

Cartografía geoquímica multielemental en sedimentos de corriente en un contexto de arco isla volcánico. Aplicación al análisis de potencialidad metalogénica en un área de la República Dominicana

Stream sediment geochemical mapping in an island arc context. Application to assessment of mineral resources potentiality in an area of the Dominican Republic

J. LOCUTURA, A. BEL-LAN y E. LOPERA

Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Ríos Rosas, 23 - 28003 Madrid. j.locutura@igme.es

RESUMEN

Este estudio presenta los principales resultados y conclusiones de la exploración y cartografía geoquímica multielemental llevada a cabo, a partir de muestras de sedimentos de arroyo, en el sector de Bonao-Constanza de la Cordillera Central de la República Dominicana. En el área estudiada, de 3.800 km², fueron recogidas 684 muestras, con una densidad de muestreo de 1 muestra / 5 km², en las que se analizaron 48 elementos químicos por técnicas de ICPAES y Activación Neutrónica. Esta zona, situada en el ámbito del arco isla de borde de la placa caribeña, contiene importantes mineralizaciones de carácter epitermal y volcanosedimentario y posee un gran potencial de nuevas mineralizaciones.

Dada la complejidad geológica y los fenómenos superimpuestos de alteración hidrotermal, la geoquímica multielemental permite, a través del análisis de las pautas de distribución espacial de los elementos y de las asociaciones geoquímicas, una definición más razonada de áreas anómalas, su valoración, y un conocimiento de su posible significado en relación con el contexto petrogenético, geológico y geoquímico en el que se hallan. La información geoquímica de los materiales superficiales, permite, de acuerdo con las tendencias generales de la cartografía geoquímica, extraer conclusiones que son de aplicación e interés para el conocimiento geológico y ambiental del territorio, además de para la exploración minera.

Palabras clave: Sedimentos de Arroyo. Cartografía Geoquímica. Exploración minera. Arco Isla volcánico. Meteorización Tropical. Rep. Dominicana.

ABSTRACT

The main results and conclusions of the multielemental geochemical mapping on stream sediments carried out in the Bonaó-Constanza area, Cordillera Central, Dominican Republic are presented in this paper. The studied area covers 3800 km². The sampling density applied was 1 sample / 5 km². A total of 684 samples were taken and 48 elements were analysed by Neutron Activation and ICP-AES techniques. The area, located in the island arc of the Caribbean plate, contains important epithermal and volcanosedimentary mineralizations and has a huge potential for blind deposits.

Due to the complex geology and the superimposed hydrothermal alterations, the multielemental geochemistry allows, through the analysis of patterns of spatial distribution of the elements and their geochemical associations, a better definition of anomalous zones and their assessment and meaning in relationship with their petrogenetic, geological and geochemical context. The geochemical datasets of the superficial materials allow, according with the general trends of the geochemical exploration and mapping, to get applicable and interesting conclusions for the geological, environmental and mineral exploration knowledge.

Key words: Stream Sediment. Geochemical Mapping. Mining Exploration. Volcanic Island Arc. Tropical Weathering. Dominican Rep.

EXTENDED ABSTRACT

The geochemical mapping represents the today stage in the evolution of the multielemental geochemical exploration methods. Its aim is to create accurate multielemental geochemical datasets that reflect the superficial land state and its possible application to several kinds of land investigations, mining, metallogenic, environmental, geological, agriculture, land planning, etc..

In this study, the main results of a multielemental geochemical mapping carried out on stream sediments in the Bonaó-Constanza sector, within the Cordillera Central area in the Dominican Republic, are shown. Sampling work, samples preparation and analysis have been done following 259 IGCP Project "International Geochemical Mapping" recommendations.

The studied area covers 3.800 km² and 684 samples were collected with a sample density of 1 sample / 5 km². The samples were analysed for 48 chemical elements using Neutron Activation and ICP-AES techniques : Ag, Al, Be, Bi, Ca, Cd, Cu, K, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, Sr, Ti, V, Y, Zn, Au, As, Ba, Br, Ce, Co, Cr, Cs, Eu, Fe, Hg, Ir, La, Lu, Na, Nd, Rb, Sb, Sc, Se, Sm, Sn, Ta, Th, Tb, U, W, Yb, S.

The outcropping geological units are formed by a cretaceous sequence, unconformably covered by Cenozoic sediments. Both are part of the island arc chain that, from Cuba till north of Venezuela and Colombia, surrounds the Caribbean plate. Among the geotectonic units or "terranes" could be distinguished the following ones :

- Oceanic crust fragments, represented by the Loma Caribe and Complejo Duarte formations.
- Volcanoplutonic fragments that include basic volcanics episodes, bimodal eventually, with a series of intrusive bodies of basic, intermediate and acid character.
- Sedimentary back-arc fragments.

The mineralizations hosted are typical of this geotectonic setting: epithermal (Au, Ag), volcano-sedimentary massive sulphide (Cu-Zn), and laterite (Ni), over a peridotitic protolite. The presence of the world class Pueblo Viejo orebody, a high sulfidation epithermal mineralization in a convective hydrothermal system developed in a maar-diatreme structure, must be emphasized.

Stream sediments are mostly coarse grained, sand and gravels, because the torrential regime due to the combination of seasonal tropical conditions and high and abrupt relief. Due to these morphoclimatic features, the soils development is quite heterogeneous, leading to laterite soils in some specific places.

A test survey has been carried out in different geological settings in soils and stream sediments. Both media show the scarcity of fine grained materials, similar geochemical contents of the majority of elements and similar relationships between them. Most of the elements show essentially mechanical dispersion. These data are in agreement with the plotted results in the distribution maps, where a close relation between geochemical patterns and geological structure is clear, apart of the low sampling density, geological complexity and local overprinted effects. The regional geochemical patterns, even with the interference of local metallogenic, morphoclimatic or anthropic factors, are fundamentally controlled by geological or lithological factors. At the same time, regional scale geochemical variability is noticed in function of contrasted lithologies, as well as a very low background of some elements like Pb, Ba or Be. This fact is in agreement with the oceanic affinity, with scarce continental contribution, of most of the geological units.

Likewise, the maps of spatial distribution clearly show inhomogeneous patterns in some geological enclosures like tonalitic intrusive bodies, with maybe a much more complex structure than thought because the presence of facies with different evolution stages. Spider diagrams showing the content of rare earth and some trace elements in the different units, have been carried out. The results confirm some petrogenetic affinities between some units and show, as well, differences in the evolution and fractionation of others, the intrusives for instance.

The multivariant statistical treatment of the multielemental data has consisted in a principal components analysis and in a clustering or classification process. The first one defines the main geochemical associations that explain most of the geochemical variability, that could be explained, as well, in terms of metallogenic and geological factors. Clustering of samples population has been achieved according with the internal structure of the geochemical data. This last procedure allows the definition of geochemical domains with contrast enough and with geological entity, in order to establish geochemical backgrounds with regional certitude. The elemental geochemical anomalies can so be defined against these backgrounds and a whole analysis accomplished in order to delineate several prospective areas. The most interesting of them are located in the sedimentary back-arc basin (possible epithermal mineralizations), in the peribatholithic aureole of some granodioritic intrusive bodies, and within a shear corridor with probable buried granodioritic stocks (epithermal Au).

INTRODUCCIÓN

Este estudio se ha realizado a partir de información elaborada en el marco del Proyecto "Cartografía Geotemática en la República Dominicana", que se desarrolló entre Enero de 1997 y Enero de 2000. Este proyecto, financiado íntegramente por la Unión Europea, con fondos del Programa SYSMIN, incluyó la realización de cartografías geológicas y geotemáticas en los cuadrantes 1/100.000 de Bonao, Constanza y Azua, además de una cartografía de recursos minerales de la totalidad del territorio de la Rep. Dominicana. Este trabajo se ha realizado a partir de parte de los datos elaborados en los subproyectos de Cartografía Geoquímica y de Cartografía Metalogenética de los cuadrantes de Bonao y Constanza (IGME, INYPSA y PROINTEC, 2000).

La cartografía geoquímica representa el estadio actual de la evolución de las metodologías de la exploración geoquímica multielemental con objetivos prospectivos, en el que se persigue una sistemática de elaboración de bases de datos geoquímicos multielementales que reflejen el estado del medio superficial y su posible aplicación a diversos tipos de investigaciones del territorio, ya sean de carácter minero o metalogenético, medio ambiental, geológico,

agrícola, etc.. Esta corriente de trabajo en el terreno de la geoquímica comenzó con la reutilización de la geoquímica de exploración regional con otros fines más amplios y ambiciosos. En la actualidad, constituye ya una actividad infraestructural con identidad propia, que la mayor parte de los Servicios Geológicos nacionales asume como básica para campos de investigación muy diversos. Están en gestación programas de cartografía geoquímica nacionales e, incluso, de ámbito mundial, como el que promueve la Unesco, Proyectos IGCP 259 (Darnley et al., 1995) y 360.

Si bien las técnicas de prospección geoquímica han sido ampliamente utilizadas en el territorio de la República Dominicana, sobre todo por compañías mineras y en la modalidad de suelos, la exploración geoquímica o la cartografía geoquímica con enfoque regional tienen escasos antecedentes. Cabe citar, sin embargo, las campañas de geoquímica regional (726 km²), basadas en los sedimentos de arroyo, realizadas por la Cia. Mitsubishi (JICA y MMAJ, 1984), o las campañas efectuadas por la empresa Falconbridge en la zona de las Cañitas (2000, comunicación personal), también basadas en sedimentos fluviales, con densidades cercanas a 1 muestra / km² (en total 700 muestras). Estas campañas no tuvieron un carácter multielemental.

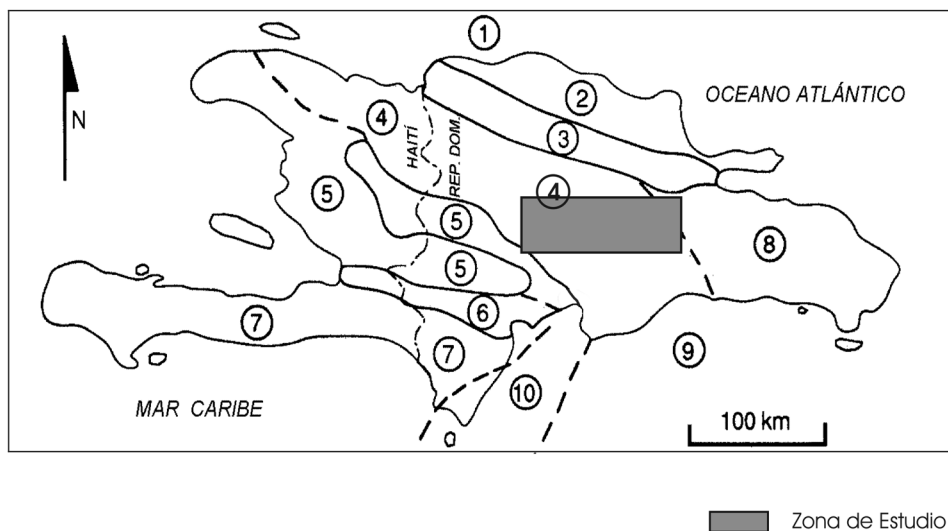


Figura 1. Dominios morfotectónicos de La Española (tomada de Lewis, 1980, y Lewis y Draper, 1990). 1: Fosa de las Bahamas; 2: Cordillera Septentrional y Península de Samaná; 3: Valle de Cibao; 4: Macizo del Norte y Cordillera Central; 5: Dominio Noroccidental y Meridional, incluyendo el Valle de San Juan, el Llano de Azua, la Sierra del Número, la Sierra de Neiba, la Sierra de Martín García; 6: Isla de Gonave, Llano de Cul de Sac, Valle de Enriquillo; 7: Península Meridional; 8: Península Oriental, Cordillera Oriental y Seibo; 9: Cuenca de San Pedro y Fosa de los Muertos; 10: Cresta oceánica de Beata y Península Meridional.

Figure 1. Morphotectonic zones of Hispaniola (from Lewis, 1980, and Lewis and Draper, 1990). 1: Bahamas Trench; 2: Eastern belt and Samaná Peninsula; 3: Cibao Valley; 4: Northern Massif and Central belt; 5: Northwestern and Southern Domain, including San Juan Valley, Azua Plane, Número Mountains, Neiba Mountains, Martín García Mountains; 6: Gonave Island, Cul de Sac Plane, Enriquillo Valley; 7: Southern Peninsula; 8: Eastern Peninsula, Eastern Belt, and Seibo; 9: San Pedro Basin and Muertos Trench; 10: Beata ridge, and southern Peninsula.

