

Creemos necesario poner énfasis en la importancia de estas "estructuras" comparables (por la cantidad de sulfuros puestos en juego) con el anticlinal de Riotinto. El reconocimiento de estas áreas, orientado a la localización de masas con contenidos metálicos económicos es uno de los objetivos de exploración de R.T.M. S.A.

Otros de los objetivos de esta empresa es completar la exploración de todo el dominio minero de acuerdo con la metodología explicada anteriormente.

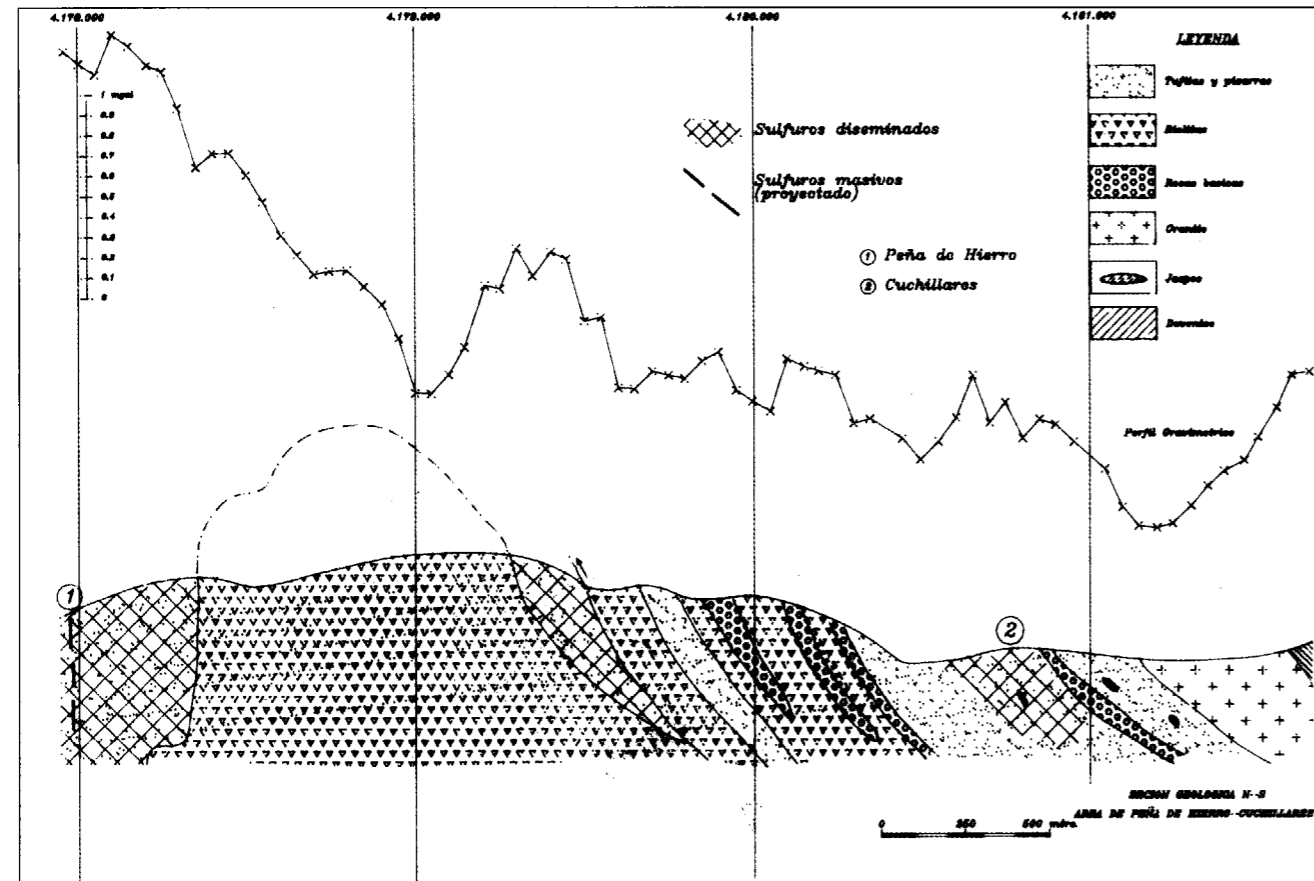


Fig. 4

Geoquímica de los halos de alteración hidrotermal relacionados con los yacimientos de sulfuros masivos de Aznalcóllar-Los Frailes: Criterios de evaluación de la intensidad de la alteración

Por E. PASCUAL (*), A. MAESTRE (**), J. M. PONS (**), R. SAEZ (*), G. R. ALMODOVAR (*) y M. TOSCANO (*).

