciones totales de elementos traza, también mostraron alta variabilidad. Los correspondientes semivariogramas mostraron cierta estructura espacial, y generalmente se ajustaron a modelos esféricos o lineales.

**ABSTRACT.** After the failure of the Aznalcóllar mine dam (25/04/98), several works were carried out in order to remediate the soils. These works consisted: a) removal of the deposited sludge together with the contaminated top soil layer to a maximum depth of 20 cm, and b) the application of amendments. As a consequence of these works variable amounts of sludge were buried into the soil

in a random way. This produced an increase in the concentrations of trace elements. The use of heavy machinery during the remediation works affected negatively the physical properties of these soils. We have studied the spatial variability of the hydraulic properties and the total concentrations of trace elements in the soils under remediation in two zones of the Guadiamar river valley affected by the mine-tailing spill. These zones were: Los Lagares (loam clay soil) and vado del Quema (loamy soil). In each zone a sampling grid was established with nodes at 50 by 50 m covering a surface of 10 ha with a total of 40 sampling points. In these points were measured *in situ* the hydraulic properties of the surface soil layer in the range near saturation, and soil samples were taken at the depths of 0-10, 10-20 and 20-30 cm in which the total concentrations of S, As, Cu, Fe, Pb and Zn were determined. The analysis of results was carried out using geostatistical methods. In both zones, the coefficients of variation of the hydraulic conductivity were greater than 70%, and the semivariograms fitted to spherical or linear models. The high variability of the hydraulic conductivity is strongly related with the variability of soil texture. The total concentrations of the trace elements showed also a high spatial variability and their semivariograms showed some spatial structure. In general, these semivariograms fitted to spherical or linear models.

---

### 1. Introducción

Después del accidente minero de Aznalcóllar (25/04/98) se llevaron a cabo las labores de recuperación de los suelos, consistentes en a) la remoción de los lodos depositados sobre la superficie de los mismos, así como de una capa de suelo contaminado de hasta 20 cm de profundidad, y b) la aplicación de enmiendas. Como consecuencia de estas labores, quedaron enterradas en los suelos, cantidades variables de lodos (0,5 y el 3% en peso), distribuidas aleatoriamente, lo que ha dado lugar a aumentos en las concentraciones totales de elementos contaminantes, respecto a las existentes inmediatamente después del vertido (Cabrera et al., 1999; Cabrera, 2000). Por otra parte, la utilización de maquinaria pesada en las labores de

recuperación alteró negativamente las propiedades físicas de estos suelos.

En este trabajo se ha estudiado la variabilidad espacial de las propiedades hidráulicas y de las concentraciones totales de los elementos traza en suelos sometidos a recuperación, de dos zonas de la cuenca del Guadiamar afectadas por el vertido: finca Los Lagares (suelo arcilloso) y vado de El Quema (suelo franco).

## 2. Material y métodos

Con objeto de determinar la variabilidad espacial de la textura y de las propiedades hidráulicas del suelo, se realizó un estudio detallado en las zonas mencionadas. Para ello, se estableció en cada zona una malla de 50 x 50 m que cubre 10 ha, con un total de 40 puntos, en los cuales se midieron *in situ* las propiedades hidráulicas de la capa superficial y se tomaron muestras a las profundidades de 0-10, 10-20 y 20-30 cm. Estas dos zonas representan: 1) suelos franco arcillosos (Los Lagares) y 2) suelos francos (vado de El Quema). Las medidas de las propiedades hidráulicas del suelo se realizaron *in situ* mediante un permeámetro de disco de succión en el rango próximo a saturación (Perroux y White, 1988). Las succiones ( $h$ ) utilizadas en este trabajo fueron -5 mm, -40 mm y -120 mm. El cálculo de la conductividad hidráulica ( $K$ ) se realizó de acuerdo con Ankeny et al. (1991). Las muestras de suelo se analizaron en el laboratorio, para determinar las concentraciones totales de elementos trazas, mediante ICP-OES (espectrometría óptica-plasma acoplado inductivamente), previa digestión de las muestras con agua regia en horno microondas. El estudio estadístico clásico de los resultados y las pruebas de normalidad de las variables se efectuó utilizando el programa SPSS (v. 11.5) para Windows y el estudio geoestadístico (semivariograma y krigeado), para determinar la variabilidad espacial de los diferentes parámetros, mediante el programa Surfer (v. 7.0).