Este estudio pretende mostrar alguno de los resultados y de las aplicaciones de la cartografía geoquímica multielemental y regional elaborada en el sector Bonao-Constanza, que ha sido el primero en iniciar una nueva vía de aplicación de las técnicas y métodos geoquímicos en la Rep. Dominicana.

LOCALIZACIÓN Y RASGOS FISIográfICOS Y CLIMÁTICOS DEL ÁREA DE ESTUDIO

Las hojas 1/100.000 de Bonao (6172) y Constanza (6072) se localizan en la parte centro-meridional del territorio de la República Dominicana. La superficie de cada una de las hojas 1/100.000 mencionadas es de aproximadamente 1.880 km² (Fig.1).

Orografía

En términos generales, la zona de estudio presenta un relieve acusado. Está situada en la terminación oriental y central de la Cordillera Central y, por ello, en su

ámbito hay elevaciones importantes. En términos generales, el cuadrante oriental (Bonao) presenta los mayores relieves en el sector SW y W, con cotas superiores a los 1.500 m. En el resto del cuadrante, dentro de un contexto de relieves alomados se presentan alineaciones montañosas notables, como Siete Cabezas, con alturas de hasta 1.000 m entre las que se sitúan valles con cotas de 100 m en los cauces de los ríos. La mitad occidental (Constanza) muestra una topografía muy accidentada, contrastando enormemente los relieves de la parte SO, correspondientes al dominio fisiográfico del valle de San Juan, con las elevaciones de la zona central. La cota más elevada corresponde al Alto de la Bandera (Sabana Quéliz) con 2.842 m.

Hidrografía

Dado el gran contraste entre los relieves de las zonas Suroeste y Noreste, los ríos y arroyos corren en dirección N-S, transversalmente a las estructuras, para desembocar en el mar Caribe. La red hidrográfica está formada por un numeroso grupo de ríos y arroyos de cauces

caudalosos y encajados. Dados los fuertes niveles existentes en el área, tienen corrientes rápidas y una gran capacidad de transporte y acarreo. Suelen tener rápidas y violentas crecidas en la época de lluvias. En la mayor parte del área, la estructura de la red hidrográfica es de naturaleza arborescente. En el cuadrante de Bonaó, los ríos con respecto a los cuales se organiza la red hidrográfica son: el río Ozama, que desemboca en la capital, su afluente el Isabela; el Yuna, que desemboca en la bahía de Samana; el Haina; el Nizao; el Maimón, etc. En el cuadrante de Constanza, en cuya zona Norcentral se registra uno de los máximos pluviométricos de la isla, nacen algunos de los ríos más importantes (Grande, Nizao, Yaqué del Sur).

Clima y vegetación

Toda el área de estudio está sometida a un clima de tipo tropical, caracterizado por fuertes temperaturas y abundantes precipitaciones, sobre todo en la época de verano-otoño. Ello ha provocado en la mayor parte del área (salvo quizás en las zonas más elevadas, en el cuadrante de Constanza) el desarrollo de una densa vegetación que se instala sobre suelos que en algunos sectores son potentes y profundos. En una parte significativa del área se han desarrollado suelos lateríticos con varios metros de potencia, aunque en otras los suelos son menos desarrollados y consisten en fragmentos de mayor o menor tamaño de roca descompuesta con una proporción de arcilla. La evolución geomorfológica ha sido desigual según zonas a partir del Terciario Medio, momento en que se produjo un levantamiento generalizado, pero diferencial según bloques, con la subsiguiente intensa erosión desde entonces. Ello explica la existencia de pequeños dominios morfoclimáticos en los que se han desarrollado regímenes de meteorización y erosión y tipos de suelos muy diferentes. En las zonas cercanas a los núcleos de población, y en los valles y llanos, hay una actividad agrícola importante, basada en el cultivo de cacao, café y arroz. La densidad de población es baja, sobre todo en la zona de Constanza. En Bonaó existe una mayor presencia de pequeños núcleos de población. La actividad industrial es muy escasa salvo en el área de Bonaó, en relación con la industria minera (de níquel) próxima.

MARCO GEOLÓGICO

Dados los objetivos específicos de este trabajo y el hecho de que en el marco de este proyecto se ha abordado la cartografía geológica de los cuadrantes

de Bonaó y Constanza, nos limitamos aquí a hacer una breve reseña de los principales rasgos geológicos del área, insistiendo en aquellos que tienen una mayor repercusión geoquímica, esencialmente los litológicos.

Geológicamente, la isla de la Hispaniola consiste en una secuencia volcano-plutónica cretácica, cubierta discordantemente por sedimentos del Cenozoico (Bowin, 1960; DGM y BGR, 1991). Todas las unidades representadas en la zona forman parte del denominado Gran Arco del Caribe, una cadena de arcos isla que, desde Cuba hasta el N de Venezuela y Colombia, circunda marginalmente la placa del Caribe. El sector septentrional de este arco ha permanecido inactivo desde su colisión con la plataforma de las Bahamas, colisión que se produjo en el intervalo Eoceno Medio-Superior, produciendo el amalgamamiento o soldadura definitiva de todas las unidades de arco isla. A lo largo de la evolución geológica del conjunto hay un hecho trascendente, cual es la importante discordancia regional en el Aptiense-Albiense y el contraste en el estilo de deformación por debajo y por encima de la misma, pudiéndose hablar de una tectónica pre-Albiense y una tectónica del Cretácico Superior-Eoceno. Esto lleva a considerar formaciones de un arco isla inferior y formaciones de un arco isla superior. Una vez que todos los elementos estuvieran soldados, a partir del Mioceno y hasta la actualidad, se ha producido, a escala regional, una tectónica de desgarres. En la figura 2 se representa un esquema geológico del área de estudio y en la figura 3 una base geológica más detallada.

Pueden distinguirse en la zona los siguiente terrenos o unidades geotectónicas: fragmentos de cuenca oceánica con montañas submarinas, parte volcano-plutónica de un arco de isla volcánico, cuenca de retro-arco, rocas intrusivas tonalíticas y gabroicas y materiales cuaternarios.

Fragmentos de cuenca oceánica con promontorios submarinos

La unidad más antigua de la hoja, y posiblemente de toda la isla, corresponde al Complejo Duarte (Jurásico Superior). El protolito de este conjunto metamórfico se asimila a basaltos de fondo oceánico en sentido amplio y, más concretamente, a un plateau cuyo origen estaría relacionado con la protoplaca caribeña (Lewis et al., 2002). Esta unidad, en asociación con la peridotita de Loma Caribe, que se considera originalmente infrayacente, formaría el sustrato del subsecuente vulcanismo de arco isla. El conjunto del

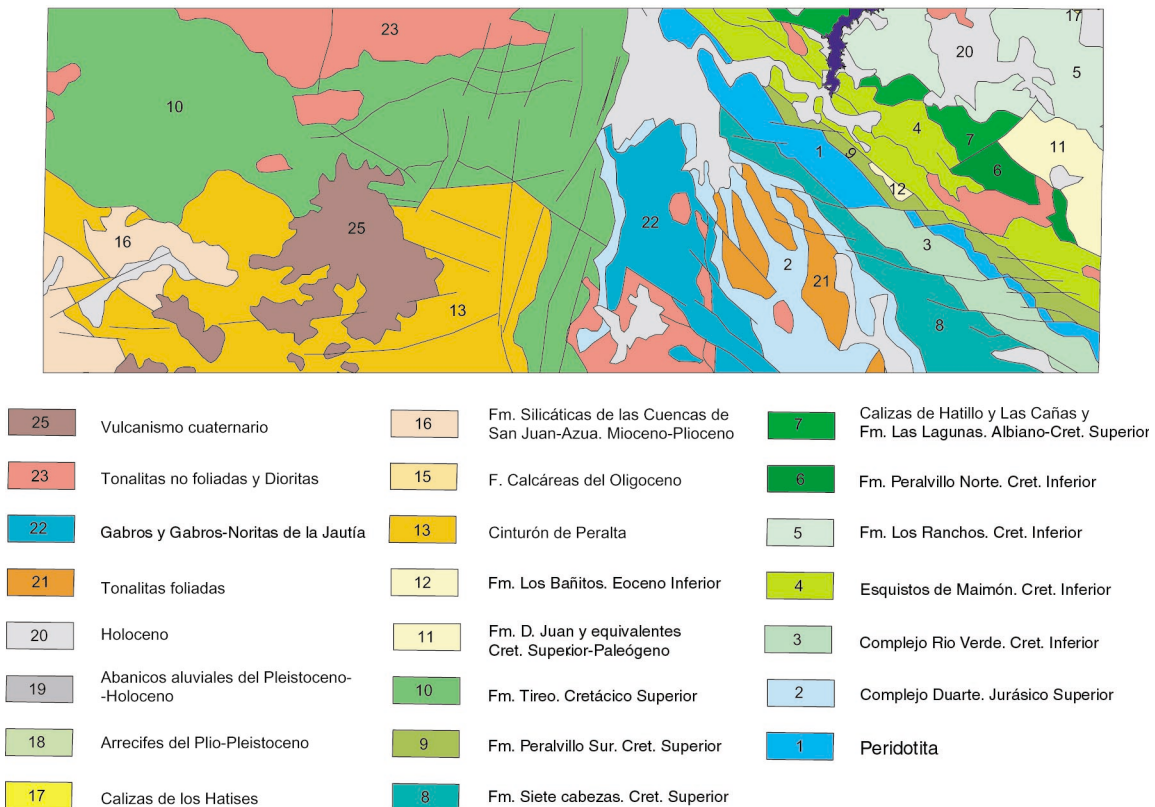


Figura 2. Esquema geológico del área Constanza-Bonao.

Figure 2. Geologic outline of Constanza-Bonao area.

Complejo Duarte y la Peridotita de Loma Caribe se interpreta como parte de un complejo ofiolítico desmembrado y obducido hacia el N (Bowin, 1960, Lewis et al., 2002).

Fragmentos de la parte vulcano-plutónica de un arco-isla

Dentro de ellos se distinguen los ligados a la primera fase de evolución del arco-isla (Cretácico Inferior) de aquellos relacionados con el arco-isla superior (Cretácico Superior).

Cretácico Inferior (pre-Albiense).

Complejo Río Verde. El Complejo Río Verde es un conjunto de metabasaltos, metagabros, y términos meta-volcanoclasticos relacionados (Lewis et al., 2002).

Formación Maimón. Esta unidad consiste en un conjunto de rocas esquistosas, de protolito esencialmente vol-

cánico aunque con frecuentes intercalaciones sedimentarias, que presentan un variable grado de deformación y metamorfismo. El vulcanismo es composicionalmente bimodal y muestra un enriquecimiento geoquímico en sodio por interacción con las aguas marinas, dando lugar a espilitas y queratófidos (Draper y Lewis, 1991; Kesler et al., 1991).

Formación Peralvillo Norte. La variedad de las litologías que conforman esta unidad, con términos volcánicos y volcanoclasticos, tanto ácidos como básicos, y frecuentes niveles sedimentarios, es muy similar a la de los protolitos de los Esquistos de Maimón. Su grado de deformación es menor, equivalente a la de los términos menos deformados de estos esquistos.

Formación Los Ranchos. Está constituida por un cinturón de rocas volcánicas intercaladas con términos sedimentarios, afectadas por metamorfismo, en facies de esquistos verdes. Las litologías más abundantes corresponden a cuarzoqueratófidos, con frecuentes feno-

crisales de cuarzo, y a andesitas piroxénicas. Dentro de esta formación se reconocen varios miembros, uno de los cuales es el de “Pueblo Viejo”, que representa la culminación de la actividad volcánica de la formación Los Ranchos, dando lugar a los depósitos de tipo maar-diatrema que rellenan un cráter de más de 1 km de diámetro y una profundidad de unos 300 m.

Formación Calizas de Hatillo. La formación Calizas de Hatillo fosiliza a la formación Los Ranchos. El contacto entre ambas se hace a través de una discordancia erosiva que presenta en la base una secuencia transgresiva. Son frecuentes las recristalizaciones producidas por las intrusiones dioríticas que la metamorfozizan a mármol blanco, a veces con pequeñas acumulaciones de magnetita que fueron objeto de pequeñas labores mineras.

