

## Geoquímica y mineralogía aplicadas a estudios de impacto ambiental derivado de la combustión del carbón

X. QUEROL, R. CREHUET, A. ALASTUEY, A. I. LOPEZ-SOLER,  
J.L. FERNANDEZ-TURIEL, F. PLANA, J.A. PUICERCUS

Institut de Ciències de la Terra Jaume Almera, CSIC,  
C/ Lluís Solé Sabarís, 08028 Barcelona

### RESUMEN

En el presente artículo se muestran dos ejemplos de aplicación de geoquímica y mineralogía al estudio del impacto ambiental derivado de la combustión de las centrales termoeléctricas de carbón. La investigación se centra en el estudio del comportamiento de elementos traza durante la combustión del carbón, en la determinación de balances de emisiones de elementos traza en una gran central térmica y sobre la delimitación de áreas de impacto alrededor de la misma por medio del seguimiento de las cenizas volantes.

*Palabras clave:* Carbón, central térmica, elementos traza, cenizas volantes.

### ABSTRACT

The present article summarizes two studies of applications of geochemistry and mineralogy to the research on the environmental impact around coal-fired power stations. The research is focused on the behaviour of the trace elements during coal combustion in power stations, the determination of mass balances for trace element emissions from a large power station, and the delineation of impact areas around the power station by monitoring the fly ash distribution.

*Key words:* Coal, power station, trace elements, fly ash.

### INTRODUCCION

Numerosos elementos se encuentran en el carbón en concentraciones ampliamente variables tanto a escala regional como local (Swaine, 1990; Finkelman, 1982). Es-

tas variaciones son debidas a la evolución geoquímica de los depósitos de carbón que depende tanto de la química del paleoambiente de la turbera, como de la historia diagenética. El carbón puede enriquecerse en muchos elementos traza debido las condiciones geoquímicas extremas que tienen lugar durante la formación de la turba y el carbón. Tanto la materia orgánica, como los minerales diagenéticos pueden actuar como trampas de numerosos elementos (Swaine, 1990).

Las transformaciones físico-químicas que tienen lugar durante la combustión del carbón en una central termoeléctrica dan lugar a emisiones de elementos potencialmente tóxicos al medio ambiente circundante (Smith, 1987; Clarke y Sloss, 1992). Las emisiones están constituidas por gases de combustión, acompañados de cenizas volantes que escapan a los sistemas de retención de partículas. Las emisiones dependen del consumo de combustible, de la calidad de éste y de la tecnología de la combustión.

La demanda creciente de electricidad de los países europeos ha llevado a la construcción de grandes centrales termoeléctricas de carbón. El consecuente aumento del consumo de carbón conlleva un aumento paralelo de emisiones de SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y cenizas volantes peligrosas para el hombre y el medio ambiente. A pesar de que los sistemas de retención de partículas tienen efi-

ciencias muy altas (cerca de un 99.95% para precipitadores electrostáticos), la cantidad de cenizas en valor absoluto que se emiten es muy alta, puesto que los consumos de carbón también lo son. Si, por ejemplo, tomamos una central de 1000 MW con un consumo de 12000 toneladas de carbón subbituminoso al día con un contenido de un 25% de cenizas y una producción de cenizas volantes de un 80% del residuo total; entonces la producción de cenizas volantes se puede estimar en 2400 toneladas al día, de modo que, aunque se retuviera un 99.95% de éstas, la central emitiría cerca de 1 tonelada al día de cenizas. Una vez en la atmósfera, las cenizas volantes pueden ser transportadas y dispersadas según las condiciones atmosféricas a muy distinta escala (Mason, 1992).

Las cenizas volantes pueden alcanzar el suelo a distancias que van desde unos pocos a cientos de kilómetros dependiendo de su tamaño así como de la altura de la chimenea. Las partículas de las cenizas volantes son altamente contaminantes pues su alta área superficial permite su enriquecimiento en elementos traza, potencialmente tóxicos, que se fijan en éstas durante el proceso de enfriamiento de los gases de combustión (Klein et al., 1975; Coles et al., 1979). Se considera que algunos compuestos de As, Cd, Cr y Ni son carcinógenos humanos, cuya vía principal de entrada al cuerpo es por inhalación (Que Hee et al., 1982). Además, mientras que las partículas más pequeñas son ligeramente mutágenas, las de mayor tamaño no lo son (Fisher et al., 1979).

El presente artículo muestra dos ejemplos de estudios realizados por personal científico del Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera sobre balances de emisiones de elementos traza en una gran central térmica y sobre la delimitación de áreas de impacto alrededor de la misma por medio del seguimiento de las cenizas volantes (Querol et al., 1994).

## 1. COMPORTAMIENTO DE LOS ELEMENTOS TRAZA DURANTE LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN EN CENTRALES TÉRMICAS

La movilidad de los elementos traza durante la combustión está ligada a su volatilidad (Smith, 1987; Clarke y Sloss, 1992). Esta depende de varios factores como las afinidades (distribución de un elemento en la fase orgánica o las diferentes fases minerales) de los elementos, sus reacciones con Cl, S y otros elementos volátiles, así como de la tecnología de la combustión.