RESUMEN

El estudio mineralógico y petrológico comparativo de rocas volcánicas, sulfuros masivos, y mineralizaciones de tipo stockwork en el área de Aznalcóllar-Los Frailes ha permitido distinguir las rocas volcánicas que sólo han sufrido alteración regional de las zonas de stockwork, que además han sufrido alteración hidrotermal.

Se han estudiado las variaciones químicas relacionadas con la circulación hidrotermal para rocas volcánicas con unos mismos rasgos petrográficos iniciales, de acuerdo con la nomenclatura estratigráfica y petrológica modificada. Se han obtenido las siguientes conclusiones principales:

- Se observa que la razón Co/Ni es un buen indicador de la intensidad de la alteración hidrotermal en el área estudiada.
- En la zona más interna de los halos de alteración cloríticos se movilizan intensamente la mayor parte de los elementos químicos, incluidos REE, Y, Zr, y Hf, Ti y P son los únicos elementos *relativamente* inmóviles en las rocas estudiadas.
- Tanto la razón Co/Ni como la movilidad de elementos trazas pueden ser usadas como instrumentos de prospección geoquímica a mayor escala. Con una evaluación adecuada, estos valores pueden discriminar las zonas que hayan sufrido alteración hidrotermal más intensa.
- Por el contrario, el uso de elementos trazas para discriminar series de rocas ígneas, o el entorno geodinámico del vulcanismo, tiene que ser considerado con precaución, puesto que la mayor parte de los elementos implicados, que se cree son inmóviles, pueden ser movilizadas en zonas con circulación hidrotermal intensa.

Palabras clave: Alteración hidrotermal, Sulfuros masivos, Cloritización, Movilización geoquímica, Provincia Sevilla, Aznalcóllar - Los Frailes.

ABSTRACT

A comparative petrological and mineralogical study on volcanic rocks, massive sulphides and stockwork mineralizations in the Aznalcóllar-Los Frailes area has permitted to distinguish volcanic rocks having suffered only regional alteration from those in the stockwork zones, which have been subjected in addition to hydrothermal alteration.

According to a modified stratigraphic and petrologic nomenclature, chemical variations related to hydrothermal circulation have been studied for volcanic rocks exhibiting the same (initial) petrographic features. The following main conclusions have been obtained:

- Despite the superimposition of regional and hydrothermal alteration stages, some chemical features and variations, related to igneous differentiation processes, are still preserved in the volcanic rocks. These features permit to hypothesize some of the volcanic petrogenesis.
- The Co/Ni ratio is found to be a good geochemical indicator of the intensity of the hydrothermal alteration in the studied area.
- Most of chemical elements, including REE, Zr, Hf and Y, are strongly mobilized in the inner chloritic alteration zones. Ti and P are the only *relatively* "immobile" elements in the studied rocks.

(*) Dpto. de Geología. Universidad de Huelva. 21819 La Rábida, Huelva. Spain.

(**) Boliden-Apirsa, 41890 Aznalcóllar, Sevilla, Spain.

- Both Co/Ni and trace mobility may be useful as geochemical tools at a larger scale. If properly evaluated, these values can discriminate those zones having suffered a more intense hydrothermal alteration.
- In contrast, the use of trace elements to discriminate series of igneous rocks, or a tectonic setting for volcanism, must be considered with caution, since most of the chemical elements involved, which are considered to be immobile, may be highly mobile in rocks close to the hydrothermal circulation zones.

Key words: Hydrothermal alteration, Massive sulfide deposits, Chloritization, Mobilization, Seville Province, Aznalcollar-Los Frailes.

INTRODUCCION

El distrito minero de Aznalcóllar, situado en el extremo SW de la Faja Pirítica Ibérica (fig. 1), comprende mineralizaciones de sulfuros masivos (Los Frailes, Aznalcóllar) y zonas de stockwork, de interés económico en el caso de Aznalcóllar, además de un cierto número de mineralizaciones no explotadas (Caridad, Zarcita). En la actualidad, el yacimiento de Aznalcóllar continúa siendo explotado por BOLIDEN-APIRSA, que prevé además de forma inminente el inicio de la explotación del yacimiento de Los Frailes.