Cretácico Superior (Post-Albiense)

Formación Siete Cabezas. La Formación Siete Cabezas es un conjunto esencialmente basáltico, con intercalaciones esporádicas de niveles volcanoclásticos y cherts. Desde el punto de vista litológico, el tipo dominante de la Fm Siete Cabezas consiste en lavas basálticas afaníticas y en intrusiones diabásicas.

Formación Peralvillo Sur. La Formación Peralvillo Sur consiste en un cinturón de rocas volcánicas, esencialmente basaltos y términos volcanoclásticos asociados, indeformadas y no metamorfozadas. Según Espailly y Lewis. (1998), los basaltos masivos y pillow-lavas de esta formación tienen características geoquímicas afines a la de los basaltos de tipo Morb.

Formación Las Lagunas. Sobre las calizas de Hatillo se deposita una serie volcanosedimentaria formada por lutitas negras, rocas epiclásticas finas y calizas micríticas.

Formación Tireo. Está formada por un conjunto de rocas volcanoclásticas e ígneas con intercalaciones esporádicas de niveles sedimentarios (Bowin, 1960). Constituye, en forma mayoritaria, los relieves de la Cordillera Central. Aunque no se conoce bien la fuente del volcanismo básico inicial que dio origen a la extensa unidad de tobas vitroclásticas de la Fm Tireo, parece que, probablemente, se deba a una serie de volcanes basálticos submarinos siguiendo un posible “ridge”. Una de las características más típicas de las tobas de la Fm Tireo es la intensa alteración hidrotermal que han sufrido, asociada, en muchos casos, a mineralizaciones de sulfuros de metales base y metales preciosos ligados a procesos epitermales.

Fragmentos de cuencas de retro-arco

Los materiales sedimentarios y metasedimentarios del flanco Suroccidental de la Cordillera Central han sido interpretados como un fragmento de cuenca de retro-arco. Esta franja de materiales paleógenos depositados en un surco sedimentario muy subsidente de orientación NO-SE y abierto hacia el SE, es conocido como Cinturón de Peralta (Eoceno), y aflora fundamentalmente en el cuadrante de Constanza. En ellos están representadas litologías siliciclásticas y carbonatadas (areniscas, margas en secuencias turbidíticas, secuencias pelítico-margas, limolitas, calcarenitas, calizas tableadas).

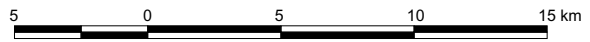
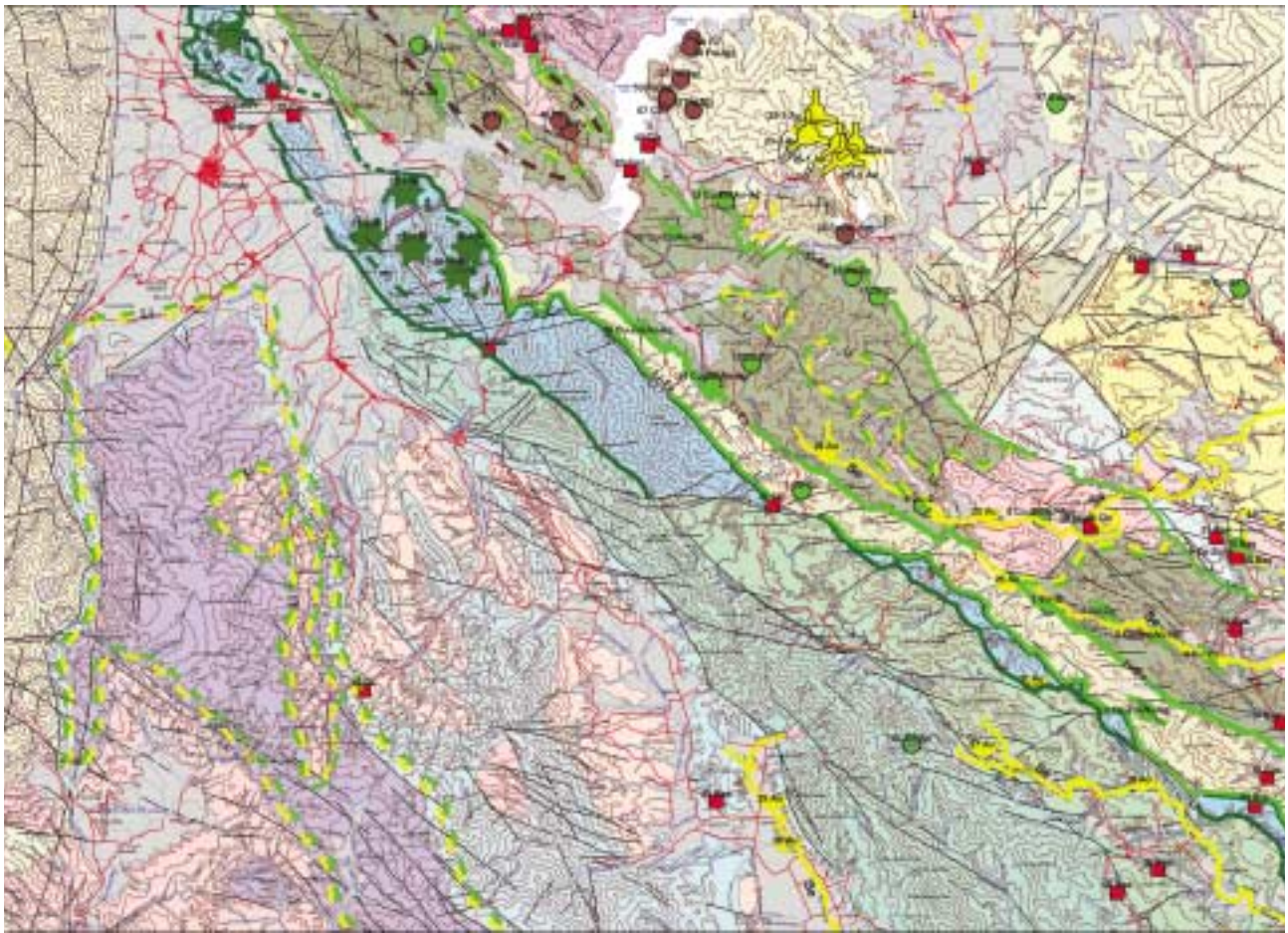
Rocas intrusivas

Tonalitas foliadas. Las tonalitas foliadas, probablemente de edad Cretácico Inferior, afloran exclusivamente en la serie metamórfica del Complejo Duarte. Las intrusiones de tonalitas foliadas se caracterizan por presentar un tipo petrográfico dominante constituido por tonalitas con hornblenda aunque presentan, geoquímicamente, un completo rango composicional, desde tipos de composición intermedia a ácida, que incluye a dioritas, tonalitas, granodioritas e, incluso, términos más evolucionados.

Sus relaciones con las rocas en las que han intruido y el estar afectadas por deformación señalan al Cretácico Inferior como intervalo más probable para su emplazamiento.

Gabros y gabronoritas de la Jautía. En el sector suroccidental del cuadrante se localiza parte de una gran intrusión de dimensiones batolíticas, elongada siguiendo una dirección NNO-SSE subparalela a la Cordillera Central y emplazada en las metabasitas del Complejo Duarte (y tonalitas foliadas asociadas). Dicho batolito está compuesto por rocas de composición máfica-ultramáfica, esencialmente gabros y gabronoritas. Su emplazamiento se ha producido en el Cretácico Superior.

Tonalitas no foliadas. Las tonalitas no foliadas forman varios plutones de forma y dimensiones variadas, que intruyen tanto en las metabasitas del complejo Duarte como en los cuerpos plutónicos descritos anteriormente, así como en las formaciones Los Ranchos, Maimón, Tireo, Peralvillo, Las Cañas, Hatillo, y Las Lagunas. Los contactos suelen ser netos y, como ocurre con la mayoría de las intrusiones de este tipo en el conjunto de la isla, no suelen desarrollar aureolas de contacto de relevancia. El afloramiento más significativo dentro del

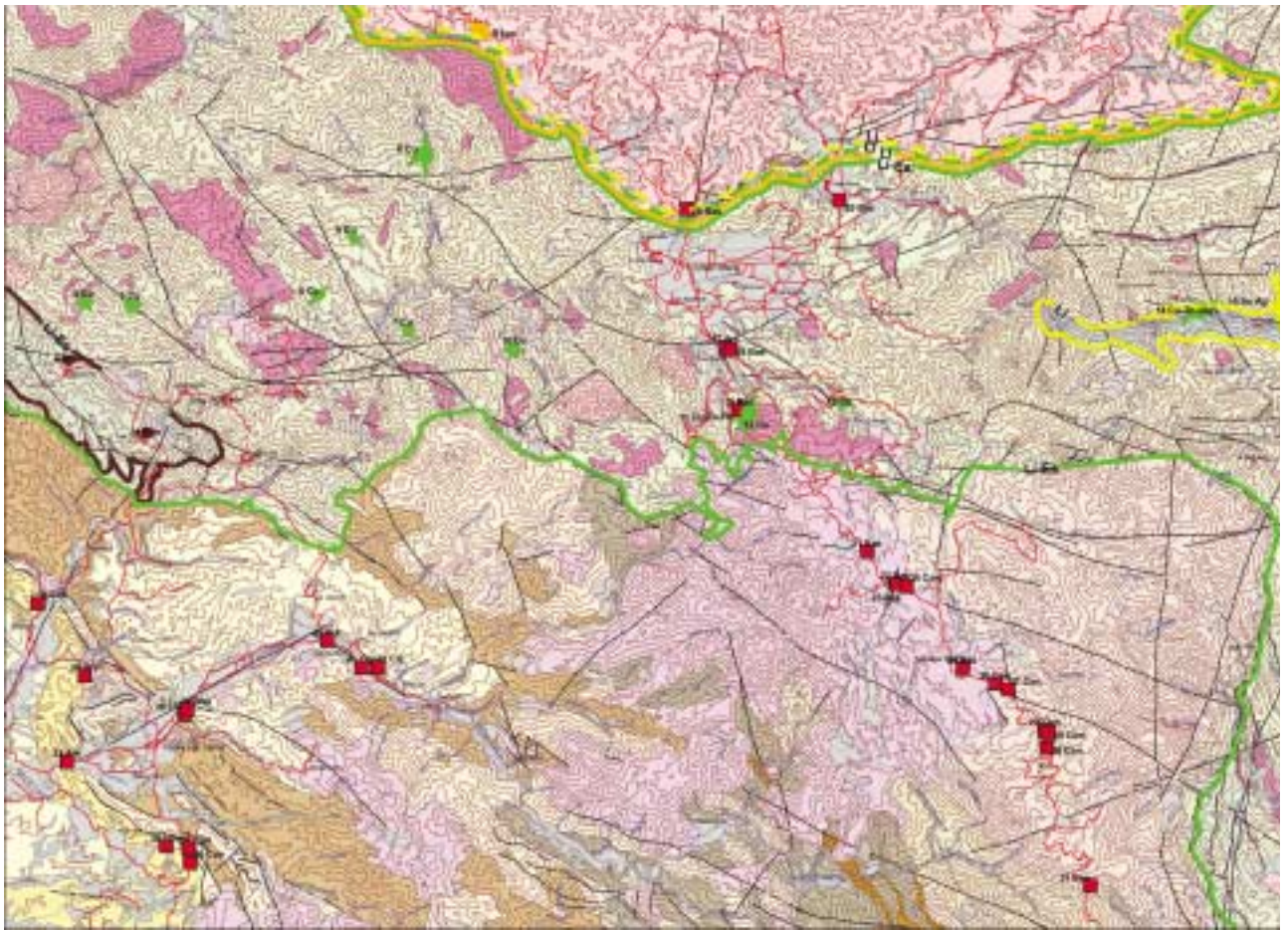


MAGNITUD DE LOS YACIMIENTOS
(Tonelaje del yacimiento - Mineral extraído + Reservas)

SUSTANCIA	PEQUEÑO	MEDIO	GRANDE
Fe (toneladas de mineral)	< 20.10 ⁶	20.10 ⁶ -1.000.10 ⁶	> 1.000.10 ⁶
Mn (toneladas mineral)	< 1.10 ⁶	1.10 ⁶ -5.10 ⁶	> 5.10 ⁶
Cu (toneladas Cu)	< 10.000	10.000-250.000	> 250.000
Au (toneladas Au)	< 5	5-100	> 100
Caolín (toneladas mineral)	< 500.000	500.000-5.10 ⁶	> 5.10 ⁶