## 3. Resultados y discusión

El análisis estadístico clásico ha puesto de manifiesto que la conductividad hidráulica muestra coeficientes de variación superiores al 70% en las dos zonas estudiadas. Los resultados de las pruebas de normalidad muestran que  $K$  se ajusta a una distribución log-normal, excepto en el caso de la zona del vado del Quema donde  $K$  a  $h = -5$  mm mostró una distribución normal. En los casos de distribución log-normal los semivariogramas se obtuvieron utilizando el log  $K$ . Los semivariogramas de esta propiedad están afectados por un efecto de pepita importante. En la mayoría de los casos, los semivariogramas se ajustan a un modelo lineal o esférico. En la Fig. 1 se muestra un ejemplo del ajuste del semivariograma de log  $K$ , para  $h = -5$  mm en la zona de los Lagares (el ajuste se ha realizado visualmente), a un modelo lineal con una pendiente de 8.66 10<sup>-5</sup> y un efecto de pepita de 0.04 (64% de la varianza). La

alta variabilidad de esta propiedad está fuertemente relacionada con los cambios de la composición textural del suelo dentro de las zonas de muestreo.

En la Fig. 2 se muestra un ejemplo la distribución de los valores de log  $K$ , para la succión  $h = -5$  mm, en la capa superficial del suelo de la zona de los Lagares. Estos resultados muestran la alta variabilidad encontrada para esta propiedad. Los valores más elevados de  $K$  corresponden a zonas donde el contenido de arena de esta capa de suelo es más elevado que en el resto de la parcela de acuerdo con los resultados de textura encontrados por Moreno et al. (2001) para esta misma parcela. Para las otras succiones utilizadas se han obtenido distribuciones de valores de  $K$  similares a los expuestos en la Fig. 2.

En la zona del vado del Quema también se aprecia una variabilidad alta de los valores de la conductividad hidráulica para la succión  $h = -5$  mm en la capa superficial del suelo (Fig. 3). Los valores máximos de  $K$  no son tan elevados como en la zona de los Lagares debido a que el suelo del vado del Quema se encontraba más compactado como consecuencia del paso de maquinaria pesada durante la retirada de los lodos.

En lo que se refiere a las concentraciones totales de los elementos trazas, también se observó una variabilidad alta. Por ejemplo, en el caso del As se obtuvieron coeficientes de variación del 120% en la zona de Los Lagares, mientras que en la zona de El Vado del Quema el coeficiente de variación fue del 70%. Las concentraciones de los elementos estudiados mostraron una distribución log-normal en la mayor parte de los casos.

El estudio geoestadístico reveló, asimismo, que los semivariogramas de los elementos trazas mostraban cierta estructura espacial. En la mayoría de los casos, los semivariogramas experimentales se ajustan a un modelo esférico o a un modelo lineal. En la Fig. 4 se muestra como ejemplo el semivariograma de log As en la zona del vado del Quema y su ajuste a un modelo esférico (ajuste visual), con un valor de la meseta de 0.051, rango de aproximadamente 80 m y un efecto de pepita de 0.0125 que representa el 28% de la varianza.

Las Figs. 5 y 6 muestran las distribuciones espaciales del log de concentración de As en la zona de los Lagares y vado del Quema respectivamente. En la zona de los Lagares las concentraciones de As total fueron mayores que las encontradas en el vado del Quema. Asimismo, en los Lagares existen un número elevado de puntos con grandes concentraciones de As, debido a la existencia de lodos que quedaron enterrados durante las labores de limpieza y que hemos podido observar durante los muestreos (Moreno et al., 2001). Esta situación fue mucho menos importante en la zona del vado del Quema.