El presente estudio trata de la distribución de elementos traza (As, B, Ba, Be, Bi, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Ga, Ge, Hg, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Se, Sn, Sr, Ta, Th, Tl, U, V, W, Y, Zn, Zr y Tierras Raras) en un carbón subbituminoso español y su comportamiento durante la combustión en una gran central térmica a través del estudio del contenido y distribución en los residuos de combustión. Con este fin se muestrearon durante un período de 7 días los alimentadores de carbón y los diferentes residuos de combustión en la central térmica. Después del tratamiento de las muestras, siguiendo la normativa ISO, se obtuvieron sub-muestras de carbón y de residuos a través de los siguientes tratamientos:

- fracciones de densidad (carbones y residuos).
- fracciones magnéticas y no-magnéticas (residuos).
- fracciones granulométricas (cenizas volantes).

El estudio mineralógico de las sub-muestras se llevó a término mediante DRX. Las concentraciones de los elementos mayores y traza se determinaron mediante ICP-MS e ICP-AES previa digestión total de la muestra.

### 1.1. Caracterización mineralógica

El carbón estudiado se caracteriza por altos contenidos de azufre y materia mineral. Entre las fases minerales mayoritarias se encuentran: caolinita, illita, pirita, marcasita, yeso, cuarzo, microclina, albita-anortita y calcita. Las cenizas y escorias están compuestas por fases vítreas aluminosilicatadas, cuarzo, mullita, óxidos de hierro y anhidrita. Cabe destacar el marcado incremento del contenido en anhidrita en las fracciones de granulometría inferior (<10 mm) de las cenizas volantes (Figura 1).

### 1.2. Contenido y distribución de elementos traza

#### Carbón

La correlación entre los contenidos de las diferentes fases minerales y orgánicas con los contenidos en elementos mayores y traza para las distintas fracciones de densidad permite la deducción de las siguientes afinidades:

- a) Elementos con afinidad inorgánica:
  - a.1. En arcillas y feldspatos: Al, K, Mg, Na, P, Ti, Li, Cr, Ni, Cu, Ga, Rb, V, Sr, Y, Sn, Cs, Ba, Ta, Pb,