METALOTECTOS

NATURALEZA	SÍMBOLO	NATURALEZA	SÍMBOLO
Litológico	-Li-	Paleogeogr/Éfico	-Pa-
Estructural	-Es-	Físico	-Fi-
Geoquímico	-Qu-	Biológico	-Bi-
Sedimentológico	-Se-	Geomórfico	-Ge-



MINERALES METÁLICOS E INDUSTRIALES

MENA

- Cu
- Cr, Ni, Pt
- Minerales industriales
- Au, Ag, As
- Fe, Mn, Ti
- kao (caolin)

ROCAS INDUSTRIALES Y ORNAMENTALES

- Con (Conglomerados. Materiales de aluvión y terrazas)
- Are (Arenas y limos, arenas). Arn (Arenisca calcárea. Arenisca y limolita)
- Arc (Arcilla)
- Clz (Caliza pura masiva y estratificada. Caliza arrecifal. Calizas bituminosas. Calizas con niveles de sílex-pedernal. Calizas con intercalaciones de margas).
- Bas (Basalto masivo. Toba y toba basáltica. Espilita. Queratofido. Metabasitas. Esquistos anfílicos y anfíbolitas)
- Gr (Granito y Tonalita. Migmatita)
- Srp (Roca ultrabásica. Serpentinita)
- Ma (Mármol. Travertino)

MORFOLOGÍA-REPRESENTACIÓN SIMBÓLICA

CATEGORÍA DE LOS YACIMIENTOS
Desconocido Pequeño Medio Grande

- Concentraciones ISOMÉTRICAS (I)

--	--	--	--
- Se distinguen: Estratiformes (E)

--	--	--	--
- Filonianas (F)

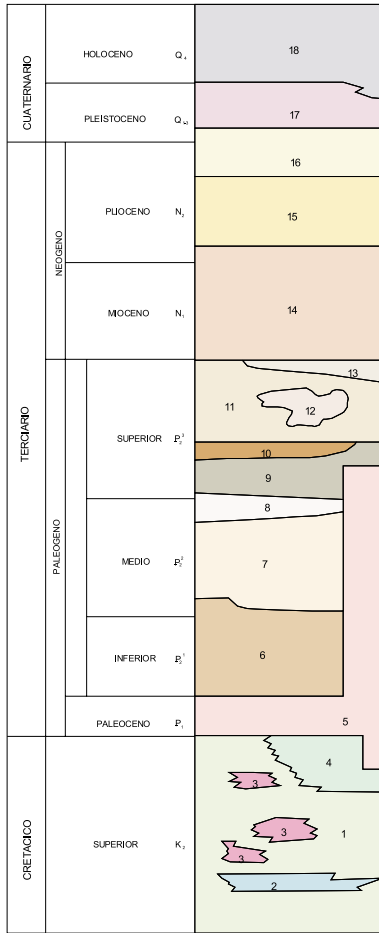
--	--	--	--
- Concentraciones IRREGULARES (R)

--	--	--	--
- Concentraciones CON FORMA DESCONOCIDA (D)

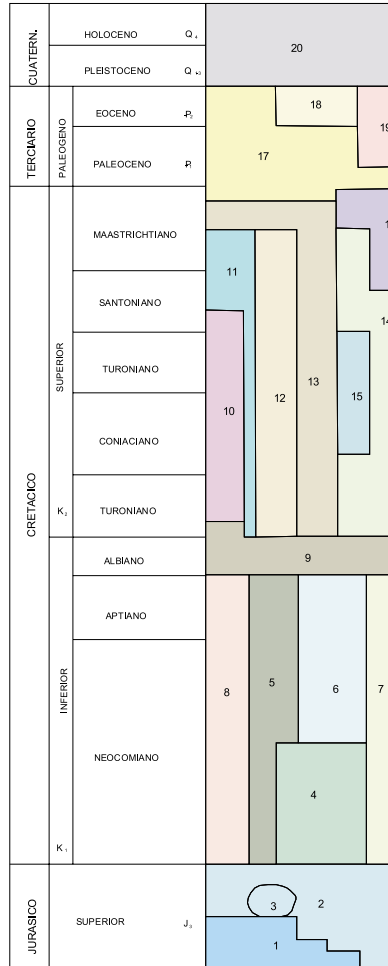
--	--	--	--
- Concentraciones ALUVIONARES (A)

--	--	--	--

Leyenda geológica hoja de Constanza



Leyenda geológica hoja de Bonao



- 18 Q₁₋₃ -Q₁ Depósitos aluviales de fondo de valle, terrazas, coluviones, abanicos
- 17 Q₂₋₄ Rocas volcánicas de composición traquítica, traquiandesitas, basaltos
- 16 N₃ -N₃ Fm. Arroyo Seco. Conglomerados blancos y arcillas
- 15 N₂ Fm. Arroyo Blanco. Conglomerados, calizas arrecifales, areniscas, arcillas y margas
- 14 N₁₋₂ Fm. Trinchera. Areniscas y margas con intercalaciones conglomeráticas
- 13 P₃ Fm. Ocoa. Calizas tableadas grises y blancas y niveles de conglomerados
- 12 P₂ Fm. Ocoa. conglomerados polimicticos masivos
- 11 P₂ Fm. Ocoa. Margas y fangos; bloques y olistolitos
- 10 P₂ Fm. Sierra El Número. Calizas estratificadas
- 9 P₂ Fm. Sierra El Número. Margas
- 8 P₂ Fm. Jura. Series Rojas del Jura. Limolitas calcáreas, margas y margocalizas.
- 7 P₂ Fm. Jura. Calizas tableadas blancas y grises,
- 6 P₂ Fm. Ventura. Alternancia rítmica de areniscas con margas y lutitas
- 5 K₂ -P₁ Batolito del Río, Tonalita del Yaque del Sur. Tonalitas, trondjenitas, cuarzodioritas
- 4 K₂ Fm. Tiroo. Calizas tableadas y en bancos. Niveles de chert y jaspes
- 3 K₂ Fm. Tiroo. Dacitas, riolitas, domos riolíticos, volcánoclasticas ácidas, coladas andesíticas y balsáticas. Domos traquíticos
- 2 K₂ Fm. Tiroo. Serie de Río Blanco. Calizas, lutitas, margas y areniscas
- 1 K₂ Fm. Tiroo. Rocas volcánoclasticas masivas básicas, tobas y brechas

- 20 Q₁₋₄ -Q₁ Glacis, terrazas, gravas, arenas, limos, coluviones
- 19 P₂ Tonalita no foliada. Dioritas, cuarzodioritas y cuarzomonzonita
- 18 P₁ -P₂ Fm. Los Bañitos. Calizas, conglomerados y aglomerados volcánicos
- 17 K₂ -P₂ Fm. Don Juan. Conglomerados, calizas, limos y areniscas
- 16 K₂ -P₁ La Yautía. Gabro, norita, anfibolita hornbléndica
- 15 K₂ Fm. Tiroo. Serie de Río Blanco. Calizas, lutitas, margas y areniscas turbidíticas
- 14 K₂ Fm. Tiroo. Rocas volcánoclasticas, brechas de naturaleza andesítica, calizas tableadas
- 13 K₂ Fm. Las Lagunas. Conglomerados piroclásticos, calizas detriticas oscuras, areniscas y limolitas
- 12 K₂ Fm. Peralvillo Sur. Coladas basálticas, piroclásticas y niveles volcánoclasticos
- 11 K₂ Fm. Siete Cabezas. Basaltos masivos, localmente con niveles de cherts
- 10 K₂ Fm. Las Cañas. Calizas arrecifales y de plataforma
- 9 K₂ Calizas de Hatillo. Calizas arrecifales y de plataforma
- 8 K₁ Tonalita foliada
- 7 K₁ Fm. Los Ranchos. Rocas volcánicas de naturaleza queratofidica, espilitas, lapillitas, aglomerados y mineralizaciones de sulfuros diseminados y epitermales
- 6 K₁ Fm. Peralvillo Norte. Rocas basálticas y andesíticas
- 5 K₁ Fm. Maimón. Rocas metavolcánicas y metavolcanosedimentarias preferentemente ácidas
- 4 K₁ Complejo Río Verde. Basaltos masivos, gabros, diabasas, rocas volcánoclasticas anfibolitas y esquistos máficos finos a medios
- 3 J₁ Fm. Duarte. Anfibolitas hornbléndicas asociadas al contacto de las tonalitas foliadas
- 2 J₁ Fm. Duarte. Esquistos máficos (facies de los esquistos y subesquistos verdes)
- 1 J₁ Fm. Loma Caribe. Peridotitas y peridotitas serpentinizadas

Figura 3. Mapa de recursos minerales de las hojas de Constanza (Tornos et al., 2000) y Bonao (Locutura et al., 2000)

Figure 3. Mineral resources map of Constanza (Tornos et al., 2000) and Bonao (Locutura et al., 2000)

área lo constituye el batolito de El Río, cuya facies dominante consiste en tonalitas de grano medio con hornblenda, aunque presenta localmente facies cuarzo-dioríticas y granodioríticas. Los tipos ácidos más diferenciados son leucotonalitas y trondjhemitas, así como diques discordantes aplíticos y pegmatíticos. El emplazamiento de estos intrusivos es post-Cretácico Superior y se prolongó, probablemente, en el intervalo Eoceno-Oligoceno.

Cuaternario

Desigualmente repartido por la zona, comprende materiales más antiguos de naturaleza volcánica (cuadrante de Constanza) y otros más recientes de naturaleza sedimentaria. Destacamos por su trascendencia, desde el punto de vista geoquímico, el vulcanismo cuaternario, cuyo afloramiento más importante se sitúa en el cuadrante de Constanza. Es de afinidad calcoalcalina predominante y presenta grandes variaciones petrológicas.

Estructura de la zona de estudio

Los aspectos estructurales de la zona han sido estudiados por diversos autores como Kesler et al. (1981), Draper et al. (1991, 1996, 1997), así como en el mismo proyecto de cartografía geotemática anteriormente cita-

do (IGME, INYPSA y PROINTEC, 2000), por lo que únicamente cabe reseñar, a grandes trazos, el diferente estilo estructural de los materiales del Cretácico Superior o post-albienses, no metamórficos y con ausencia de fábrica penetrativa, con respecto a los infrayacentes del Cretácico Inferior, con diversos grados de metamorfismo y, en general, fuerte deformación que, frecuentemente, llega a ser dúctil. Durante el Eoceno, la isla entró en régimen compresivo (transpresivo) y en relación con esta situación se produjeron los cinturones de pliegues y cabalgamientos de Peralta. A partir del Mioceno Superior, la isla fue afectada por una importante tectónica de desgarres, que configura los contactos definitivos entre unidades. Tienen direcciones preferentes NO-SE y ONO-ESE, aunque también son importantes las estructuras N-S y las ENE-OSO. La estructura lineamentaria, deducida de la imagen LANDSAT TM (en su combinación de bandas 4, 5, 3), puede observarse en la figura 4.