En las Figs. 7 y 8 se muestran dos ejemplos de la distribución espacial del log de la concentración de Zn en las zonas de los Lagares y vado del Quema respectivamente. Las concentraciones máximas encontradas en la zona de los Lagares fueron menores que en la zona del vado del Quema. Sin embargo, en los Lagares existe un aumento progresivo de la concentración de Zn a medida que nos acercamos a la

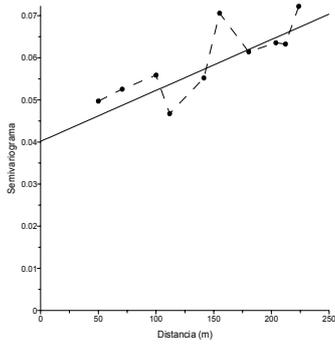


Fig. 1. Semivariograma de log K para la succión  $h = -5$  mm, en la zona de los Lagares.

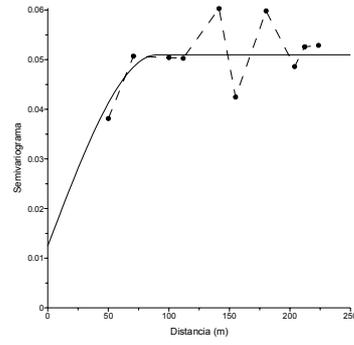


Fig. 4. Semivariograma de log de la concentración total de As en la capa de suelo de 0-10 cm en la zona de los Lagares.

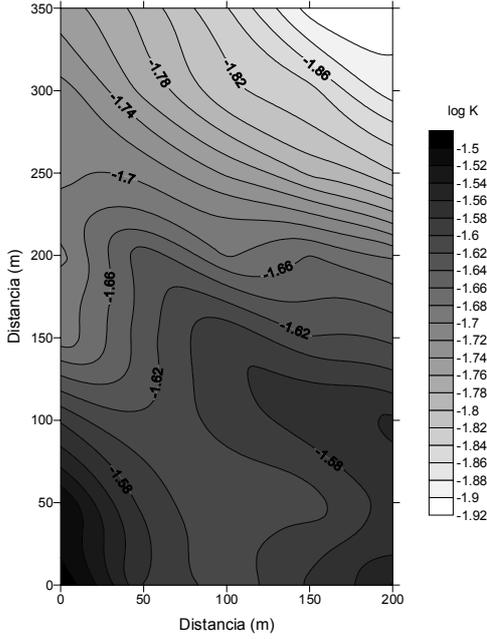


Fig. 2. Mapa de distribución de valores de log K para la succión  $h = -5$  mm en la zona de los Lagares.

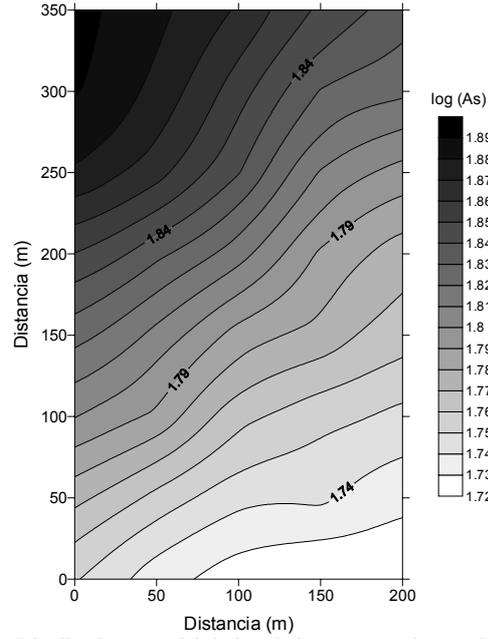


Fig. 5. Distribución espacial de log de la concentración total de As en la capa de suelo de 0-10 cm en la zona de los Lagares.

