



12. CONCLUSIONES

En este capítulo se resumen las principales conclusiones obtenidas de la elaboración del mapa geoquímico de la Comunidad Autónoma de La Rioja.

12.1. OBJETIVOS

El trabajo realizado ha tenido como objetivo principal la elaboración del mapa geoquímico de la Comunidad Autónoma de La Rioja, en el que, sobre la base geológica existente, se representa toda la información obtenida mediante las correspondientes determinaciones analíticas del medio natural.

Con la realización de este trabajo se pretende contribuir a la generación de una buena infraestructura geoquímica de La Rioja, fundamental para la planificación de cualquier otra acción que implique el uso y/o beneficio del suelo o del subsuelo.

El trabajo realizado ha tenido, además, los siguientes objetivos concretos:

- Definición de fondos geoquímicos.
- Conocimiento de las pautas de distribución de una amplia gama de elementos químicos y sus factores de control.
- Conocimiento de la variabilidad regional de los fondos geoquímicos.
- Conocimiento e interpretación de las asociaciones geoquímicas que explican la variabilidad regional.
- Diferenciación entre las pautas de distribución naturales y las de origen antrópico y distinción entre las asociaciones geoquímicas de significación natural y aquellas de origen antrópico.
- Delimitación de áreas geoquímicamente anómalas.
- Aproximación al estado medioambiental de la Comunidad Autónoma, basada en la información geoquímica de los sedimentos y suelos.



12.2. TRABAJOS REALIZADOS

La secuencia de actividades realizadas ha sido la siguiente:

- Recopilación y análisis de la información básica.
- Selección de los elementos a analizar y elección de las técnicas analíticas adecuadas.
- Preparación y planificación de trabajos.
- Preparación de la infraestructura de campo.
- Recogida, preparación y envío de las muestras al laboratorio.
- Análisis con las técnicas adecuadas para los elementos y límites de detección establecidos.
- Tratamiento estadístico de los datos analíticos.
- Interpretación de los resultados.
- Presentación de resultados.

En total, se han tomado 1.047 muestras de sedimentos de la red de drenaje y suelos, 25 muestras de roca, representativas de los distintos litotipos aflorantes en La Rioja, y 15 muestras de agua. La densidad de muestreo de sedimentos y suelos ha sido de 1 muestra por 4,8 km².

Las muestras de sedimentos, suelos y rocas se han analizado para cuarenta y nueve elementos: Ag, Al, As, Au, Ba, Be, Bi, Br, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Eu, Fe, Hf, Hg, Ir, K, La, Lu, Mg, Mn, Mo, Na, Nd, Ni, P, Pb, Rb, S, Sb, Sc, Se, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Th, Ti, U, V, W, Y, Yb, Zn. Las muestras de agua se han analizado para Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, V, Zn.

12.3. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO UNIVARIANTE

Se ha realizado el tratamiento estadístico univariante de las muestras de sedimentos de red de drenaje y de suelos.



De los 49 elementos analizados (Ag, Al, As, Au, Ba, Be, Bi, Br, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Eu, Fe, Hf, Hg, Ir, K, La, Lu, Mg, Mn, Mo, Na, Nd, Ni, P, Pb, Rb, S, Sb, Sc, Se, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Th, Ti, U, V, W, Y, Yb, Zn), Ir, Se, Sn y Hg tienen todos o casi todos los valores por debajo del límite de detección. Son variables no consideradas. Otros elementos (Ag, Au, Bi, Cd, W) tienen más del 80 % de sus valores por debajo del límite de detección, pero se han mantenido en el análisis estadístico por su significación metalogénica.

El tratamiento univariante de la información proporcionada por la campaña de prospección geoquímica multielemental de sedimentos y suelos ha permitido caracterizar geoquímicamente las formaciones geológicas aflorantes y definir zonas anómalas en elementos de interés económico.

Los dos grandes conjuntos detríticos del Sur de La Rioja, el Paleozoico de la sierra de la Demanda y el Purbeck-Weald de Cameros, se caracterizan por presentar contenidos elevados en muchos de los elementos analizados.

Así, los afloramientos paleozoicos de la sierra de la Demanda coinciden con fuertes anomalías de Al, Ba, Be, Ce, Co, Cr, Eu, Fe, K, La, Lu, Mn, Nd, Ni, Sc, Sm, Th, Ti, U, V, Y, Yb.