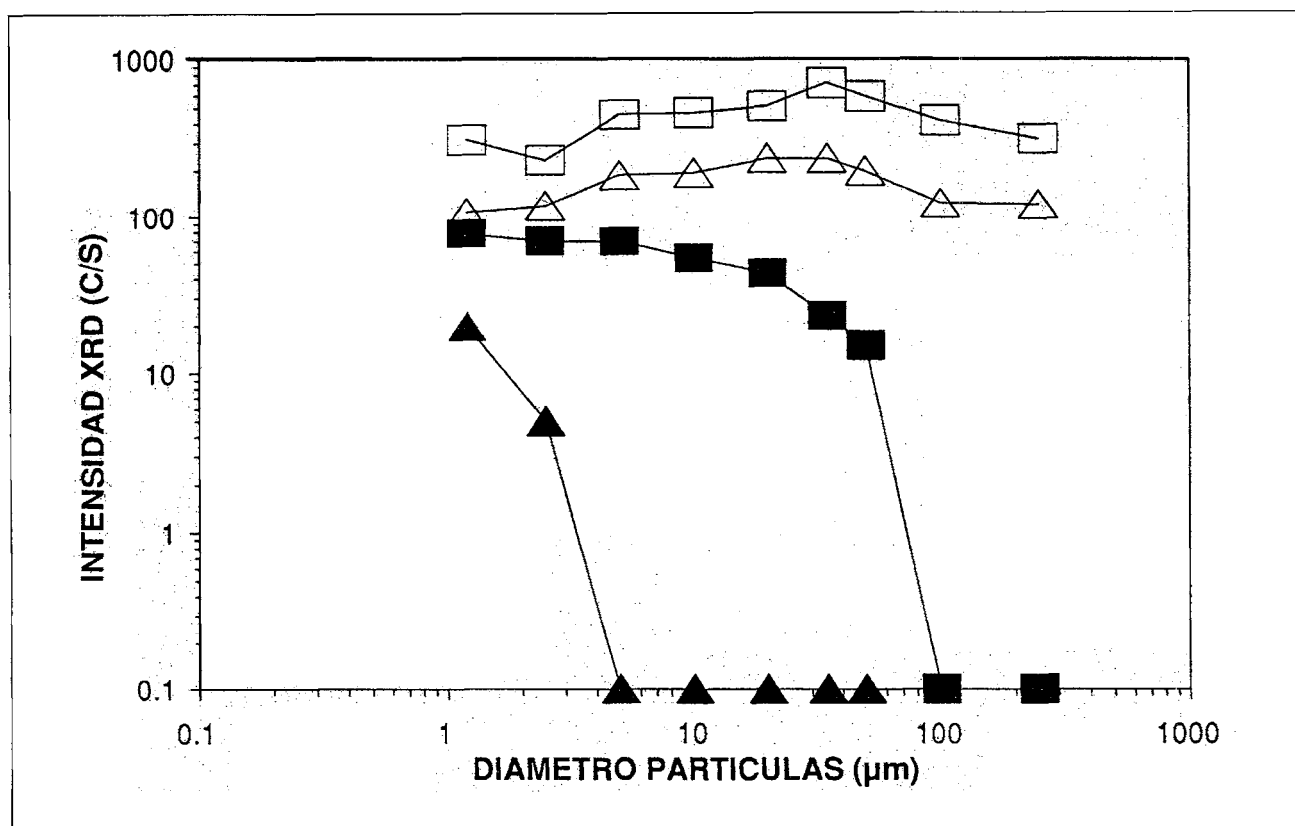


Figura 1.- Distribución mineral en las fracciones granulométricas de las cenizas volantes. Los valores corresponden a las intensidades de DRX de la máxima reflexión para cada mineral (proporcional a la concentración).

Figure 1.- Mineral distribution in the grain size fractions from fly ash, deduced from the XRD intensity of the maximum reflection of each mineral (proportional to its concentration) in the different grain size fractions.

Bi, Th, U, y Tierras Raras.

a.2. En sulfuros: S, Fe, Ni, Co, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Sb, Hg, W, Pb, Tl.

a.3. En carbonatos: C, Ca, Mn, Co.

a.4. En sulfatos: S, Ca, Fe, Ba.

a.5. En minerales pesados: B, Ti, Th, Zr.

a.6. En varias fases minerales:

- Co, W en carbonatos y sulfatos.

- Ni, Cu, Pb en Arcillas y sulfuros.

b) Elementos con afinidad orgánica: C, N, S, Be, B, Ge, V, W, Zr

#### Residuos de combustión

La comparación del contenido en elementos traza entre cenizas y escorias muestra las siguientes evidencias:

a) As, B, Bi, Cd, Ge, Hg, Mo, Pb, S, Se, Sb, Sn, Tl y Hg son más abundantes en las cenizas volantes.

b) Cu y Fe son más abundantes en las escorias.

c) Li, Be, V, Cr, Co, Ni, Zn, Ga, Rb, Sr, Zr, Y, Cs, Ba, Ta, W, Th, U, Al, Ca, K, Mg, N, Na, P, Ti y Tierras Raras se encuentran en igual proporción en las cenizas volantes y las escorias.

Los elementos enriquecidos en las cenizas volantes tienden a formar compuestos volátiles que pueden condensar parcialmente en los sistemas de retención de partículas de la central térmica (Clarke y Sloss, 1992). Otro factor de enriquecimiento es el que proviene de la reacción con óxido de calcio. El caso más claro es el sulfato:  $\text{CaO} + \text{SO}_3 \rightarrow \text{CaSO}_4$ . Pero otros óxidos ácidos pueden dar la misma reacción, como se ha demostrado para As y B (Huggins et al., 1993; Hoffman et al., 1994).

Por otro lado, el óxido de hierro se enriquece en las escorias a causa de un fraccionamiento de densidades en el reactor. Lógicamente aquellos elementos que tengan

afinidad al óxido de hierro también se enriquecen en las escorias.

Los resultados del análisis de las fracciones granulométricas muestran un grupo de elementos con afinidades a sulfatos y aluminosilicatos con factores de enriquecimiento de entre 2 y 20 para las partículas <math><10 \mu\text{m}</math>: As, B, Be, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Ga, Ge, Hg, Mo, Na, Ni, Pb, S, Sb, Se, Sn, Tl, U, V, W, Zn. La mayor parte de estos elementos coinciden con los de mayor volatilidad potencial identificados en la comparación entre cenizas volantes y escorias. El proceso de absorción por CaO ya mencionado permite que los gases de salida tengan contenidos bajos en estos elementos. No obstante las cenizas volantes, especialmente las de menor tamaño, se enriquecen en estos elementos, con un potencial tóxico elevado. Teniendo en cuenta que son justamente las partículas de menor tamaño (<math><8 \mu\text{m}</math>) las que tienen toxicidad por inhalación, esto supone un problema que hay que tener en cuenta a la hora de tratar estas cenizas volantes.

### 1.3. Factores de enriquecimiento

Se define el factor de enriquecimiento (EF) según Gordon y Zoller (1973) como la relación:

$$EF = \frac{\frac{[X]_s}{[A]_s}}{\frac{[X]_c}{[A]_c}}$$

Donde  $[X]_s$  es el contenido de un elemento en las cenizas volantes (o escorias) y  $[X]_c$  en el carbón. Análogamente para el aluminio. Esta relación permite conocer el comportamiento de los elementos traza basándose en una normalización respecto a un elemento no volátil (Al). En la figura 2 se muestran los EF para algunos elementos estudiados. Se observa que los volátiles tienen  $EF < 1$  y pueden mostrar  $EF_{\text{escoria}} < EF_{\text{cenizas volantes}}$  debido a la parcial condensación ya mencionada. Como la central estudiada produce el 80% de cenizas volantes frente al 20% de escorias,  $EF_{\text{total}} = EF_{\text{cenizas volantes}} \times 0.8 +$