MARCO METALOGÉNÉTICO

La zona de estudio constituye un área con una densidad y variedad excepcional de mineralizaciones. Este rasgo es acorde con su marco geotectónico, que es particularmente favorable a la formación de diversos tipos de mineralizaciones, varias de ellas con una gran importancia y significación económica. Los análisis metalogénéticos globales (Mitchell, 1977; Hutchison, 1983;

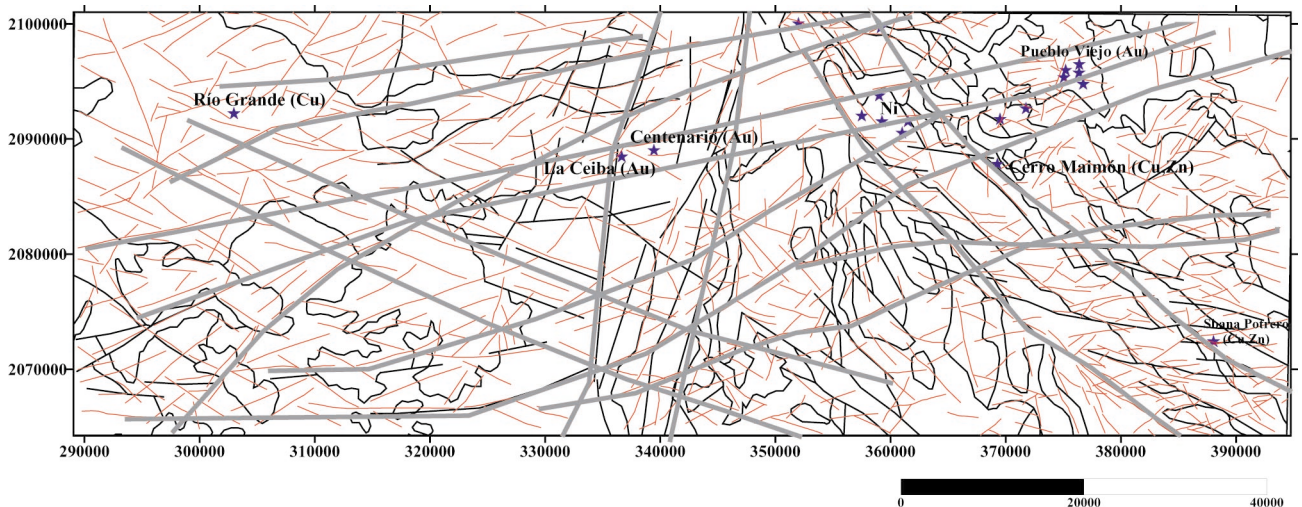


Figura 4. Área de Bonao-Constanza. Principales lineamientos deducidos de la imagen Landsat TM, sobre contactos geológicos y mineralizaciones más significativas.

Figure 4. Bonao-Constanza region. Main lineaments deduced from Landsat TM image over geological contacts and most significant mineralizations.

Kesler, 1978, 1997) coinciden en la extraordinaria fertilidad de los ámbitos de arco isla para la génesis de yacimientos minerales y en su especial relación con grandes tipos, como son los de sulfuros masivos volcanogénicos hidrotermales (VHMS), los epitermales s.l., incluyendo a los pórfidos cupríferos. Una descripción más profunda y pormenorizada de las mineralizaciones existentes en la zona puede encontrarse en las memorias de recursos minerales del Proyecto de Cartografía Geotemática (IGME, INYPSA y PROINTEC, 2000). Una representación cartográfica del conocimiento metalogenético puede verse en la figura 3 (Cartografía Metalogenética de los cuadrantes de Bonao-Constanza). Los principales tipos de mineralizaciones y sus asociaciones son los siguientes:

Mineralizaciones epitermales de Au

Existen dos tipos principales de mineralizaciones epitermales de Au-Ag en el marco de la zona: mineralizaciones epitermales de Au-Ag de alta sulfuración y de baja sulfuración.

Mineralizaciones epitermales de Au-Ag de alta sulfuración (alunita-caolinita) en la Fm Los Ranchos

Al NO de la zona se encuentra el yacimiento epitermal de alta sulfuración de Pueblo Viejo (Russell y Kesler, 1991). Este yacimiento, de clase mundial, es un enorme *stockwork* que encaja en sedimentos detríticos y carbonosos que rellenan una estructura de tipo maar. Hay que diferenciar dos tipos de mineralización, un gossan con Au y Ag o montera ferruginosa y el *stockwork* de sulfuros (primario o proto-yacimiento del anterior).

La distribución de la mineralización primaria, y consecuentemente de la secundaria u oxidada, se estructura en una serie de áreas mineralizadas dentro del maar, entre las cuales el grado de mineralización es netamente más bajo. La distribución de las zonas mineralizadas está en estrecha relación espacial con los bordes del maar. La alteración hidrotermal trasciende ampliamente del complejo diatrema-maar, pero la mineralización de metales preciosos se encuentra dentro de él, aunque en su zona más externa, siendo estéril la parte central. Esta disposición en *ring* de la mineralización está relacionada con la ascensión preferente de los fluidos mineralizantes por los bordes del maar. La mineralización sulfurada aparece de dos formas:

- Filones y venas cortando a la estratificación
- Capas o niveles reemplazados selectivamente

No se observan grandes variaciones mineralógicas o geoquímicas entre las distintas mineralizaciones, aunque sí algunas muy sutiles. Las zonalidades parecen existir más en sentido vertical que en el horizontal. Algunos índices son el de la mayor presencia de telururos en los niveles superiores. La relación Au/Ag muestra decrecimiento en profundidad con respecto al ratio de 1/7, que es el común en el nivel actual (Kesler et al., 1981). El Au se presenta principalmente en telururos, aunque también aparece como oro libre (electrum), siendo esta forma de presentación inferior al 10%-15% del total. Parece existir una cierta zonalidad en la mineralogía del Au (Kesler et al., 1981), al estar éste en forma de electrum en los niveles más inferiores y, parcialmente, en telururos en los niveles superiores. Se estima además, que aproximadamente otro 10% del Au está encapsulado en la sílice hidrotermal y no se recupera en el proceso de beneficio. El Au (electrum), y los minerales a los cuales está asociado, se presentan con una granulometría finísima (inferior a 25 μ m). La plata está asociada al oro en los telururos (sylvanita, petzita), aunque también aparece contenida en enargita y en la argentita. Algunos datos sobre contenidos medios en metales en el todo uno explican la simplicidad mineralógica o la poca frecuencia de aparición de muchos de los minerales de la paragénesis:

As (arsenopirita, enargita) \approx 250 ppm; Sb (sulfoantimoniuros) \approx 350 ppm; Te (telururos) \approx 40 ppm
 Zn (esfalerita) \approx 0,5%; Cu (calcopirita, sulfosales) \approx 0,03%

Puede decirse que todo el ámbito del yacimiento forma parte de un gran sistema hidrotermal que altera de forma intensiva las rocas por las que circula. Se reconocen los siguientes tipos de alteración (Kesler et al., 1981): alunitización, silicificación, pirofilitización, caolinización. Éstas se disponen en áreas definidas, mostrando una clara zonación. La alunitización es más intensa en la parte central y más profunda del maar, pasando, en cotas más altas, a una alteración a pirofilita. La silicificación es ubicua y afecta a todos los materiales y a todos los niveles. La caolinización aparece en las zonas más altas y superficiales y es de origen supergénico. Alteraciones semejantes, marcadas sobre todo por una intensísima silicificación, que transforma a las rocas volcánicas en "falsas cuarcitas", "cuarcitas secundarias" o "granofels" en áreas de alcance kilométrico, son muy frecuentes en el volcanismo cretácico de Cuba y de todo el arco del Caribe (Velinov, 1982) y se relacionan con la alteración producida por sistemas convectivos geotermiales asociados a sistemas epitermales.

Mineralizaciones epitermales de Au-Ag de baja sulfuración (adularia-sericita) en la Fm Tireo

En la Fm Tireo se encuentran dos mineralizaciones epitermales de Au significativas, además de otros indicios de menor importancia.

La mineralización de Au de Centenario (El Higo) consiste en filones de cuarzo con oro, cobre, cinc y bario, encajando en una estructura frágil de dirección N 5° E subvertical, que se reconoce a lo largo de 600 m, y con una potencia muy irregular entre algunos cm y casi 10 m, en rocas masivas (lavas) y epiclastitas de composición andesítica. Está situado cerca de pequeños intrusivos de composición dacítica y riolítica, todos ellos intruidos en la Fm Tireo. Las salbandas presentan una fuerte alteración hidrotermal consistente en una intensa silicificación y, en menor escala, sericitización, carbonatización y piritización. Los recursos geológicos definidos ascienden a 6 Mt con una media de 2-3 gramos de oro por tonelada.

El indicio de La Ceiba se reduce a pequeñas zonas de alteración hidrotermal, probablemente ligadas a una estructura de dirección N 35°-40°E que corta a rocas máficas e intermedias masivas y volcanoclásticas de la Fm Tireo. Hay una intensa alteración hidrotermal con una silicificación interna rodeada de cloritización y piritización irregulares. La mineralización se concentra en las zonas cloritizadas o en pequeñas masas de brechas hidráulicas cementadas por cuarzo. Consiste exclusivamente en piritita con pequeñas trazas de calcopirita.

Mineralizaciones volcano-sedimentarias de Cu-Zn (Au,Ag)

En la Fm Maimón esencialmente, aunque también en la Fm Peralvillo y en la Fm Tireo aparecen diversos cuerpos estratiformes de sulfuros masivos, de pequeña potencia y tonelaje, aunque con apreciable desarrollo longitudinal. Salvo excepciones, como las de los asociados a la Fm Tireo o a la Fm Peralvillo Sur, están, en general, relacionados con rocas volcanoclásticas ácidas a intermedias. Son de composición piritica y llevan Cu como sustancia principal, siendo variables las concentraciones de Zn, Au y Ag. El Pb suele ser muy escaso. Desarrollan generalmente una alteración hidrotermal que consiste en un proceso de silicificación-cloritización, aunque también presentan fenómenos de sericitización, coincidiendo con las características generales de alteración hidrotermal de estas mineralizaciones (Franklin, 1997).

Mineralizaciones volcano-sedimentarias en la Fm Maimón

En la Fm Maimón están incluidas mineralizaciones con caracteres comunes aunque con personalidad propia. Son las mineralizaciones de Cerro Maimón, Loma Barbuito y Loma Pesada.

La mineralización de sulfuros masivos de Cerro Maimón, encajada en rocas volcánicas y volcanoclásticas ácidas es de morfología estratiforme. Su potencia alcanza localmente los 40 m, aunque la media es de orden métrico, pudiéndose decir que, en términos generales, su potencia es pequeña. Su muro lo constituyen rocas volcanoclásticas ácidas con importante alteración hidrotermal (silicificación, sericitización, cloritización). La mineralización está constituida fundamentalmente por piritita-calcopirita-esfalerita y, accesoriamente, por bornita-galena-tetraedrita-pirrotina. Todos estos minerales muestran texturas de recristalización metamórfica. No existe un *stockwork* claramente identificable en la base de la lámina de sulfuros, aunque hay al menos dos probables zonas de alimentación (*feeders*) en posible relación con estructuras de dirección NE. Desde el punto de vista geoquímico, se trata de una mineralización de Cu-Zn con Pb muy escaso. Este yacimiento contiene 4 Mt de sulfuros masivos con 4,05% de Cu, 1,93% de Zn, 0,47 g/t de Au, 44,7 g/t de Ag (contenido en Pb, 704 ppm), aplicando una ley de corte de 1% de Cu. Sus características la aproximan al holotipo o modelo Noranda o Kuroko (Cox y Singer, 1988).

La mineralización de Loma Pesada se presenta en un cuerpo estratiforme, con una potencia irregular pero de orden métrico, tratándose de una alineación arrosariada de lentejones de sulfuros masivos. Encajan a techo y muro en una secuencia de metavulcanitas básicas (lávicas y piroclásticas) con hematites y magnetita accesorias. La mineralización está rodeada de un halo de piritita diseminada en las metabasitas, sin otro tipo de alteración hidrotermal evidente. Los recursos estimados en esta mineralización de sulfuros masivos son de 1,15 Mt con 2,13% Cu, 0,2 a 0,4% Zn.

La mineralización de Loma Barbuito aparece en un contexto de rocas volcanoclásticas ácidas con proximidad de tobas máficas, pertenecientes a la Fm Maimón. Se aprecia alteración hidrotermal (sericitización y silicificación fundamentalmente) en las tobas ácidas, y presencia de cineritas y jasperoides con Mn, situados probablemente a techo de la mineralización. Las secciones por sondeo (Empresa Falconbridge, com. personal) son en

general inferiores a 1,5 m y tienen como media 4,45% de Cu y 3% de Zn. La alta ley en Zn con respecto a la de Cu puede indicar que se trata de un cuerpo distal.

Sulfuros masivos en la Fm Peralvillo Sur

La mineralización de Sabana Potrero es una mineralización de sulfuros masivos y diseminados que encaja en la Fm Peralvillo Sur, en situación próxima al contacto tectónico de ésta con la Peridotita de Loma Caribe. La atención sobre esta mineralización proviene del espectacular gossan al que da lugar en superficie. En las rocas encajantes se observa una intensa alteración hidrotermal (silicificación, cloritización y sericitización). La mineralización aparece en una secuencia volcánica compuesta por basaltos masivos y frecuentes niveles volcanoclásticos de la misma composición, intruidos por rocas gabroideas y abundantes diques diabásicos. Está formada por varios lentejones de sulfuros masivos, con pirita, calcopirita y esfalerita, de espesor métrico, con una estructura arrosariada. Hay que mencionar, también en los materiales máficos de la Fm Peralvillo Sur, la presencia de otros indicios de mineralización: Elsa B y San Antonio.