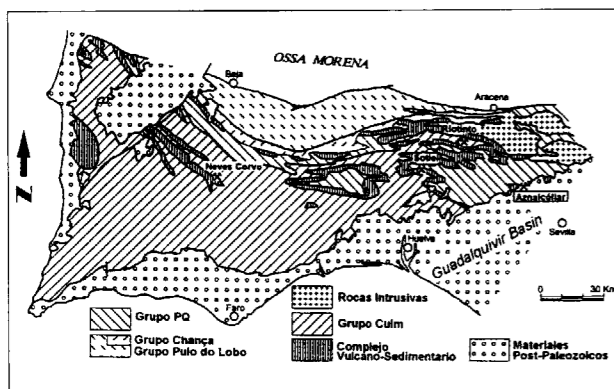


Figura 1. — Situación del área de Aznalcóllar en la Faja Pirítica Ibérica.

El presente trabajo parte de otro anterior (Pons *et al.*, 1993), en el que se mostraban los primeros datos obtenidos hasta entonces en el marco del Contrato BRT-EC92-0299 por los equipos de trabajo de APIRSA y la Universidad de Sevilla (actualmente integrado en la Universidad de Huelva). Aparte de confirmar lo esencial de los datos geológicos, su objetivo central es mostrar nueva información geoquímica del área, que consideramos de interés para el conocimiento geológico de la Faja Pirítica y que además indica un comportamiento peculiar de ciertos elementos químicos durante los procesos de alteración hidrotermal, los cuales generan a escala

regional tanto las masas de sulfuros masivos como las zonas de stockwork de interés económico. En el área estudiada, los datos obtenidos permiten caracterizar las zonas de máxima intensidad de la actividad hidrotermal mediante el uso de ciertos parámetros geoquímicos (no citados con anterioridad en la literatura). Sugerimos que dichos parámetros pueden ser usados como guías geoquímicas válidas a escala regional.

MARCO GEOLOGICO: NUEVOS DATOS E INTERPRETACIONES

Los datos geológicos obtenidos han hecho variar en detalle algunas de las interpretaciones reflejadas en el trabajo antes citado (Pons *et al.*, 1993); sin embargo, lo esencial de las conclusiones allí expuestas continúa siendo válido. Por tanto, referiremos de forma resumida tan sólo nuevos datos y/o interpretaciones relevantes. La terminología local utilizada es la misma que en dicho trabajo, en donde se discuten otras cuestiones que no se tratan ahora específicamente.

Se han precisado algunos datos sobre la **secuencia litoestratigráfica del CVS en el área de Aznalcóllar**. Así, se concluye ahora que las dos series previamente diferenciadas a escala local (llamadas serie de Aznalcóllar-Los Frailes y serie del S de la corta) pueden ser sincrónicas, aunque depositadas, respectivamente, en áreas de intensa actividad volcánica y fuerte subsidencia y en áreas relativamente estables. Además, en la serie de Aznalcóllar-Los Frailes se ha podido precisar en algunos puntos la naturaleza del contacto del CVS con el Grupo Pizarroso cuarcítico (PQ). El contacto normal de ambas formaciones está marcado por un nivel tufítico, con fenocristales de cuarzo, más abundantes hacia el techo, en una matriz pizarrosa. Por último, en la columna se han distinguido algunos términos que no habían sido caracterizados con anterioridad, tal como refleja la figura 2. La interpretación de la **estructura** del área ha sido también modificada en detalle.

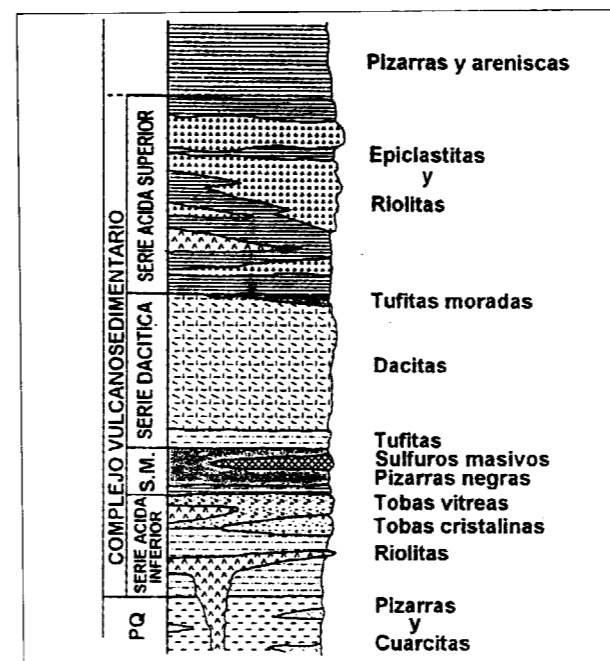


Figura 2. — Serie estratigráfica de la corta de Aznalcóllar.