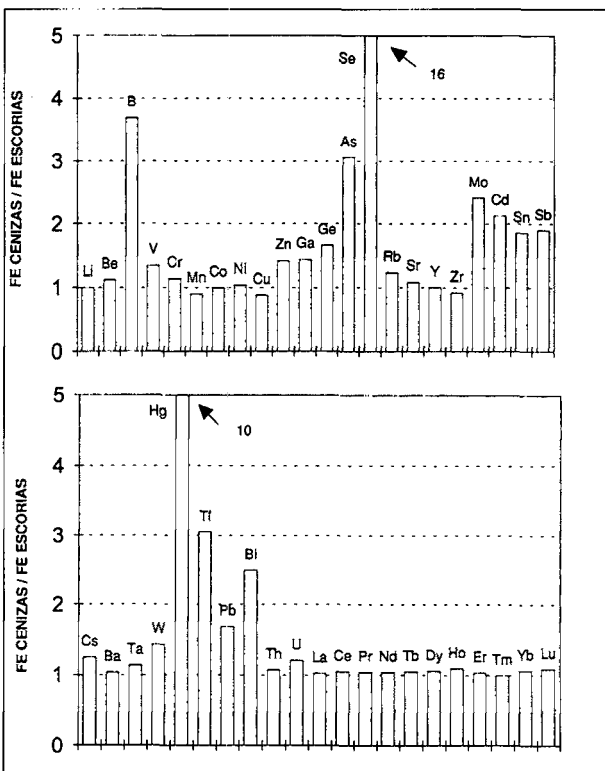


Figura 2.- Factores de enriquecimiento para algunos elementos traza en las cenizas volantes y escorias. EF CENIZAS / EF ESCORIAS, relación de los factores de enriquecimiento en cenizas volantes y escorias para cada elemento.

Figure 2.- Enrichment factor coefficients for some trace elements in the fly ash and slag. EF CENIZAS / EF ESCORIAS, relation between enrichment factors of fly ash and slag for each element.

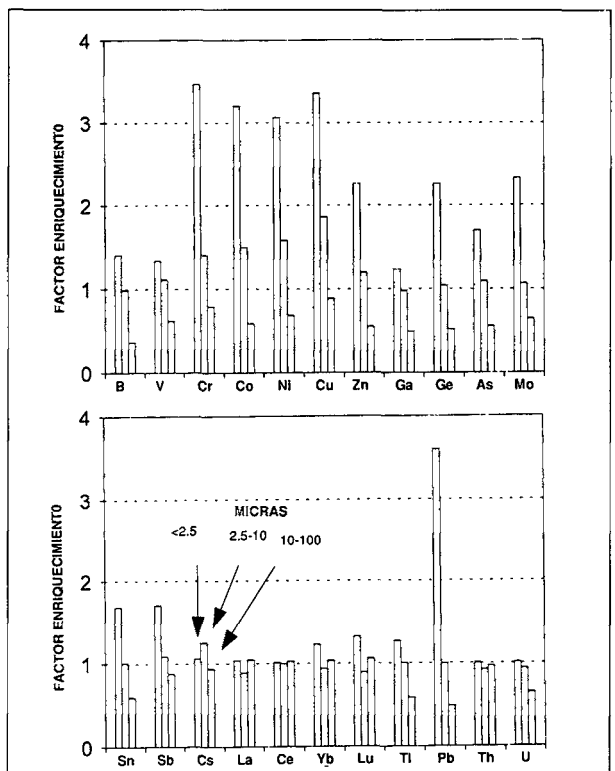


Figura 3.- Factores de enriquecimiento para algunos elementos traza en las fracciones granulométricas de las cenizas volantes (<math><2.5 \text{ mm}</math>, 2.5-10 mm y 10-100 mm).

Figure 3.- Enrichment factor coefficients for some trace elements in grain size fractions obtained from fly ash (<math><2.5 \text{ mm}</math>, 2.5-10 mm and 10-100 mm).

$Ef_{escoria} \times 0.2$ . De estos valores se puede concluir:

- a) El fraccionamiento de los elementos mayoritarios es menos apreciable, a excepción del azufre (volátil) y del hierro (enriquecido en la escoria). De aquí se infiere que las muestras tomadas eran representativas y los análisis correctos.
- b) Los elementos volátiles son: B, Zn, Ga, Ge, As, Se, Mo, Cd, Sb, Sn, Hg, Tl, Bi. En el carbón estos elementos tienen afinidades orgánicas y a sulfuros, se ha visto que eran volátiles por fraccionamiento de partículas por tamaños y comparando los contenidos en cenizas volantes y escorias.
- c) Para los elementos traza que tienen comportamiento volátil (B, Zn, Ga, Ge, As, Se, Mo, Cd, Sn, Sb, Hg, Tl, Bi, Pb)  $EF_{total}$  es sólo ligeramente  $<1$  excepto para As, Se, Hg, Pb. No obstante en todos estos casos el enriquecimiento en las cenizas volantes respecto a las escorias es considerable, lo que demuestra la importancia de la condensación y absorción (mayoritariamente en CaO) durante el tratamiento de los gases de salida en el que la temperatura baja de 1400 a 150°C.