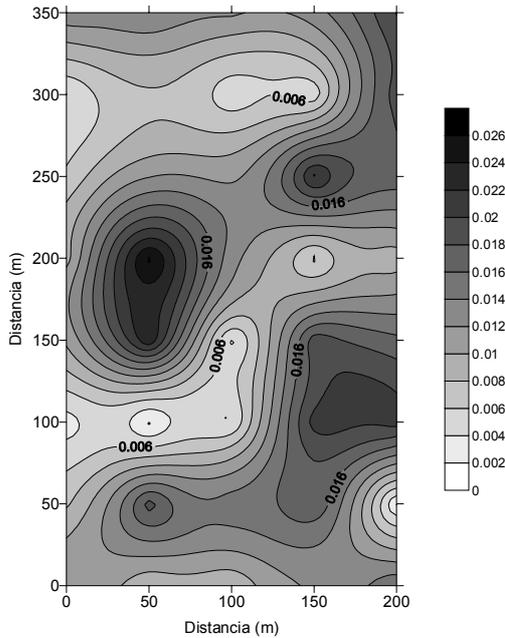


Fig. 3. Mapa de distribución de valores de conductividad hidráulica ( $K$ ,  $\text{mm s}^{-1}$ ) para la succión  $h = -5$  mm en la zona del vado del Quema.

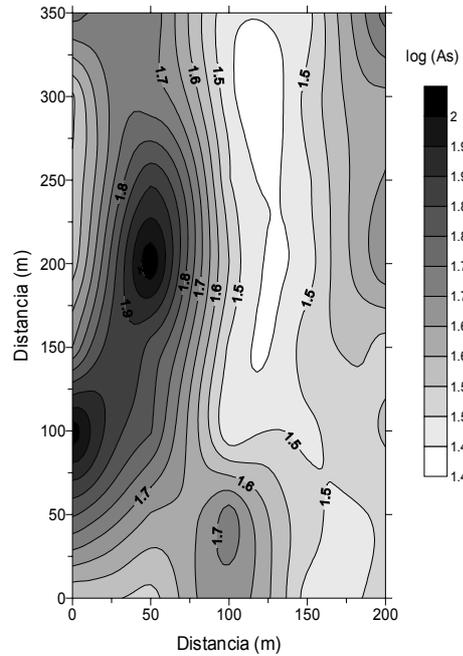


Fig. 6. Distribución espacial de log de la concentración total de As en la capa de suelo de 0-10 cm en la zona del vado del Quema.

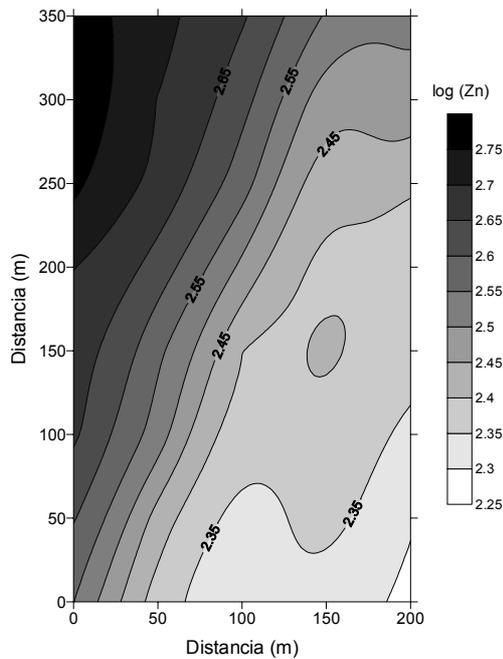


Fig. 7. Distribución espacial de log de la concentración total de Zn en la capa de suelo de 0-10 cm en la zona de los Lagares.