La asociación, en campo, de estos yacimientos metálicos con basaltos con afinidad geoquímica con los de tipo Morb (Espaillat y Lewis, 1998), aparentemente yuxtapuestos a la peridotita serpentinizada, señala hacia una asociación ofiolítica de tipo "Chipre".

Mineralizaciones volcano-sedimentarias en la Fm Tireo

Este grupo incluye abundantes pero pequeños indicios sedimentarios, espacialmente asociados a las rocas básicas masivas y volcanoclásticas de la Fm Tireo, formada en un arco isla (Lewis et al., 1991). La mineralogía es muy monótona, con pirita y algo de calcopirita. El único indicio significativo de estas características es el de Río Grande, en el que los sulfuros aparecen diseminados a lo largo de una zona muy extensa (>500 m potencia) de la Fm Tireo. Los sulfuros aparecen como clastos detríticos de tamaño milimétrico en potentes secuencias de tipo *mass flow*, lo que sugiere que son el producto de la erosión de cuerpos de sulfuros (masivos?) preexistentes.

Mineralizaciones de Cu (Zn) en filones y zonas de cizalla dentro de la Fm Tireo

Mucho más importantes que las diseminaciones anteriores son las mineralizaciones ligadas a estructuras filo-

nianas y bandas de cizalla, que presumiblemente remobilizan y reconcentran las diseminaciones estratoides de sulfuros. En relación espacial con estas concentraciones hay varias decenas de pequeños indicios de cobre, cuyas leyes son muy elevadas (hasta el 10-15% Cu), pero las pequeñas dimensiones hacen que no tengan mucho interés económico. Entre ellos, los principales se concentran en las zonas de El Gramoso, Hato de los Rodríguez, Río Grande, Limoncito, Los Vallecitos, Sabana, Alto de Marciliano-La Tajasera y Pinar Bonito. Los primeros corresponden a zonas mineralizadas en estructuras de cizalla mientras que el último agrupa a varios filones aparentemente extensionales. Todas estas mineralizaciones encajan en rocas básicas de la Fm Tireo.

Las mineralizaciones ligadas a grandes bandas de cizalla de desgarre o extensionales dentro de la Fm Tireo se encuentran en las rocas básicas y muy raramente lo hacen en las ácidas. Aparecen con afloramiento continuo de hasta 400 m y potencias de 1-2 m, con direcciones bastante variables, fundamentalmente NO-SE. Se caracterizan por una intensa cloritización de la roca encajante, dando lugar a clorititas masivas que jalonan las estructuras mineralizadas. En el núcleo de las estructuras hay zonas silicificadas. La mineralización, fundamentalmente formada por pirita y calcopirita con algo de esfalerita y cobres grises, se encuentra diseminada en las clorititas o en venillas o cavidades geódicas milimétricas. Las leyes son muy irregulares, alcanzando localmente hasta 10-15% Cu y 2.7 g/t Au.

En las cercanías de estos indicios hay abundantes pórfidos tonalíticos en pequeños *stocks* y diques, por lo que se han interpretado como de tipo epitermal. Sin embargo, la alteración clorítica de alta temperatura, la relación con estructuras de cizalla, la alta relación Cu / (Zn+Pb), los bajos contenidos en Au-Ag-Te y la ausencia de minerales típicos de ebullición, como carbonatos o feldespatos, sugieren que no son mineralizaciones epitermales. Se interpretan como estructuras hidrotermales tardiorogénicas ligadas al desarrollo de una tectónica transpresiva o al colapso del orógeno, que han canalizado una importante actividad hidrotermal.

Mineralizaciones de Cu (Zn, Au) en otros contextos

Es necesario simplemente mencionar, pues no se tiene información precisa y directa de ellos, la existencia de otros indicios de mineralización, como son los existentes en los materiales volcánicos máficos de la Fm Siete Cabezas (Río Guayuma, Cu-Au) y en las rocas volcánicas y volcanoclásticas de la Fm D.Juan (Gopher,

Cu-Zn, en lentejones piríticos estratoides). Puede tratarse, como en casos anteriores, de diseminaciones asociadas marginalmente a cuerpos de sulfuros masivos, removilizaciones inducidas por el fuerte grado de deformación e, incluso, de diseminaciones en rocas básicas relacionadas con sistemas epitermales locales.

Un indicio peculiar es el de Aniana, por ser el único que aparece en el marco de la zona en un intrusivo cuarzo-diorítico en la Fm Esquistos de Maimón. Consiste en una pequeña diseminación de pirita-calcopirita (Au ?) y en venillas con la misma asociación, en una roca intrusiva localmente alterada hidrotermalmente (silicificación, cloritización). Puede tratarse de una manifestación muy local de tipo epitermal (o pórfido cuprífero).

Conocida es la relación, a distintos niveles estructurales, de mineralizaciones epitermales y pórfidos cupríferos o de Cu-Au (Sillitoe, 1999). La existencia en la propia República Dominicana, y en áreas próximas a la de estudio, de mineralizaciones consistentes en diseminaciones de Cu-Au (Ceja del Coco, 40 Mt con 0,4% Cu), en rocas intrusivas dacíticas a tonalíticas, con fuerte alteración hidrotermal, confiere interés a muchas de las pequeñas intrusiones de la zona y a varios de los indicios de Cu dispersos en rocas del Cretácico. La posibilidad de existencia de mineralizaciones del tipo "Cu porphyry", "Mo porphyry" o "Au porphyry" no debe ser excluida, máxime teniendo en cuenta la existencia de este tipo de mineralizaciones en otras áreas de la Española y del Caribe (Nicolini, 1977).

Mineralizaciones de Mn

En la Fm Tireo, asociadas a rocas volcánicas básicas, existen manifestaciones estratiformes de Mn (Los Guayuyos) que responden al modelo volcanosedimentario de este tipo de mineralizaciones (Hutchison, 1983).

Mineralizaciones de Fe (magnetita y/o hematites)

Koschmann y Mackenzie Gordon (1950) mencionan un distrito de hierro, en forma de banda de 25 km por 10 km de anchura con dirección NO-SE, de la cual aparecería, en la zona, la terminación suroriental. Aparecen sus manifestaciones entre tobas metamorfozadas de carácter ácido-intermedio y calizas recristalizadas o marmorizadas. Es sintomática la constancia de la relación entre rocas carbonatadas y las concentraciones de magnetita. Ello hace que se puedan considerar como mineralizacio-

nes de magnetita producidas por metasomatismo de contacto, aunque la ausencia de rocas intrusivas en contacto estrecho con ellas, sugiere que se trata de mineralizaciones de tipo distal (Sokolov, 1970). Los fluidos hidrotermales, procedentes de intrusiones tonalíticas próximas, descargarían el hierro al entrar en contacto con litologías reactivas de composición carbonatada.

Sin relación visible con rocas carbonatadas, pero con una serie de características comunes, aparecen en el mismo distrito una serie de mineralizaciones de hierro de otro tipo. Encajan todas ellas en rocas espiliticas y queratofidicas, más o menos metamorfozadas, de la Fm Los Ranchos. Sus asociaciones minerales son similares a las del grupo anterior, aunque en este caso el mineral predominante es, según las referencias (Naciones Unidas, 1978), la hematites, siendo la magnetita subordinada, accesoria o ausente. En algún caso las rocas encajantes son pórfidos ácidos muy silicificados, apareciendo la mineralización como una brecha intrusiva en ellos. Estas mineralizaciones, ligeramente diferentes de las anteriores, forman sin embargo con ellas un conjunto asociado espacialmente y temporalmente a un único proceso mineralizador de ámbito regional. Podrían asimilarse a un subtipo de los yacimientos metasomáticos de contacto de hierro que distinguen los investigadores soviéticos (Walther y Zitzmann, 1978) bajo el término de yacimientos de magnetita-hematites silico-acuosos, similares a los yacimientos metasomáticos de contacto, y que se presentan en complejos volcanosedimentarios, a cierta distancia de los cuerpos intrusivos, por lo tanto distales, y sin aparición de cuerpos de skarn.

Mineralizaciones de Ni

En la Fm Loma Caribe, existen varios yacimientos de Ni de carácter supergénico, formados por la alteración superficial de las rocas ultrabásicas y la concentración del Ni del protolito peridotítico en los saprolitos y serpentinitas. Pertenecen al tipo de mineralizaciones de níquel lateríticas. Estas comprenden los productos "in situ" de meteorización laterítica desarrollados a partir de las rocas ultrabásicas. Durante el proceso de lateritización, los componentes químicos de la roca ultrabásica o de la serpentinita primarias tienen distintos comportamientos: elementos móviles lixiviados (Mg, Si, Ca), elementos inmóviles residuales (Fe, Cr, Al, Ti,.) y elementos de enriquecimiento supergénico (Ni, Mn, Co, Zn..). Los yacimientos lateríticos de Ni se clasifican generalmente (Samama, 1986) según sus características mineralógicas (mineral silicatado u oxidado) y según el per-

fil laterítico en el que se desarrollan. En los de Loma Caribe, el Ni se presenta mayoritariamente en forma silicatada (ligado a la sílice no lixiviada), aunque puede estar parcialmente en forma de óxido. Las rocas primarias ultrabásicas de la Fm Loma Caribe, con el grado de serpentinización regional que presentan, tienen del orden de 0,20-0,25% Ni, lo que supone unos contenidos normales en este tipo de rocas. Por ello, la aparición de concentraciones explotables en ellas se debe exclusivamente a factores morfoclimáticos. Los suelos lateríticos de la zona muestran una gran heterogeneidad de perfiles y de potencias de los distintos tramos, además de variaciones muy rápidas y locales, tanto en vertical como en horizontal, de contenidos y características texturales.

Los principales factores que parecen controlar la existencia de recursos de Ni con interés económico no incluyen el contenido en Ni de la roca primaria ni la variedad petrológica de ésta, siendo los procesos de concentración de naturaleza totalmente supergénica. Sí que lo son, por el contrario, los que gobiernan el proceso supergénico: drenaje (un buen drenaje favorece la lixiviación), geomorfología o relieve (pendientes inferiores al 20%, altos relativos con buen drenaje, depresiones). El clima que, en términos generales, es un factor determinante en los procesos generadores de este tipo de depósitos, no es un factor que gobierne la distribución a la escala de la zona, pues cabe pensar en una uniformidad climática para todo el área. En el terreno cronológico, se acepta que el proceso de lateritización está actuando desde el Mioceno Inferior, habiendo actuado desde entonces fenómenos de rejuvenecimiento de relieve y erosión (tectónica de bloques principalmente, reconociéndose al menos cuatro ciclos fisiográficos desde entonces) y habiendo variado posiblemente las condiciones de meteorización, aún cuando siguen actualmente siendo favorables para ello.

OBJETIVOS Y METODOLOGÍA GENERAL DE LA CARTOGRAFÍA GEOQUÍMICA

Existe una unánime aceptación de los métodos geoquímicos, y en particular de los basados en sedimentos de corriente, como herramienta de exploración muy adecuada a zonas de clima tropical, por la importancia de la meteorización química y de las dispersiones químicas de muchos de los elementos (Appleton, 1995; Tooms, 1987). La utilidad de las técnicas geoquímicas se basa en la amplitud de las dispersiones, propiciada por las intensas precipitaciones y temperaturas, y las fuertes lixiviaciones favorecidas por la humedad, la densidad de vege-

tación y la acidez del medio. Las particulares condiciones morfoclimáticas de la zona (medio tropical montañoso), que inducen una fuerte erosión de los regolitos y una importante componente de dispersión mecánica, refuerzan la aplicabilidad de la geoquímica de sedimentos de arroyos, por comparación a la de los medios tropicales con relieve más maduro (Tooms, 1987). En este medio, la dispersión hidromórfica, seguida por la fijación de los elementos móviles por los óxidos de hierro, es el mecanismo principal de dispersión en los suelos, mientras que en la red hidrográfica la dispersión sería esencialmente mecánica (Appleton y Ridgway, 1994). Esta situación presupone (Mackenzie, 1977; Walker y Tooms, 1963) una relación muy estrecha entre contenidos en suelos y en los protolitos, y entre suelos y sedimentos.