Respecto a la distribución de los elementos según el tamaño de las partículas (Figura 3), se ha visto que:

- a) Ti, Li, Rb, Sr, Y, Zr, Ba, Ta, Th y tierras raras no mostraban segregación.
- b) Ca, Mg, Na, P, V, Ga, W, Tl y U mostraban poca segregación.
- c) Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ge, As, Mo, Cd, Sn, Sb, Pb, Bi mostraban una fuerte segregación.

De estos los que se enriquecían en las fracciones de menor tamaño pueden separarse en dos grupos:

- a) Ca, Mg, Na, P, V, Cr, W, U que forman óxidos y sulfatos.
- b) As, B, Bi, Cd, Ge, Mo, Pb, Sb, Tl, Zn, que se volatilizan durante la combustión pero condensan sobre partículas mucha superficie específica en el proceso de la salida de los gases y eliminación de partículas.

#### 1.4. Conclusiones

Hay que destacar que las emisiones de elementos tra-

za de la central, teniendo en cuenta su consumo de carbón y las altas temperaturas de trabajo, son bastante más bajas de lo que se podría esperar. Son dos los factores responsables de ello:

- a) La absorción de elementos traza en el óxido y sulfato de calcio.
- b) La condensación de los elementos volátiles después de la combustión.

Aunque estos procesos suponen una reducción del impacto potencial de las emisiones, el enriquecimiento en un gran número de elementos traza potencialmente tóxicos en las cenizas volantes crea unas emisiones de partículas de alta toxicidad potencial que deberían tenerse muy en cuenta. Por consiguiente, para el asesoramiento de la toxicidad potencial de las cenizas volantes no se recomienda el análisis de la muestra total sino de la fracción respirable ( $<10$  mm).

## 2. CONTENIDO Y DISTRIBUCION DE CENIZAS VOLANTES EN LOS SEDIMENTOS DE LAGOS Y EMBALSES ALREDEDOR DE UNA GRAN CENTRAL TERMICA

La central térmica objeto de este estudio es la C.T. Teruel (1050 MW) situada en Andorra, entre la Cordillera Ibérica y la Depresión del Ebro. La central térmica está rodeada de diversos lagos y embalses de modo que parte de las cenizas volantes emitidas pueden depositarse directamente en los embalses o bien pueden ser transportadas por los cursos fluviales y torrenciales desde las áreas de captación. El contenido en cenizas volantes en los sedimentos depende de la distancia a la central y de la superficie de captación de cada embalse. Para estudios de delimitación de áreas de impacto la C.T. Teruel ofrece las ventajas de que está situada en una zona con ninguna otra fuente de contaminación atmosférica destacable y un substrato geológico muy uniforme.

Las altas temperaturas de combustión (1600° C) dan lugar a pocas variaciones en la composición de las cenizas. Estas están compuestas de distintas fases inorgánicas entre las cuales se encuentra la magnetita lo que permite detectar la presencia de este residuo procedente de la combustión del carbón en sedimentos naturales mediante un análisis de susceptibilidad magnética. La C.T. Teruel produce cenizas volantes con un alto contenido en magnetita lo que, junto con la baja susceptibilidad de los materiales geológicos al sedimentos naturales.

## 2.1. Metodología

Se muestrearon los sedimentos en distintos lagos y embalses a varias distancias y direcciones de la C.T. Teruel, así como en varios puntos distintos de estos lagos (Fig. 4). Los sedimentos se secaron, disgregaron y se tamizaron por debajo de 0.25 mm. La susceptibilidad magnética de la fracción fina secada a 110° C se midió con un magnetómetro KLY-2 bridge.

Una vez conocidos los contenidos de magnetita de las cenizas volantes (por DRX cuantitativa) y la susceptibilidad magnética de los sedimentos se propusieron dos métodos para hallar la cantidad de cenizas volantes en los sedimentos.

Método de calibración: Se tomaron los sedimentos del embalse de Gallipúen como blanco puesto que sus

valores de susceptibilidad magnética son los menores y no se sitúa en el área de influencia de la C.T. Teruel. Se añadieron distintos pesos conocidos de cenizas volantes (Fig. 5) a fin de encontrar la relación cantidad de cenizas versus susceptibilidad magnética lo que se hizo mediante una regresión lineal ajustada por mínimos cuadrados.

Método de adición: Se tomaron los sedimentos del embalse de Calanda, los de mayor susceptibilidad magnética y localizados en la dirección predominante del viento con respecto a la C.T., como muestra de partida para el método de adición. Este método consiste en la adición de distintos pesos conocidos de cenizas volantes (Fig. 6) a los sedimentos contaminados para hacer una recta de calibración. La diferencia consiste en que es el valor  $-b$  de la recta  $y=ax-b$  el que tiene significado físico, pues representa el contenido original del sedimento de cenizas volantes.