Sin embargo, continúan siendo válidas las conclusiones estratigráficas y estructurales cruciales para la interpretación de los depósitos de interés económico, tal como se expresaron en el trabajo previo:

— Las mineralizaciones de sulfuros masivos se desarrollan sobre pizarras negras situadas a techo de una formación volcánica piroclástica. A su vez, los sulfuros masivos son anteriores a un segundo episodio volcánico representado esencialmente por lavas.

— Las zonas de stockwork relacionadas con los depósitos de sulfuros masivos se desarrollan sobre tobas vitreas/cristalinas o sobre pizarras negras. Especialmente en el primero de estos casos, la anisotropía mecánica de la roca condiciona una geometría peculiar de la zona de stockwork. Por otra parte, la litología primitiva de los materiales puede ser claramente identificada por su textura, incluso en las zonas de más intensa alteración hidrotermal.

— Debido a la tectónica de cabalgamientos, la mineralización de stockwork de interés económico se encuentra sobre la de sulfuros masivos en la corta de Aznalcóllar; sin embargo, los distintos términos de la serie afloran en contacto normal en un número de puntos suficiente para

confirmar que la secuencia estratigráfica propuesta no es meramente el producto de superposición tectónica de unidades no relacionadas entre sí.

VARIACION QUIMICA IGNEA DEL CVS EN EL AREA DE AZNALCOLLAR

La mayor parte de las rocas volcánicas del entorno de Aznalcóllar están intensamente alteradas, como en general en toda la Faja Pirítica Ibérica. Además, esa alteración no sólo se ha producido por circulación hidrotermal ligada al depósito de sulfuros masivos, sino también por alteración regional y eventualmente por metamorfismo de muy bajo grado. Por otra parte, la composición original de las rocas ígneas puede cambiar también por procesos como interacción magma-sedimentos, bien en ambiente volcánico o subvolcánico. La alteración hidrotermal, a su vez, consiste en el área estudiada en dos zonas de intensidad decreciente, denominadas, como en otras muchas localidades, zonas de alteración clorítica y sericitica.

En estas condiciones, la mayor parte de los rasgos químicos ígneos originales pueden haber sido modificados, de forma que la caracterización geoquímica del vulcanismo continúa siendo un problema mayor en toda la región. La solución comúnmente adoptada para lograr esa caracterización -especialmente con el objetivo de precisar el entorno geodinámico del vulcanismo- parte de la consideración de que algunos elementos traza permanecen inmóviles, incluso durante procesos hidrotermales que implican una alteración pervasiva (v., p. ej., Finlow-Bates y Stumpfl, 1981). En Aznalcóllar, puesto que las rocas ígneas de la zona de stockwork afloran también en puntos en que no existe alteración hidrotermal, se ha logrado diferenciar algunos rasgos ígneos originales del vulcanismo mediante muestreo y análisis químico detallado de rocas volcánicas especialmente favorables y de sus fragmentos.

En efecto, la variación coherente de algunos elementos mayores y trazas, especialmente en rocas no afectadas por alteración *hidrotermal*, se relaciona con procesos de diferenciación magmática en reservorios poco profundos, de acuerdo también con criterios petrográficos y de campo (Pascual *et al.*, 1994). En definitiva, se adscriben a procesos ígneos aquellas variacio-