El objetivo principal e inicial de este estudio geoquímico ha sido el de aportar una información geoquímica sistemática del área, y poner de manifiesto, en forma complementaria a los mapas de recursos minerales, la potencialidad metalogénica del territorio comprendido en ella, mostrando o indicando áreas prospectivas. La cartografía geoquímica está siendo utilizada para la identificación de variaciones litológicas en relación con la evolución geológica regional y, por ello, como base para la exploración y evaluación de recursos. Este enfoque requiere que, además de la definición de anomalías geoquímicas relacionadas con mineralizaciones, se pongan de manifiesto rasgos geoquímicos indicadores de medios favorables para su formación (Plant y Slater, 1986; Plant y Tarney, 1994a). Al estar fijado de partida el número de muestras y al resultar por ello una baja densidad de muestreo para el conjunto de la superficie abordada (3.800 km² y una densidad resultante de 1 muestra / 5 km²), no puede ser un objetivo la definición de anomalías directamente relacionadas con mineralizaciones concretas salvo de forma accidental, pero sí la de distritos o metalotectos de orden regional. La densidad de muestreo es apropiada, aunque algo baja, para una cartografía geoquímica regional, cuyo objetivo sería la constitución de una infraestructura geoquímica regional susceptible de diversos tipos de aplicación.

En definitiva, los objetivos de este estudio son de tipo exploratorio (delimitación de posibles áreas o distritos con interés metalogénico) y de tipo infraestructural (cartografía geoquímica). Para ello, la metodología general seguida ha sido la siguiente:

- Realización de una campaña geoquímica de orientación o piloto para la definición de los parámetros principales de la campaña de exploración y cartografía.

- Toma de muestras de sedimentos de corriente, al ser considerado este tipo de muestra como la más robusta y representativa para este tipo de estudios regionales (Plant et al., 1989, 1990; Ottesen y Theobald, 1994).

- Preparación y análisis multielemental de las muestras de sedimentos de corriente.

- Tratamiento estadístico y gráfico de los datos geoquímicos, integración e interpretación final.

CAMPAÑA DE ORIENTACIÓN

Los objetivos de una campaña piloto o de orientación, previa a cualquier fase de exploración o cartografía geoquímica, son, en general, a) obtener un conocimiento preliminar y general del área y sus características (comunicaciones, características de los suelos, tipos de cursos de agua, presencia y tipo de sedimentos, etc), b) determinar de la pauta y densidad de muestreo adecuada y la definición de la granulometría óptima para el análisis químico y c) elegir las técnicas analíticas adecuadas al problema. Dado que en este caso la densidad de muestreo viene pre-determinada por las bases del proyecto, los objetivos de la presente quedan reducidos a la primera y a la última.

Metodología y desarrollo

En doce puntos de la zona, correspondientes a entornos estratigráficos y litológicos diferentes y, en el caso de dos, a áreas mineralizadas, se han tomado muestras de sedimentos de arroyo en cuencas de entre 5 y 10 km², semejantes a los que se muestrearán en la campaña regional, y muestras de suelos, en un entorno próximo, a una profundidad de 10-30 cm. Todas las muestras han sido secadas, disgregadas y cuarteadas, y se ha procedido en ellas a una clasificación granulométrica, separándose en cada una de ellas las fracciones siguientes : < 63 micras; 63 - 125 micras ; 125-177 micras ; 177-250 micras ; > 250 micras (250-1000 micras).

Dichas fracciones han sido molidas a tamaño de 200 mallas (inferior a 63 micras) para que sus análisis sean comparables, al efectuarse sobre una misma granulometría. En una segunda fase, se han separado las fracciones <125 micras y 125 – 1000 micras, que han sido así mismo molidas a 200 mallas. Las muestras o fracciones así formadas han sido analizadas con la misma metodología de análisis multielemental que se describe posteriormente en la campaña regional.

Conclusiones

Las principales y más destacables informaciones y conclusiones que se extraen del estudio de orientación, para cuyo análisis detallado se remite al citado Proyecto (IGME, INYPSA y PROINTEC, 2000), son las siguientes :

- Escasa presencia ponderal de las fracciones finas en la muestra total, tanto en sedimentos como en suelos.

- Las variaciones de contenidos, elemento a elemento, en función de la fracción granulométrica, muestran pautas diferentes en función del elemento químico y/o del entorno litológico y del morfológico. Se distinguen pautas decrecientes, pautas crecientes, pautas en U, pautas en U invertida o pautas irregulares, al pasar de las granulometrías finas a las más groseras. Los elementos mayores (salvo el Fe) y algunos elementos traza, como Cu y Pb, muestran, en general, pautas decrecientes mientras que otros elementos, como Ba, Au, As, las tienen en U invertida o, como el Cr, las tienen crecientes o son más dependientes del entorno litológico. En general cabe suponer, para una mayoría de los elementos, una dispersión fundamentalmente mecánica.

- Las pautas en suelos son muy similares a las de sedimentos de corriente.

- La mayor parte de los elementos discriminan claramente a los entornos litológicos de las muestras, y a las zonas mineralizadas de las no mineralizadas, en la mayor parte de las fracciones, aunque la nitidez de la respuesta depende evidentemente de la granulometría. Muestran sensibilidad a variaciones del fondo litológico, en forma similar a lo descrito por Simpson et al. (1991) en ámbitos morfoclimáticos similares, como el de Jamaica.

- Como solución de compromiso entre las tendencias de los elementos, por ser la que maximiza los contrastes de una gran parte de elementos, por su mayor abundancia en la muestra y su facilidad para el ataque químico sin molienda previa al análisis químico, se ha elegido la fracción < 125 micras para el desarrollo de la campaña regional. Esta fracción es coherente con las preconizadas o más empleadas en medios tropicales montañosos, fracciones menores a 177 o 150 μ (Appleton y Ridgway, 1994).

- Se confirma, para la mayor parte de los elementos, la estrecha correspondencia entre contenidos en suelos y en sedimentos, coincidiendo con lo observado en ambientes similares por Mackenzie (1977) y Walker y Toms (1963).

GEOQUÍMICA REGIONAL

Muestreo

En las dos hojas de Bonao y Constanza, que constituyen un área de aproximadamente 3.800 km², se han tomado 684 muestras de sedimentos de corriente, lo que implica una densidad de muestreo media de 5,5 muestras / km². Esta densidad, obligada por el número de muestras previsto en el proyecto, no es, en principio, suficiente para la detección sistemática de anomalías directamente relacionadas con mineralizaciones, pese a la gran movilidad de la mayor parte de los elementos que sería de esperar en un medio morfoclimático como el de la zona.

Previsiblemente, las amplias áreas de drenaje (superiores a 5 km²) que corresponden a la mayoría de las muestras, se traducirán, dada la complejidad de la geología y la gran capacidad de arrastre de los arroyos, en importantes efectos de mezcla y dilución de materiales en los cauces y, por lo tanto, de señales geoquímicas de procedencia diversa. Asimismo, los mapas geoquímicos tendrán la resolución correspondiente. La imagen geoquímica de las formaciones geológicas, a la cual deben forzosamente referirse las anomalías, serán probablemente difuminadas y mostrarán una correspondencia laxa con las unidades subyacentes.

El muestreo, llevado a cabo en los meses de Enero a Abril de 1999, se ha efectuado en arroyos de 3^{er}, 4^o e in-

cluso de 5^o orden, y con una disposición dicotómica. Se han seguido las recomendaciones expuestas en las conclusiones del proyecto IGCP 259 (Darnley et al., 1995) y en el proyecto "Global Geochemical Baselines for Europe" (Salminen et al., 1998). Se ha procurado tomar las muestras en puntos sin contaminación visible y aguas arriba de caminos o poblados. Las muestras han sido recogidas en el cauce vivo, sin influencia directa de aportes de las riberas. Las muestras han sido compuestas, resultado de la mezcla de al menos 5 incrementos (entre 5 y 10) recogidos a lo largo de 200 m de cauce. Se han buscado, dada la gruesa granulometría que en general se encuentra en los cauces, zonas con menor fuerza de corriente que permitieran el acúmulo de sedimentos más finos (detrás de grandes rocas o bloques, en zonas de convexidad del cauce, etc.). En cada punto se han tomado las coordenadas con un GPS, y se ha realizado una ficha en la que se reflejan datos sobre el tipo de sedimento y el cauce del arroyo. La situación de las muestras de sedimentos se recoge en la figura 5.

Preparación de muestras

Las muestras de sedimentos han sido secadas al sol, disgregadas manualmente y homogeneizadas y tamizadas a la granulometría determinada previamente, a 125 µ. La fracción menor de 125 µ ha sido cuarteada y envasada en un bote de plástico para su envío al laboratorio de análisis químico. Se han preparado un 5% de muestras duplicadas para control de laboratorio.

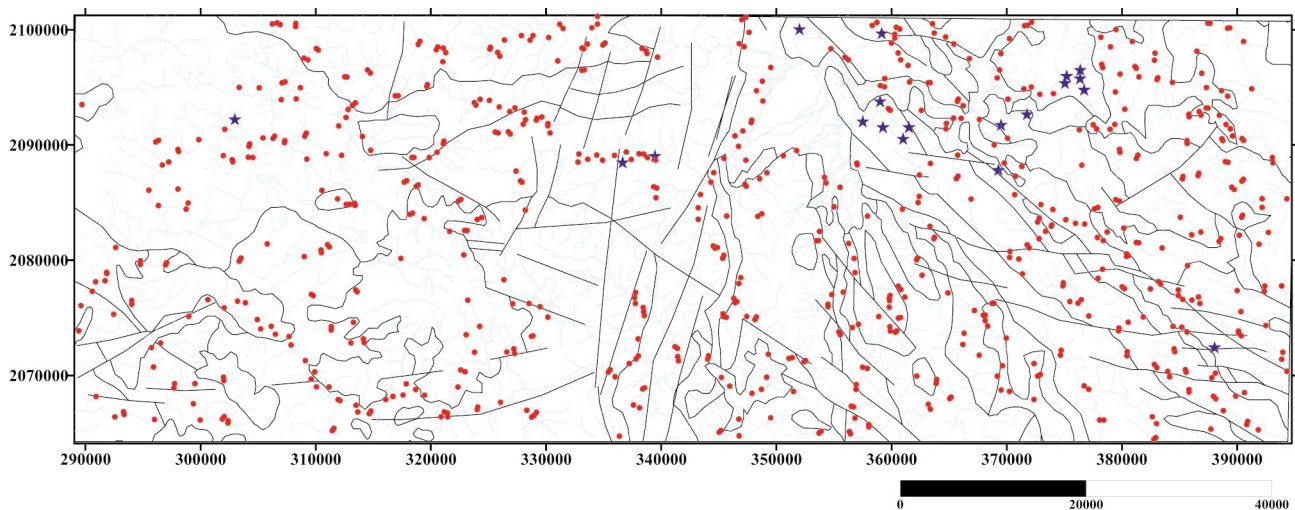


Figura 5. Área de Bonao-Constanza. Geoquímica de sedimentos de corriente. Situación de muestras (rojo) y principales mineralizaciones (azul).

Figure 5. Bonao-Constanza region. Stream sediment geochemistry. Samples situation (red) and main mineralizations (blue).

Análisis químico multielemental

La gama completa de 48 elementos, entre trazas y mayores, ha sido determinada en los laboratorios acreditados de ACTIVATION LABORATORIES LTD (ACTLABS) en Ancaster (Ontario, Canadá). De ellos, un grupo ha sido analizado por la técnica de Activación Neutrónica (INAA) y otro por Espectrometría de Emisión Plasma con Acoplamiento Inductivo (ICPAES).

Para el análisis por ICPAES, un gramo de submuestra de granulometría inferior a 125 micras ha sido puesto en disolución mediante un ataque fuerte, con digestión total o prácticamente total de la muestra, con cuatro ácidos (HCl, HNO₃, HClO₄ y HF), pasándose la disolución por un plasma excitado por radiofrecuencias. Los elementos químicos determinados (48) son los siguientes:

ICPAES : Ag, Al, Be, Bi, Ca, Cd, Cu, K, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, Sr, Ti, V, Y, Zn.

INAA : Au, As, Ba, Br, Ce, Co, Cr, Cs, Eu, Fe, Hg, Ir, La, Lu, Na, Nd, Rb, Sb, Sc, Se, Sm, Sn, Ta, Th, Tb, U, W, Yb, S.

El control de calidad analítica se ha realizado a partir de patrones internacionales internos y de los duplicados preprados al efecto. La precisión y exactitud de los resultados ha sido considerada aceptable

TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN GEOQUÍMICA MULTIELEMENTAL

El análisis de la información geoquímica multielemental se estructura en tres fases o etapas.