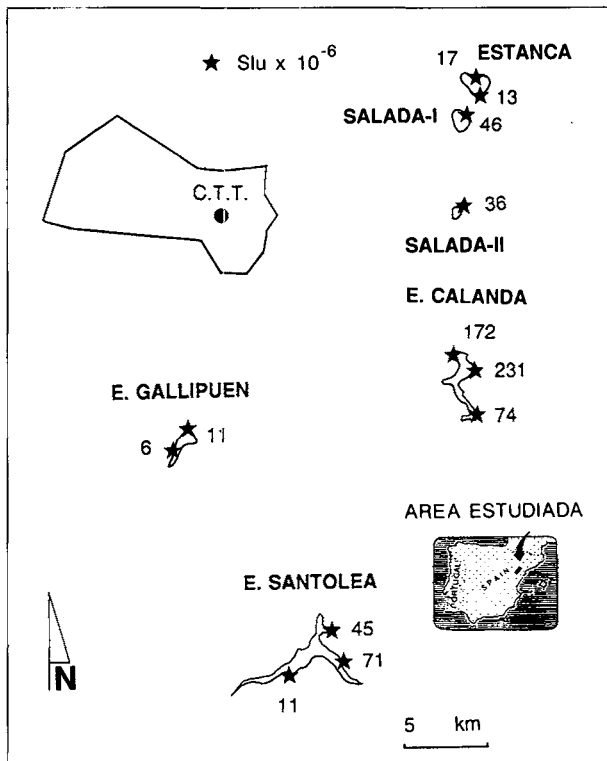


Figura 4.- Situación de los puntos de muestreo de sedimentos de lagunas y embalses alrededor de la C. T. Teruel (C.T.T.), valores medios de susceptibilidad magnética para cada punto de muestreo (en  $Slu \times 10^{-6}$ ) y media anual de las direcciones de los vientos en la central térmica.

Figure 4.- Location of sampling sites in lakes around the Teruel power station (C.T.T.), mean magnetic susceptibility values (as  $Slu \times 10^{-6}$ ) for sediments from each sampling site and annual mean wind directions in the Teruel power station.

Tabla 1.- Contenidos medios de cenizas volantes en los sedimentos de lagunas y embalses alrededor de la C.T. Teruel. Resultados en mg de ceniza en 8 cm<sup>3</sup> de sedimento (mg CE/8cc), y en % en volumen en la fracción < 200  $\mu$ m (%CE vol). Véase localización de las muestras en la Fig.4.

Table 1.- Mean fly ash content in lake sediments around the Teruel power station: results in mg of fly ash in 8 cm<sup>3</sup> of sediment (mg CE/8cc), and in % by volume in size fractions smaller than 200 microns (%CE vol). See location of samples in Fig.4.

MUESTRA	SI(E-6)	mgCE/8cm <sup>3</sup>	% CE vol °
SII - 1	46	7.0	0.034
SI - 3	36	5.1	0.024
ES - 4	13	1.0	0.005
ES - 5	17	1.8	0.008
C - 6	172	29.6	0.142
C - 7	231	40.3	0.194
C - 8	74	12.0	0.057
ST - 9	45	6.7	0.032
ST - 10	70	11.3	0.054
ST - 11	14	1.3	0.006
G - 12	11	0.7	0.003
G - 13	6	0.01	0.0004

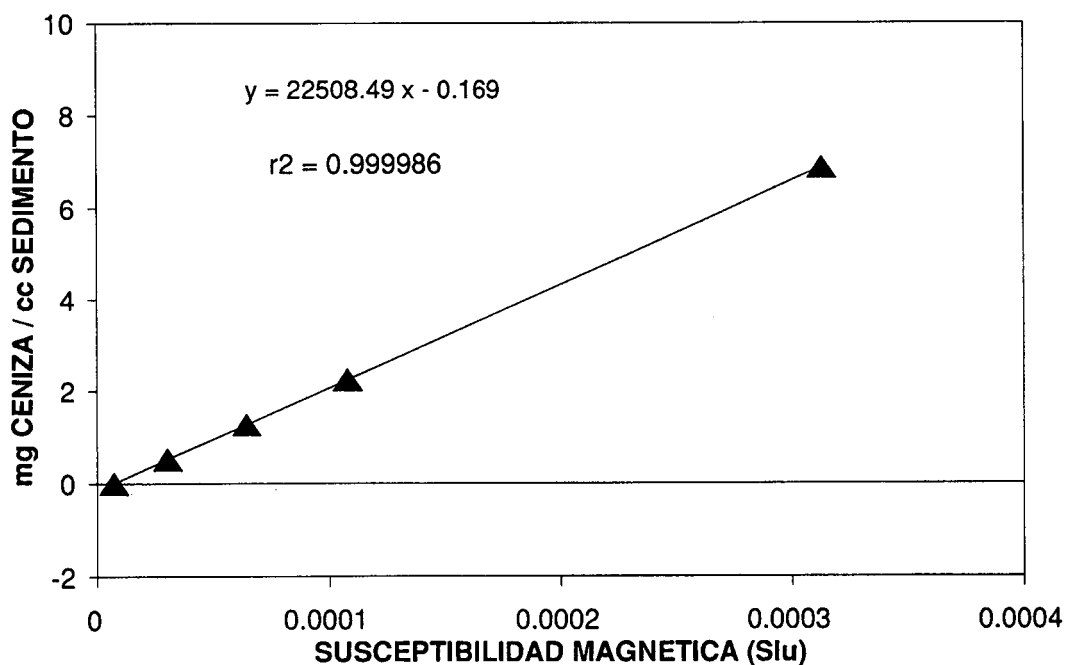


Figura 5.- Correlación de calibración entre la susceptibilidad magnética y patrones de sedimentos preparados con adición de cenizas volantes a sedimentos de baja susceptibilidad del embalse de Gallipué.