Los afloramientos detríticos del Purbeck-Weald de Cameros se caracterizan también por el elevado contenido en muchos de esos elementos, aunque en general menor que en la Demanda. En concreto: Al, Ba, Be, Ce, Co, Cr, Cs, Eu, Fe, La, LU, Mn, Nd, Ni, Sc, Sm, Ti, Th, U, V, Yb. En una zona concreta (cuenca del río Linares, entre las sierras de Acheda y Alcarama) los afloramientos del Purbeck-Weald se caracterizan por elevados contenidos en Ce, Co, Cr, Eu, Fe, La, Mn, Nd, Ni, Sm, U, V, Yb.

Los afloramientos de materiales triásicos, en concreto el Keuper, aparecen relativamente bien definidos por valores elevados de Br, Ca, K, Na, Rb, Sr. Peor definición tienen los materiales carbonatados jurásicos, que podrían coincidir con anomalías de Mg.



El comportamiento geoquímico de los materiales terciarios que afloran en la Depresión del Ebro es más complejo, debido fundamentalmente a su proceso de formación y a tratarse de sedimentos recientes. Por una parte, en la cuenca se han depositado sedimentos detríticos, cuya composición y características geoquímicas van a depender de las áreas fuentes, habiendo sufrido procesos de mezcla; existen también sedimentos de origen químico y, por último, el carácter horizontal de los depósitos y la erosión de los valles fluviales hacen que los sedimentos de la red de drenaje en un punto determinado estén formados por la mezcla de materiales procedentes de formaciones terciarias superpuestas en el terreno y en la columna litoestratigráfica.

A pesar de ello, las margas y yesos miocenos del entorno de Casalarreina, en el extremo Noroeste del valle del Ebro, quedan bien definidos por elevados contenidos en Br, Ca, K, Mg, Na, S, Sr. Las formaciones salinas de Agoncillo, con indicios de glauberita y sal gema, se caracterizan por elevados contenidos en K, S. Los afloramientos de yesos coinciden en general con anomalías de S.

Entre los materiales detríticos del valle del Ebro, los sedimentos oligocenos y miocenos del Oeste de la cuenca, entre Santo Domingo de la Calzada y Nájera, se caracterizan por tener contenidos elevados en muchos de los elementos químicos que definen el Paleozoico de la sierra de la Demanda, confirmando así la relación entre área fuente y sedimentos detríticos terciarios. Son: Al, Ba, Ce, Eu, Hf, La, Lu, Nd, Sc, Sm, Th, Ti, Yb.

Por último, en el extremo Sureste de La Rioja, en el entorno de Cervera de Río Alhama, coinciden anomalías de Ca, Mg, Na, S, Sr, que podrían tener relación con sedimentos pliocenos o con calizas y margas de edad Barriasiense.

La campaña de prospección geoquímica de La Rioja ha permitido, también, definir anomalías de elementos de interés económico. Aparte de las anomalías de minerales industriales ya descritas (yesos, glauberita, sales), se han definido anomalías de metales base (Cu, Pb, Zn), metales preciosos (Au, Ag) y elementos asociados (As, Sb, Cd, P).



Las mayores anomalías de elementos metálicos de interés económico se sitúan en la sierra de las Demanda, coincidiendo en general con antiguos indicios mineros. Se definen dos zonas: entorno de Ezcaray (Au, Cd, Cu, P, Sb, Zn) y alineación Canales de la Sierra-Ortigosa de Cameros (Ag, As, Cu, P, Pb, Sb, Zn).

Existen también anomalías de Au en relación con los conglomerados oligocenos cortados por los ríos Oja Y Najerilla.

Las antiguas minas de Zn-Pb de la cuenca del río Jubera, en las proximidades de Santa Engracia de Jubera, han dado importantes anomalías de Zn, Pb, Cd.

En los materiales wealdenses del Sureste de La Rioja se han definido una serie de anomalías de elementos de interés, que no tienen relación con indicios conocidos. Estas áreas anómalas se localizan en la sierra de Hayedo de Santiago (Ag, y también anomalías de Ni, Ti), en la sierra de Achena (Ag, As, Sb, V) y en la cuenca del río Linares (Zn, As).

Por último, en el valle del Ebro aparecen anomalías dispersas de cobre y fósforo, que podría tener relación con procesos de contaminación agrícola.