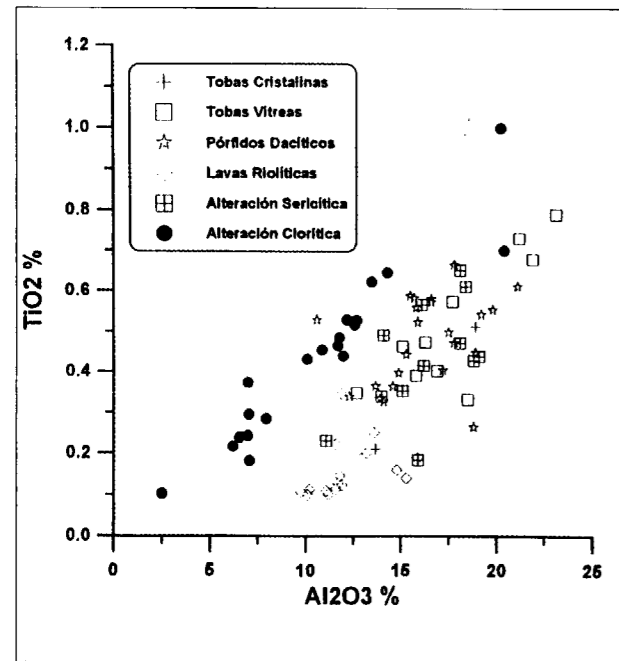


Figura 3. — Diagrama general Al_2O_3 frente a TiO_2 de rocas volcánicas y subvolcánicas ácidas del área de Aznalcóllar. Nótese que las rocas con alteración clorítica muestran una tendencia similar a las rocas que están afectadas sólo por alteración regional, pero con contenido en aluminio sensiblemente inferior.

nes que se correlacionan con variaciones de rasgos petrográficos como, por ejemplo, la naturaleza o el contenido en cristales de los clastos vítreos. Las figuras 3 y 4 muestran la variación conjunta de elementos mayores y trazas en diagramas de Harker y en "spider diagrams" para elementos trazas.

ALTERACION HIDROTERMAL: MOVILIDAD DE ELEMENTOS TRAZAS EN LA ZONA DE ALTERACION CLORITICA

La alteración clorítica cambia la composición mineralógica de las tobas vítreas dacíticas de la zona de stockwork a una asociación compuesta por Fe-clorita + cuarzo + pirita + calcopirita + rutilo + circón siderita ± sericita ± esfalerita ± cobaltita. El rasgo petrográfico más llamativo es comúnmente la abundancia de pequeños cristales de circón que parecen texturalmente relacionados con la cloritización misma. La alteración sericítica, por su parte, se caracteriza por una asociación compuesta por sericita + cuarzo + rutilo + pirita + esfalerita ± clorita ± albita galeña.

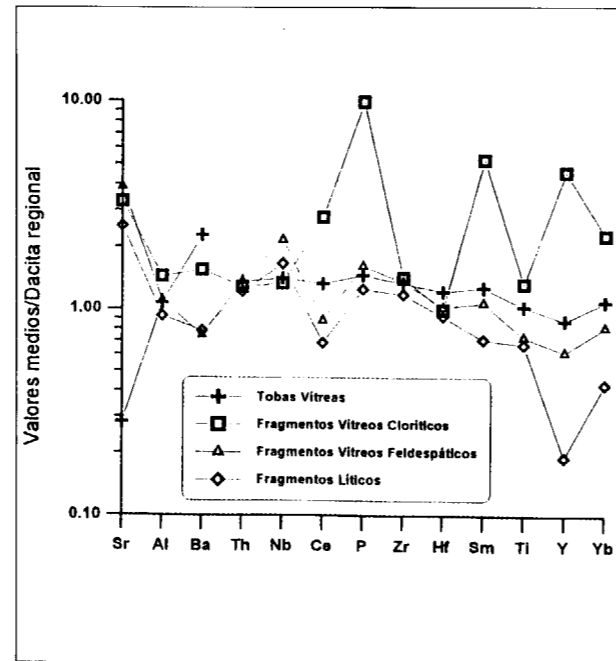


Figura 4. — Spider diagram para tobas vítreas de Aznalcóllar y sus fragmentos. Obsérvese el carácter complementario de la composición química de diferentes tipos de fragmentos. Ver también Pascual *et al.*, 1994.

La similitud de los rasgos químicos en rocas regionales y con alteración sericítica, así como la conservación de las tendencias ígneas de variación, sugieren que los cambios químicos durante la alteración regional y/o sericítica son limitados en comparación con los que se observan en las rocas con alteración clorítica (cfr. fig. 3), lo que indica que los cambios químicos específicamente relacionados con alteración hidrotermal deben estudiarse en estas últimas. Por lo tanto, en la discusión que sigue se distinguirán sólo dos grupos de rocas: las que muestran alteración regional y sericítica, en un grupo único, y las que tienen alteración clorítica. En cualquier caso, las muestras con alteración sericítica ocupan una posición intermedia en la mayor parte de las tendencias de variación producidas por alteración.