Figure 5.- Calibration correlation between the magnetic susceptibility and different laboratory standards prepared by fly ash additions in low magnetic susceptibility lake sediments from the Gallipuen lake.

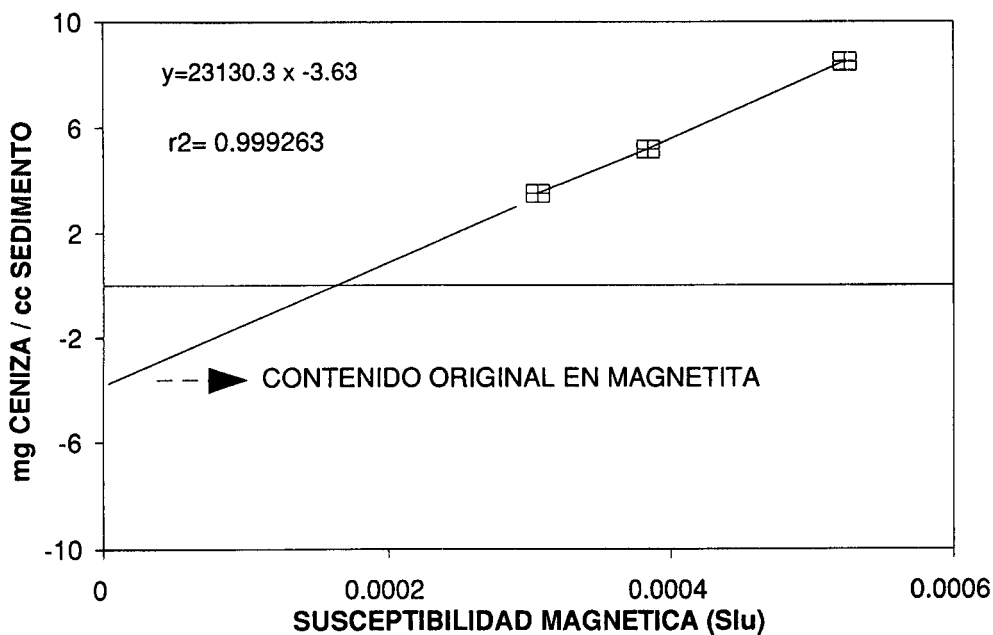


Figura 6.- Correlación de calibración entre la susceptibilidad magnética original de una muestra de sedimento del embalse de Calanda (con alta susceptibilidad magnética) y diferentes adiciones de ceniza volante a la propia muestra. Este método permite la determinación del contenido de cenizas en la muestra a la que se adita la ceniza (-b en la ecuación de calibración).

Figure 6.- Calibration correlation between the magnetic susceptibility and different fly ash additions in high susceptibility lake sediments from the Calanda lake, prepared in order to determine the fly ash content of this sediment (-b, on the calibration equation).

## 2.2. Resultados y discusión

Para comprobar la fiabilidad de los métodos expuestos se determinó el contenido en cenizas en una de las muestras del embalse de Calanda con ambos métodos. Los valores que se obtuvieron, de 3.7 y 3.6 mg cm<sup>-3</sup> en la fracción fina seca, para calibración y adición respectivamente. La similitud de los resultados, permitió analizar el resto de las muestras sólo con el método de calibración que se destaca por tener una preparación y análisis de muestra muy rápidos y fáciles, sin sacrificar una buena resolución.

En la Tabla 1 se muestran las cantidades medias de cenizas volantes en los sedimentos. Observándola y comparando con el mapa de distribución de los puntos de muestreo (Fig. 4) se puede establecer claramente que:

- a) La concentración de cenizas volantes tiene un máximo en la dirección del embalse de Calanda disminuyendo progresivamente tanto hacia el norte (Salada y Estanca) como hacia el sur (Gallipué y Santolea). Esta distribución está de acuerdo con estudios previos llevados a cabo por ENDESA, confirmando los trabajos de Silverstein y Irwin (1985) y Fernández-Turiel et al. (1990) que muestran el área de Calanda-Mas de las Matas como la sometida a un mayor impacto de las emisiones de la C.T. Teruel. Además esto tiene una justificación en el hecho de que el embalse de Calanda y su área de captación se sitúa en la dirección predominante de los vientos respecto a la C.T.
- b) La distribución no muestra ninguna dependencia con el substrato geológico de las áreas de captación de lagos y embalses, pues la susceptibilidad magnética del substrato natural es menos apreciable frente a la proveniente de las cenizas volantes. Otro dato que apoya el nulo aporte de material magnético de las áreas de captación es el hecho de que los embalses de Calanda y Santolea regulan el mismo cauce fluvial y las susceptibilidades magnéticas de los sedimentos muy diferentes.