12.4. TRATAMIENTO MULTIVARIANTE. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

El tratamiento estadístico multivariante se ha realizado mediante el análisis de componentes principales y mediante el *cluster analysis* o análisis de conglomerados.

Se han seleccionado cinco componentes en el análisis de componentes principales, por considerarse los más significativos desde el punto de vista geoquímica:



Componente 1

Asociación formada por Sc – Ni – Fe – Cs – V – Cr – Co – Rb - Be – As – Sb – K – (Mn – Zn – Al – U – Pb – La – Cu – Nd – Sm – Th).

Explica el 41,5 % de la varianza total y es el componente que más elementos asociados tiene. Esta asociación, compleja, se considera un componente de tipo litológico.

Está formada por elementos del grupo ferromagnesiano y otros afines geoquímicamente (Ni, Fe, V, Cr, Co, Sc, Mn), junto con elementos litófilos, componentes mayoritarios o trazas de silicatos (Cs, Rb, K, Al, U, La, Nd, Sm, Th). Aparecen también elementos calcófilos, que son más característicos de componentes de mineralización (As, Sb, Zn, Pb, Cu).

Este componente muestra una distribución que se ajusta bien a los afloramientos de materiales detríticos del Paleozoico de la sierra de la Demanda y del Purbeck-Weald de Cameros, situándose las zonas más extensas con valores elevados en la sierra de la Demanda y en los afloramientos wealdenses del extremo Sureste de La Rioja.

Aparece también, de forma menos marcada, en afloramientos de materiales detríticos terciarios del valle del Ebro.

Componente 2

Asociación formada por Ce – Sm – La – Eu – Th – Yb – Lu – Nd – Ti – Hf- (U – K- Mn – Sc – Sb - Zn), con (-Ca) y (-Sr).

Explica el 16,6 % de la varianza total. Esta asociación tiene un marcado significado litológico y complementa y matiza al componente 1.



Los elementos con mayor peso son básicamente las tierras raras y elementos afines, apareciendo con peso negativo Ca y Sr.

Este componente discrimina positivamente los afloramientos de materiales detríticos paleozoicos de la sierra de la Demanda y del Purbeck-Weald de Cameros, y delimita también los depósitos detríticos del Oligoceno-Mioceno inferior del valle del Ebro, en la zona Santo Domingo de la Calzada-Nájera.

Los valores negativos delimitan con bastante precisión los afloramientos de sedimentos evaporíticos (yesos y sales) del Keuper y del Terciario del valle del Ebro. Cabe destacar la existencia de una zona de valores negativos en el extremo Sureste de La Rioja, en el entorno de Cervera del Río Alhama, que no tiene clara justificación con la información geológica.

Componente 3

Asociación formada por Sr – S- Ca – Mg – (P – Br). Explica el 5,85 % de la varianza total.

Esta asociación, de clara signatura litológica, está formada por elementos característicos de sedimentos de origen químico, originados a partir de salmueras cargadas de sales.

Este componente se ajusta con bastante precisión a los afloramientos de sales y yesos del Keuper y delimita positivamente dos áreas, una situada en el extremo Noroeste del valle del Ebro, que corresponde a los afloramientos de margas y yesos miocenos del entorno de Casalarreina, y otra en el extremo Sureste de La Rioja, en el entorno de Cervera de Río Alhama.

Componente 4

Asociación formada por Al – Y – K- (Mg – P). Explica el 3,96 % de la varianza. Este componente, formado por dos elementos mayores litófilos junto a Y, Mg, P; no tiene



una clara significación geoquímica.

Se ajusta en su distribución espacial, a los afloramientos de rocas detríticas, presentado valores positivos en una amplia zona del extremo Sureste del Paleozoico de la sierra de la Demanda.

Componente 5

Asociación formada por Pb – Cu – Zn - P – (Mn –As – Sb). Explica el 3,31 % de la varianza total. La estructura de la asociación indica que se trata de un componente de mineralización.

Este componente delimita una extensa área anómala en el Paleozoico de la sierra de la Demanda, al Sureste de Ezcaray. Otras anomalías de menor extensión aparecen al Oeste de Canales de la Sierra, al Este de Mansilla de la Sierra, al Norte de Ortigosa de Cameros y cerca de Pradillo.