Una diferencia mayor entre las rocas cloríticas y el resto de rocas ígneas estudiadas es el comportamiento relativo de cobalto y níquel. Como se ve en el diagrama binario Co vs. Ni (fig. 5) la variación de níquel que ocurre en las tobas vítreas y sus fragmentos fuera de la zona clorítica se produce con bajo contenido en cobalto, mientras

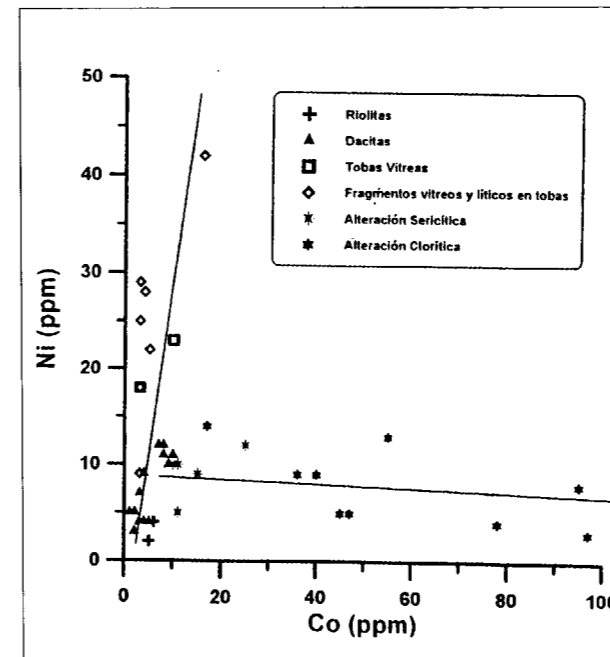


Figura 5. — Diagrama Co vs. Ni para rocas regionales y de la zona de alteración clorítica del área de Aznalcóllar. Explicación en el texto.

que el aumento de Co en la zona clorítica tiene lugar con muy bajo contenido en Ni. Los mayores contenidos en Ni corresponden a los clastos vítreos más "básicos" de las tobas vítreas del área (Pascual *et al.*, 1994), lo que indica que su variación es fundamentalmente magmática. En cambio, el enriquecimiento de cobalto en las rocas cloríticas no va acompañado de enriquecimiento de níquel.

Este enriquecimiento en Co debe, pues, relacionarse con la alteración hidrotermal, como también lo indica la presencia de fases minerales como la cobaltita en la zona de alteración clorítica. En cambio, no corresponde directamente a un aumento del contenido en sulfuros, como lo muestra la falta de correlación entre los contenidos de S y Co. Por otra parte, la alteración clorítica implica probablemente un empobrecimiento en níquel, dado que en la zona de alteración clorítica no se ha encontrado ninguna muestra con alto contenido en dicho elemento. En cualquier caso, de los datos se deduce la posibilidad de uso de la razón Co/Ni como un indicador de la intensidad de la alteración hidrotermal, tanto en Aznalcóllar como en otras áreas de la Faja Piritica Ibérica.

Además, si se toma la razón Co/Ni como indicador de la intensidad de alteración hidrotermal, se obtienen buenas correlaciones negativas con otros elementos trazas, en particular con elementos que generalmente se considera inmóviles en la literatura (Almodóvar *et al.*, 1995). Así, el empobrecimiento en circonio, hafnio y tierras raras con el aumento de la razón Co/Ni se muestra en la figura 6. En cambio, parte, los contenidos relativos en tierras raras (por ejemplo, las razones Eu/Eu^* , o LREE/HREE) no se modifican sensiblemente durante la alteración, como muestra la figura 7.