## 2.3. Conclusiones

Se ha demostrado que los análisis de susceptibilidades magnéticas de la fracción fina de los sedimentos de lagos y embalses permiten delinear áreas de influenciadas por las emisiones de partículas alrededor de las centrales térmicas.

Estos análisis para la C.T. Teruel muestran valores altos de susceptibilidades magnéticas en sedimentos al ESE y SE de la central, mientras que los valores decrecen hacia el N, S y W.

La susceptibilidad magnética está relacionada con el depósito de cenizas volantes a causa del gran contenido en magnetita de las cenizas de la C.T. Teruel.

Se han desarrollado métodos de adición y de calibración para determinar el contenido en cenizas volantes de los sedimentos.

## AGRADECIMIENTOS

Los estudios presentados en este artículo han sido financiados por la Comunidad Europea del Carbón y del Acero (contrato 7220/ED/014) y por el Plan Nacional de Investigación y Desarrollo de la CICYT (proyecto AMB-95-1102).

Los autores agradecen a E.N.D.E.S.A. las facilidades dadas para el muestreo así como por su apoyo en las investigaciones.

## BIBLIOGRAFIA

- CLARKE, L.B., SLOSS, L.L., 1992: *Trace Elements Emissions from Coal Combustion and Gasification*, IEA Coal Research Report., IE-ACR/49, 111 pp.
- COLES, D.G., RAGAINI, R.C., ONDOV, J.M., FISHER, G.L., SILVERMAN, D., PRENTICE B.A., 1979: Chemical studies of stack fly ash from a coal-fired power plant, *Environ. Sci. Tech.*, 13, pp 455-459.
- FERNÁNDEZ-TURIEL, J.L., QUEROL, X., LÓPEZ-SOLER, A., CHINCHÓN, J.S., 1990: *Análisis de algunos elementos traza en suelos de los alrededores de la Central Térmica de Teruel*, E.N.D.E.S.A. Informe Interno, 248 pp.
- FINKELMAN, R.B., 1982: *Atomic and Nuclear Methods in Fossil Energy Research* (Eds R.H. Filby, B.S. Carpenter y R.C. Ragaini), Plenum Press, New York, pp. 141-149.
- FISHER, G.L., CHRISP, C.E., RAABE, O.G. 1979: Physical Factors affecting Mutagenicity of Fly Ash from a Coal Fired Power Plant, *Science*, 204, pp 879-881.
- GORDON, G.E., y ZOLLER W.H., 1973: *Normalization and interpretation of atmospheric trace element concentration patterns*, Proceedings of the 1st Annual NSF Trace Contaminants Conference, Oak Ridge National Laboratory, pp. 314-325.
- HUFFMAN, G.P., HUGGINS, F.E., SHAH, N. y ZHAO, J., 1994: Speciation of arsenic and chromium in coal and combustion ash by XFS spectroscopy. *Fuel Processing Technology*, 39, pp. 47-62.
- HUGGINS, F.E., ZHAO J., SHAH, N. y HUFFMAN, G.P., 1993: *Speciation of trace elements in coal from XAFS spectroscopy*. Proceedings of the 7th International conference on Coal Science, Alberta, Canada, pp. 660-663.
- KLEIN, D.H., ANDREN, A.W., CARTER, J.A., EMERY, J.F., FELDMAN C., FULKERSON, W., LYON, W.S., OGLE, J.C., TALMY, Y., VAN HOOK, R.Y., BOLTON, N., 1975: Pathways of thirty-seven trace elements through coal-fired power plants, *Environ. Sci. Tech.*, 9, pp. 973-979.



MASSON, B.J., 1992: *Acid Rain. Its causes and its effects on inland waters*, Science, technology and society series. Clarendon Press, 126 p.

QUE HEE, S.S., FINELLI, V., FRICKE, F.L., WOLNIK, K.A., 1982: Metal Content of Stack Emissions, Coal and Fly Ash from Some Eastern and Western Power Plants in the U.S.A. as obtained by ICP-AES, *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, 13, pp. 1-18.

QUEROL X., PARES J.M., PLANA F., FERNANDEZ TURIEL J.L. y LOPEZ SOLER A., 1994: Content and distribution of fly ash in lake sediments around a large coal-fired power plant. Inferences from magnetic susceptibility analyses. *Environ. Geochem. and Health*, 16, pp 19-18.

QUEROL X., FERNANDEZ TURIEL J.L. y LOPEZ SOLER A., 1995: Trace elements in coal and their behaviour during coal combustion in a large power station. *Fuel*, 74, 3, pp 331-343.

SILVERSTEIN, B. IRWIN, J.S., 1985: *Data summary of 1985 SF6 tracer experiments at Andorra (Teruel) Power Plant*, Final Report. Norks Institut for Luftforskning, (NILU), 73pp.

SMITH, I.M., 1987: *Trace Elements from coal combustions: emissions*, IEA Coal Research, London, 87 pp.

SWAINE, D.J., 1990: *Trace Elements in Coal*, Butterworth & Co. Ltd. Publishers, U.K., 278 pp.