Anomalías de menor entidad aparecen al Sureste de Santo Domingo de la Calzada, en el Terciario del Ebro, y en diversos puntos del Weald de Cameros, en concreto en la sierra de Hayedo de Santiago, en la sierra de Achena y en el valle del río Linares.

Existen también diversas anomalías puntuales en el valle del Ebro.

12.5. TRATAMIENTO MULTIVARIANTE. ANÁLISIS CLUSTER

Con objeto de definir las áreas anómalas susceptibles de una posterior prospección geológico-minera (mapas de pronóstico) y establecer los umbrales de anomalías geoquímicas que permitan delimitarlas, se ha recurrido a la técnica multivariante de análisis de conglomerados (*cluster analysis*).

A partir de la matriz de los factores *score* deducida del ACP se ha establecido el número de grupos o clases a constituir y se ha disociado el grupo total en 4 clases geoquímicas.



La clase 1 se localiza en el macizo paleozoico de la sierra de la Demanda, definiendo un área homogénea donde prácticamente no hay mezcla con muestras de otras clases. Existe también predominio de muestras de la clase 1 en todas las sierras del Sur de La Rioja, en zonas donde afloran materiales detríticos del Purbeck-Weald; definiéndose un área relativamente homogénea en la cuenca del río Linares. Estas distribuciones indican la similitud de signatura geoquímica existente entre el Paleozoico de la Demanda y determinados niveles del Purbeck-Weald. Otra zona donde hay un predominio de muestras de la clase 1 es en los afloramientos de materiales detríticos del Oligoceno y Mioceno inferior del Oeste del valle del Ebro (Zona de Santo Domingo de la Calzada-Nájera) donde, como ya se ha indicado, la signatura geoquímica confirma la relación entre estos sedimentos y el área fuente paleozoica.

La clase 2 tiene una distribución más errática. No obstante, las muestras de esta clase se ubican preferentemente en relación con el Purbeck-weald y en la parte central del valle del Ebro. Su signatura geoquímica podría estar, quizá, relacionada con formaciones niveles de granulometría fina del complejo detrítico wealdense y con sedimentos distales de la cuenca del Ebro.

La clase 3 se localiza preferentemente en el borde sur de la Depresión del Ebro, en posible relación con facies proximales de la cuenca del Ebro. Otra zona donde predominan las muestras de clase 3 es en el extremo sur de Cameros (Sierra Cebollera), en una estructura sinclinal de materiales detríticos del Purbeck.

La clase 4 también tiene una distribución irregular y sus muestras se mezclan frecuentemente con las de otras clases. No obstante, predomina en el extremo Noroeste de La Rioja, en el extremo Sureste de La Rioja, orlando el borde Norte de Cameros y en una alineación que une Urbión con Torrecilla en Cameros. Por la distribución geográfica de las muestras, la signatura geoquímica de la clase 4 podría corresponder a formaciones sedimentarias de origen químico del Mesozoico y del Terciario.



Resumiendo lo ya expuesto, cabe destacar la homogeneidad y diferenciación geoquímica del conjunto de materiales paleozoicos del macizo de la Demanda; la relativa similitud geoquímica de los materiales detríticos del Purbeck-Weald de Cameros con los materiales de la sierra de la Demanda, dentro de una mayor heterogeneidad; y la mayor heterogeneidad, desde el punto de vista geoquímico, de los materiales terciarios y cuaternarios del valle del Ebro.

12.6. TRATAMIENTO MULTIVARIABLE. ANOMALÍAS GEOQUÍMICAS

El análisis cluster ha permitido agrupar las muestras de sedimentos y suelos tomadas en La Rioja en cuatro clases geoquímicas, mutuamente excluyentes, basándose en las similitudes estadísticas entre las componentes.

Se consigue así resaltar anomalías de interés que podrían haber quedado enmascaradas en el tratamiento univariante de la totalidad de la población. Se ha realizado el tratamiento estadístico y la representación de las muestras anómalas de los siguientes metales de interés económico y elementos indicadores de mineralización: Au, Ag, Cu, Pb, Zn, As.

Los umbrales de anomalía se han determinado específicamente para cada clase empleando los diagramas de cajas. Se ha tomado como primer umbral de anomalía el límite inferior de aparición de *outliers* y como segundo umbral el paso de *outliers* a valores extremos o discontinuidades de importancia entre valores extremos.