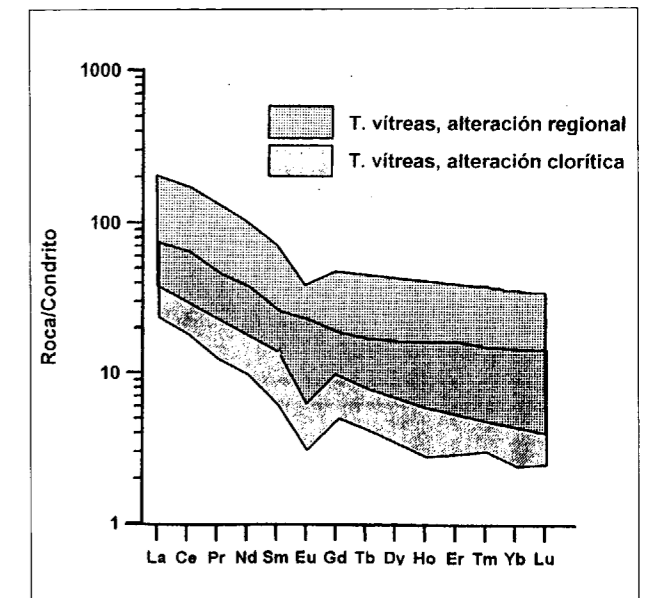


Figura 7. — Empobrecimiento de tierras raras en las zonas de alteración clorítica de Aznalcóllar y Los Frailes. Comparar con la figura 6. Nótese que tanto la relación LREE/HREE como la anomalía de Eu son comparables en las zonas de alteración clorítica y de alteración regional (sin alteración hidrotermal asociada).

CONCLUSIONES

El uso combinado de los parámetros químicos arriba citados ha permitido en el área estudiada la estimación de la intensidad de la alteración hidrotermal, ligada a procesos de formación de depósitos de sulfuros masivos. Es probable que una metodología semejante se pueda aplicar en otras zonas en la Faja Piritica Ibérica. No obstante, esta metodología requiere en primer lugar un conocimiento detallado de los rasgos geológicos