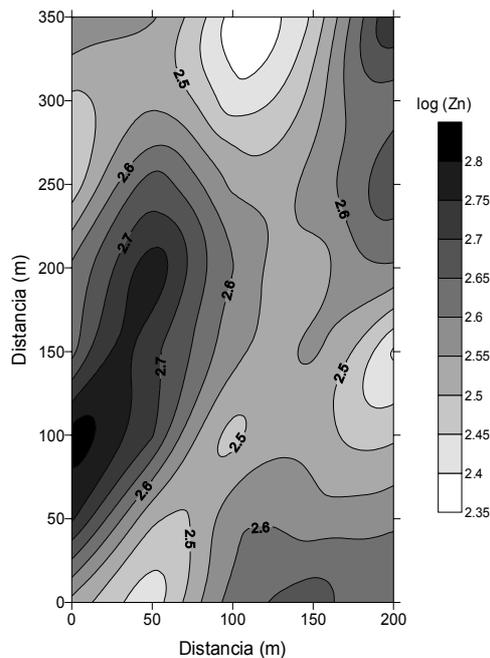


Fig. 8. Distribución espacial de log de la concentración total de Zn en la capa de suelo de 0-10 cm en la zona del vado del Quema.

orilla del cauce del río Guadiamar (el cauce del río se sitúa a la izquierda del eje y de la Fig. 7). Por el contrario, en la

zona del vado del Quema las concentraciones mayores se encontraron en la parte más alejada del cauce del río (en este caso el cauce del río se sitúa a la derecha del eje y de la Fig. 8). Ello se debió, sin duda, a que en esta parcela existe una ligera depresión en la parte más alejada del cauce del río, en la cual se depositaron mayores cantidades de lodos.

Las concentraciones totales del resto de elementos trazas analizados en este trabajo, así como sus distribuciones espaciales presentaron características similares a las de los elementos de los ejemplos presentados. Ello ocurrió también en las otras dos profundidades muestreadas, si bien con la profundidad disminuía la concentración de cada elemento traza.

#### 4. Conclusiones

La conductividad hidráulica de los suelos mostró una elevada variabilidad espacial, particularmente en la zona de los Lagares, lo que está de acuerdo con la variabilidad de la textura del suelo. En algunos casos los valores de conductividad hidráulica son bajos debido a la compactación del suelo por la maquinaria utilizada en la labor de retirada de los lodos.

Las concentraciones totales de elementos trazas también mostraron una elevada variabilidad espacial.

*Agradecimientos.* Los autores agradecen la ayuda de J. Rodríguez durante las medidas de campo y toma de muestras. Trabajo realizado dentro del proyecto CICYT-FEDER, 1FD97-0765.

#### Referencias

- Ankeny, M.D., Ahmed, M., Kaspar, T.C. y Horton, R. (1991). Simple field method determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 467-470.
- Cabrera, F. (2000). La contaminación por metales pesados en el valle del Guadiamar tras el vertido de Aznalcóllar. *Revista Técnica de Medioambiente* 74; 37-48.
- Cabrera, F., Clemente, L., Díaz Barrientos, E., López, R. y Murillo, J.M. (1999). Heavy metal pollution of soils affected by Guadiamar toxic flood. *The Science of the Total Environment* 242; 117-129.
- Moreno, F., Cabrera, F., Fernández, J.E., y Girón, I.F. (2001). Propiedades hidráulicas y concentración de metales pesados en los suelos y en las aguas de drenaje de dos zonas afectadas por el vertido (En: C. Alonso et al., "Los suelos del Guadiamar: estudios de caracterización y de la evolución de los suelos contaminados por el lodo", *Boletín Geológico y Minero*, 112: 163-197). *Boletín Geológico y Minero*, 112, 178-184.
- Perroux, K.M. y White, I. (1988). Designs for disc permeameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52, 1205-1215.