Los resultados obtenidos aparecen en las figuras 8.7 a 8.12 y permiten definir una serie de zonas anómalas que se recomienda investigar en detalle:

- Au: Las principales anomalías de oro se sitúan en la mitad occidental de La Rioja. En los materiales paleozoicos del borde norte de la Demanda y en conglomerados oligocenos de la margen izquierda del río Najerilla. Aparecen también valores anómalos en el cauce medio-alto del Iregua (sur de Torrecilla en Cameros) y al norte de Urbión.



- Ag: Las principales anomalías de plata se sitúan también en el Paleozoico de la Demanda, en la zona de Canales de la Sierra, en el entorno de Anguiano y en el cauce alto del río Oja. Anomalías de interés aparecen en el extremo Oeste de la sierra de Hayedo de Santiago y en la sierra de Achena.
- Cu: Las anomalías más importantes de cobre se sitúan en el borde norte de la sierra de la Demanda, en materiales Paleozoicos, y en la alineación Canales de la sierra-Mansilla de la Sierra. En el valle del Ebro aparecen numerosos puntos anómalos que deben deberse a contaminación agrícola, ya que los cobres sedimentarios del Terciario de Navarra encajan en materiales eocenos.
- Pb: Aparte de anomalías en el entorno de Canales de la Sierra y Mansilla de la Sierra y en el borde Norte de la demanda, menos intensas que para otros elementos de interés, cabe destacar las anomalías de plomo del entorno de Arnedillo y Santa Engracia de Jubera. Existen también anomalías de menor entidad en la sierra de Achena y en valle del río Linares.
- Zn: las anomalías de cinc son bastante numerosas en el Paleozoico de la sierra de la Demanda, localizándose en el borde norte del macizo y en los cursos altos de los ríos Oja y Najerilla. Un grupo importante de puntos anómalos se sitúa en el entorno de Arnedillo. Existen también anomalías en el entorno de Santa Engracia de Jubera y en el oeste de la sierra de Achena, aunque de menor entidad.
- As: Las anomalías de arsénico, uno de los elementos que define el componente de mineralización en el ACP, aparecen sobre todo en la sierra de Achena y en el valle del río Linares, aunque de menor entidad. Valores puntuales aparecen en el cauce medio-alto del Iregua y al Este de Santa Engracia de Jubera.

12.7. CARTOGRAFÍA GEOQUÍMICA AMBIENTAL

A título meramente orientativo, se ha realizado una cartografía ambiental para



arsénico, bario, cadmio, cobalto, cobre, cromo total, molibdeno, níquel, plomo y cinc.

Por su proximidad geográfica con La Rioja y por la actualidad de su entrada en vigor, se han tomado los valores indicativos de evaluación que establece la Ley 1/2005 para la prevención y corrección de la contaminación del suelo del Gobierno Vasco. Ante la imposibilidad de determinar el VIE-A para la mayor parte de los elementos metálicos contaminantes analizados, se ha recurrido también a la Normativa Holandesa de Suelos Contaminados, por tratarse de la norma internacional más difundida y contratada.

De la observación de los mapas de diagnóstico ambiental realizados, y según la normativa Gobierno Vasco, se deduce la existencia de pequeñas zonas que superan el nivel VIE-A en As, Cd, Cr, Ni y Pb. Aplicando la normativa holandesa, sin embargo, la práctica totalidad de la superficie de La Rioja supera el nivel A para As, Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn.

Particularmente significativo es el mapa de diagnóstico ambiental realizado para el bario según la normativa holandesa, donde se observa que gran parte de la mitad occidental de La Rioja supera el nivel B. Aunque ni el muestreo ni las técnicas de tratamiento y análisis de las muestras han sido los establecidos en la normativa, este resultado destaca la importancia de conocer los niveles de fondo naturales antes de aplicar normativas de este tipo y confirma la utilidad de trabajos infraestructurales como el realizado.

Debe insistirse en el carácter meramente orientativo de los resultados obtenidos, pues la normativa aplicada está referida a tipos y metodologías de muestreo y análisis muy normalizados. No obstante, estos planos constituyen una aproximación al tema y suponen, en cualquier caso, una mejora en el conocimiento de la situación del medio.

Diciembre de 2006

CRN, S.A.