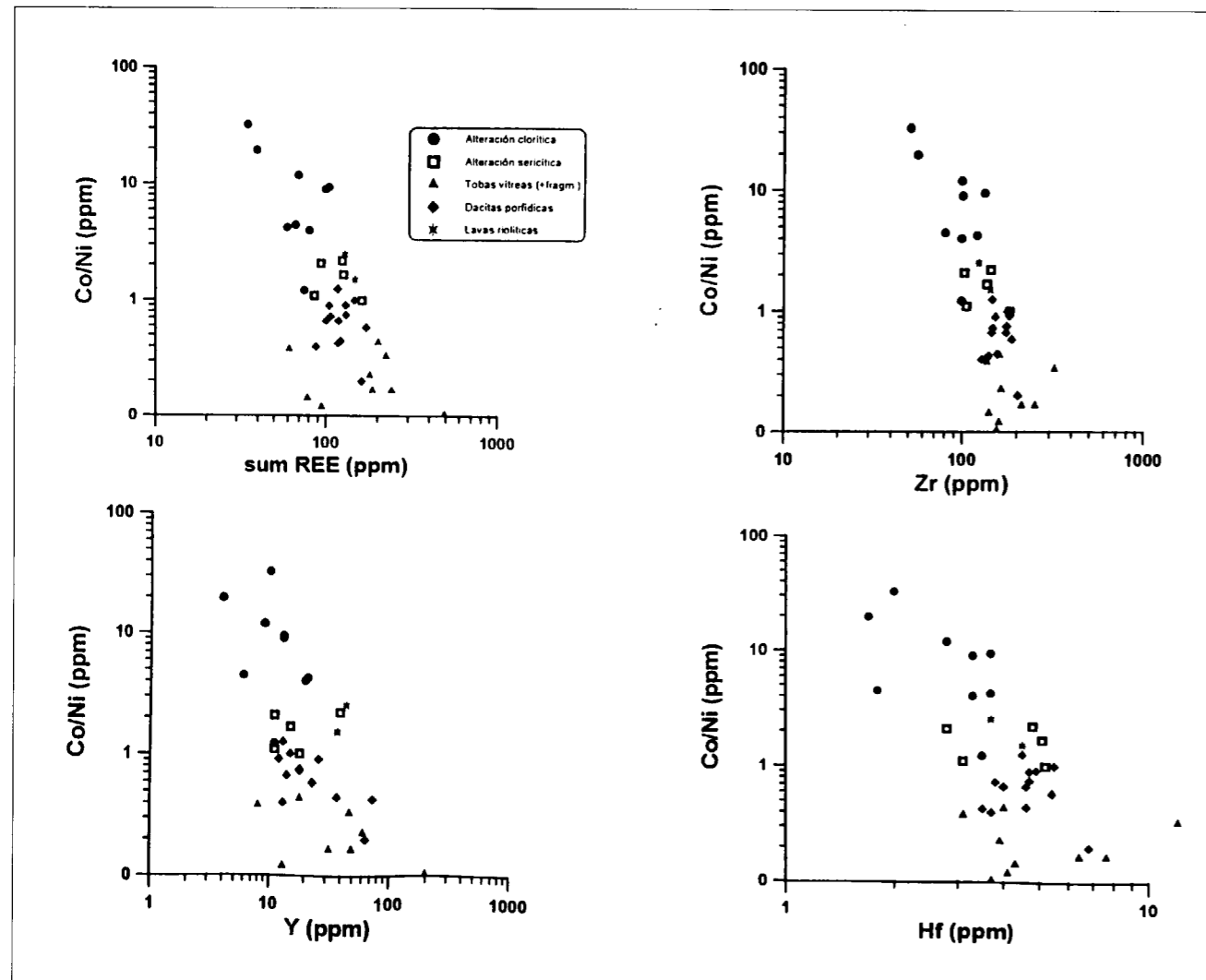


Figura 6. — Movilidad de diversos elementos "inmóviles" con aumento de la razón Co/Ni en el área de Aznalcóllar. Explicación en el texto.

y de la petrología de las rocas volcánicas en cada área de aplicación, por varias razones:

- Los problemas geológicos básicos (p. ej., cartografía, estructura, petrografía) deben ser resueltos previamente para una aplicación propia de la metodología, puesto que ésta se basa en el examen de rocas que antes del inicio de la actividad hidrotermal tuvieron una composición mineralógica y química comparable (aunque no necesariamente idéntica).
- Los contenidos *absolutos* en cada uno de los elementos reseñados pueden ser muy

distintos a los mostrados en este trabajo, puesto que las rocas sobre las que se desarrolla un sistema hidrotermal pueden ser también de diferente naturaleza.

- Los procesos magmáticos (diferenciación, contaminación, etc.) podrían también influir sobre la composición de las rocas de distinta manera a como tiene lugar en el área estudiada (por ejemplo, produciendo en otros puntos variaciones elementales semejantes a las que en Aznalcóllar se generan por alteración).
- La alteración hidrotermal, finalmente, no se desarrollará en todas las áreas de la

región en las mismas condiciones físico-químicas.

Sin embargo, ninguna de estas limitaciones desvirtúa, en nuestra opinión, la validez de las guías geoquímicas propuestas. Lo único que indican es que los parámetros usados son válidos de forma orientativa, pero sobre todo que son válidos en el contexto de un estudio geológico y petrológico cuidadoso, que es el que, en definitiva, permite —también en este caso— interpretar y ordenar los datos geoquímicos.

Finalmente, el hecho de que ciertos elementos "inmóviles", como las tierras raras y el circonio, sean móviles en sistemas hidrotermales de la Faja Pirítica Ibérica, indica que no todas las rocas ígneas regionales pueden ser usadas indiscriminadamente para deducir el ambiente geodinámico en que fueron generadas, ni aún con diagramas de clasificación basados en elementos inmóviles. En muchos casos, y dada la abundancia de mineralizaciones hidrotermales de muy diversos tipos, dichos elementos pueden también ser movilizados. En consecuencia, sólo rocas totalmente desligadas del entorno de las mineralizaciones pueden ser usadas, tras cuidadoso examen, con esa finalidad.

REFERENCIAS

- ALMODOVAR, G. R.; SÁEZ, R.; TOSCANO, M., and PASCUAL, E. (1995): Co, Ni and immobile element behaviour in ancient hydrothermal systems, Aznalcóllar, Iberian Pyrite Belt, Spain. En *Mineral Deposits: from their origin to their environmental impacts*, Pasáva J., Křibek B. & Žak K. (eds.), Balkema, Rotterdam, 217-220.
- FINLOW-BATES, T., and STUMPFL E., F. (1981): The behaviour of so-called immobile elements in hydrothermally altered rocks associated with volcanogenic submarine-exhalative ore deposits. *Mineral. Deposita*, 16, 319-328.
- PONS, J. M.; SÁEZ, R.; RUIZ DE ALMODOVAR, G.; LÓPEZ, J. R.; MORENO, C.; TOSCANO, M.; DONAIRE, T.; MAESTRE, A., y PASCUAL, E. (1993): Geología y estructura de los yacimientos de sulfuros masivos de Aznalcóllar y Los Frailes. En *Polymetallic sulphides of the Iberian Pyrite Belt*, 19, 1-16.
- PASCUAL, E.; ALMODOVAR, G.; SÁEZ, R.; TOSCANO, M., y DONAIRE, T. (1994): Petrología y geoquímica de tobas vítreas del área de Aznalcóllar (Faja Pirítica Ibérica). *Bol. Soc. Esp. Min.*, 17-1, 155-156.