Tratamiento estadístico y análisis gráfico univariante

Se han determinado los principales parámetros estadísticos descriptivos de las distribuciones de las variables geoquímicas y se han elaborado los histogramas correspondientes. Destacan, por la gran diferencia entre el margen o rango de variación y el estimador de la tendencia central (media o mediana), es decir, por sus coeficientes de variación, elementos como Au, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Sb, V, S, Th, U. Ello es debido, en algunos casos, a la presencia, en la zona, de litologías geoquímicamente muy contrastadas, en el caso de algunos de ellos, y a la existencia de numerosos valores anómalos o atípicos en otros. Por el contrario, otros elementos tienen margen de variación nulo, por estar todas las concentraciones por

debajo de su límite de detección (Hg, Ir), o muy bajo (Sn), siendo, por lo tanto, su importancia y consideración nulas a partir de ahora.

Algunos elementos presentan distribuciones que se ajustan aproximadamente a los de una función normal o gaussiana de distribución. Estos, como ocurre en general, son los principales elementos mayores (Al, Na,). Sin embargo, otros elementos mayores (K, Mg, Fe, Ca, Ti) se separan claramente de este tipo de distribución, sin duda por ser los que presentan mayores contrastes entre las litologías geoquímicamente muy diferentes que aparecen en el área.

El resto de los elementos muestra en general una tendencia a distribución lognormal, con una mayor o menor asimetría positiva. Únicamente Zn, Sc e Y muestran distribuciones relativamente poco asimétricas, con tendencia a normalidad. En general, por lo tanto, el comportamiento de los elementos traza se ajusta a lo descrito históricamente para ellos.

La mayor asimetría positiva se presenta en el caso de elementos de mineralización por la existencia de valores anómalos o atípicos (Au, Ba, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Th, Ta), aunque también se producen en elementos litológicos como Hf, Nd, Rb, V o Sr. En algunos casos, como en los de Y, Se, Nd, Ce, o incluso Ca, aparecen rasgos de polimodalidad (litologías muy contrastadas).

Se han elaborado, para la totalidad de los elementos químicos que muestran algún tipo de variabilidad, mapas de contorno basados en playas de color y no en isolíneas. La interpolación, en malla de 700 × 450 m, se ha efectuado por el método del inverso de la distancia al cuadrado, utilizando una ventana circular de 6.000 m de radio. Con ellos, se pretende conocer las tendencias de distribución espacial de las variables geoquímicas y establecer posibles relaciones entre ellas y el substrato geológico u otros factores. El criterio seguido en la representación gráfica ha sido el de diferenciar los tramos definidos por los umbrales relativos a los percentiles 25%, 50%, 75%, 90% y 95%. En el caso de algunos elementos, cuyo límite de detección es superior a una parte del margen de variación del elemento, se han utilizado umbrales adecuados al caso (en general, umbrales de percentiles más elevados p.ej.: 50-75-90-95-97,5%).

Existen algunos aspectos generales llamativos e importantes a destacar acerca de las tendencias de distribución espacial de los elementos químicos en el área de estudio. No todos los elementos presentan el mismo grado

de coherencia en su repartición, mostrando muchos de ellos un claro control regional de carácter geológico o litológico, mientras que otros, en forma sensiblemente diferente, tienen distribuciones más irregulares, con frecuentes variaciones y contrastes de ámbito muy local y, frecuentemente, sin especial relación con las estructuras geológicas. Estas últimas tendencias obedecen o están controladas por la presencia de factores o estructuras locales, a veces sin representación cartográfica, como son la presencia de mineralizaciones o de alteraciones hidrotermales (anomalías verdaderas), o de litologías no expresadas en el mapa geológico (subaflorantes o con afloramientos pequeños) y fuertemente contrastadas con respecto a su entorno (pequeños stocks graníticos, p.ej.), de rasgos morfoclimáticos o características edáficas muy locales, de contaminaciones u otras (falsas anomalías). La mayor o menor congruencia de las distribuciones depende, finalmente, de las características de los elementos, que tienen, en el medio superficial diferentes movilidades y mecanismos de dispersión, y cuyas reparticiones superficiales reflejan con diferentes grados de fidelidad a las unidades litológicas, así como de la densidad de muestreo que condiciona la resolución de las técnicas geoquímicas.

Pueden distinguirse tres casos en el área de Bonaer-Constanza :

Elementos cuyas distribuciones muestran un control regional geológico y una correlación estrecha con las unidades litológicas

Entre éstos cabe citar a la mayoría de los elementos del grupo de las Tierras Raras , Ce, La (Fig. 6), Lu, Nd, Sm, Yb, que discriminan muy bien, aunque con ligeras diferencias entre ellos, a los intrusivos tonalíticos y granodioríticos y al volcanismo cuaternario, por sus contenidos más elevados con respecto a los valores medios en la Fm Tiroo y en las unidades sedimentarias de la Fm Peralta, y más bajos en las restantes.

La mayor parte de los elementos mayores analizados tienen, asimismo, un control geológico neto. El Ca, con contenidos más elevados en los materiales sedimentarios del Cinturón de Peralta -en forma más específica, con las unidades calcáreas- y medios en Fm Tiroo, C. Duarte, Fm Siete Cabezas, C. Río Verde, Fm Maimón y Peralvillo Sur, destaca por su relieve negativo la Fm Los Ranchos y la Fm Don Juan. El Fe, asociado a la Fm Loma Caribe, a las gabronoritas y, en menor grado, a las unidades de Tiroo, Río Verde, Peralvillo Sur, discrimina por sus bajos contenidos a las formaciones sedimentarias del

Cinturón de Peralta y la Fm Los Ranchos. El Mg, que destaca en las formaciones de naturaleza ultrabásica y básica, y, en menor medida, en la Fm Tiroo, delimita claramente a las unidades sedimentarias y a la Fm Los Ranchos por su bajo fondo. El Na, aunque con distribución algo más irregular, tiene una respuesta positiva por parte de los intrusivos ácidos, del volcanismo cuaternario y de la Fm Los Ranchos, que contiene queratófidos y espilitas, rocas con evidencias de metasomatismo sódico.

Algunos elementos traza se reparten también de forma básicamente congruente con la estructura geológica como el Cr (Fig. 7), asociado a peridotitas, a gabronoritas, al Complejo Duarte y, en forma más atenuada, a la Fm Tiroo y a las restantes formaciones volcanogénicas, delimitando en forma negativa a las rocas sedimentarias, a algunas intrusiones tonalíticas y a la Fm Los Ranchos. El Cu, se ajusta, en sus contenidos mayores, al ámbito de la Fm Tiroo y, en menor grado, en sus contenidos medios, a las formaciones con términos basálticos como Fm Siete Cabezas, C. Río Verde, Fm Peralvillo Sur, Fm Maimón y Fm Don Juan, mientras que se delimitan por sus bajos contenidos las tonalitas, gabronoritas y la Fm Los Ranchos. El Ni, tiene una distribución muy similar a la de Mg y Co, manifestándose, sobre todo, en las Peridotitas de Loma Caribe. El Th y el U, presentan un comportamiento, a grandes rasgos, análogo al de las Tierras Raras, El V es similar al del Fe. El Y tiene una distribución bastante parecida a la de Yb, asociándose a tonalitas y unidades volcánicas, aunque mostrándose significativamente deprimido en el volcanismo cuaternario, en las gabronoritas y en el entorno de la mineralización de Pueblo Viejo, con respecto al resto de la Fm Los Ranchos. El P tiene una repartición bastante peculiar, por cuanto delinea en forma ajustada en sus contenidos medios a altos - > 0,05% - al volcanismo cuaternario, a los materiales del grupo Peralta, a las calizas de Hatillo y a la Fm Peralvillo Norte, mientras que presenta contenidos deprimidos el C. Duarte. El Cs, con distribución ajustada a los materiales sedimentarios del Grupo Peralta, tiene también relación con factores locales de mineralización, como Pueblo Viejo. El Hf (Fig. 8), presenta una repartición controlada de forma muy congruente por los intrusivos de tonalitas y granodioritas, incluyendo a las foliadas y con la excepción del intrusivo de Zambrana, al E.

Cabe destacar que en el caso de algunos de estos elementos, de control litológico, la respuesta que manifiestan sobre algunas unidades no es homogénea, poniendo de manifiesto en ellas probables diferenciaciones de tipo primario o secundario. Así, p.ej., la respuesta del batolito tonalítico Del Río no es igual a ambos lados de la fa-

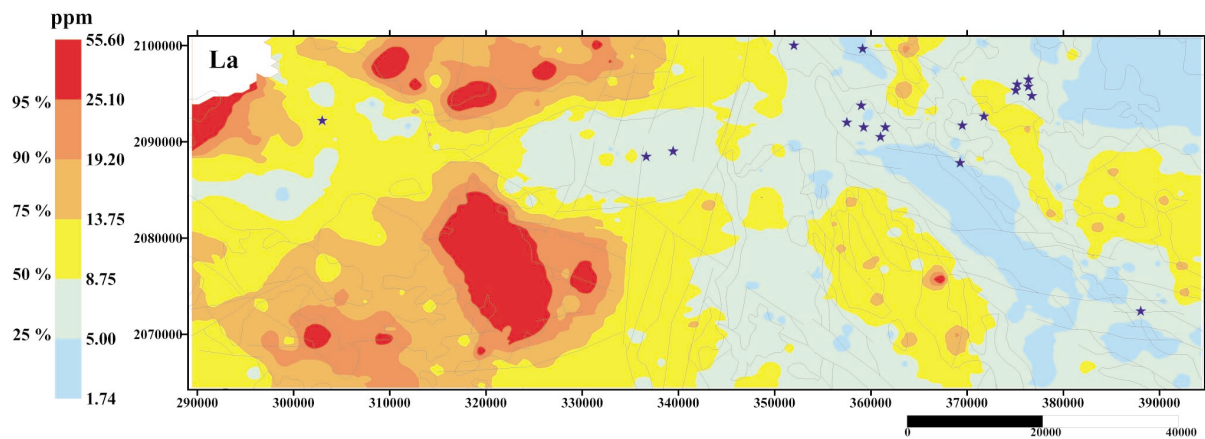


Figura 6. Geoquímica de sedimentos de corriente. Distribución del lantano.

Figure 6. Stream sediment geochemistry. Lanthanum distribution.

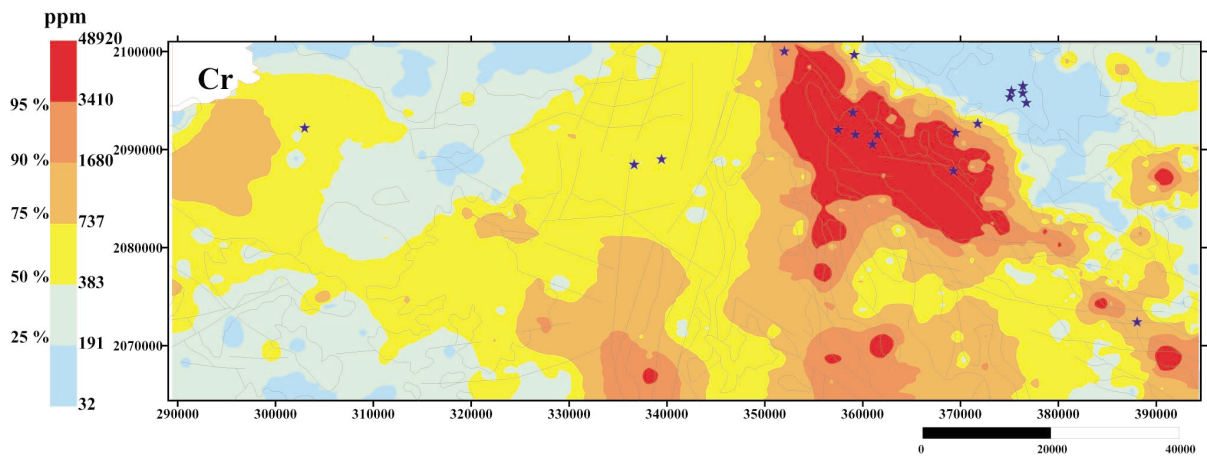


Figura 7. Geoquímica de sedimentos de corriente. Distribución del cromo.

Figure 7. Stream sediment geochemistry. Chromium distribution.

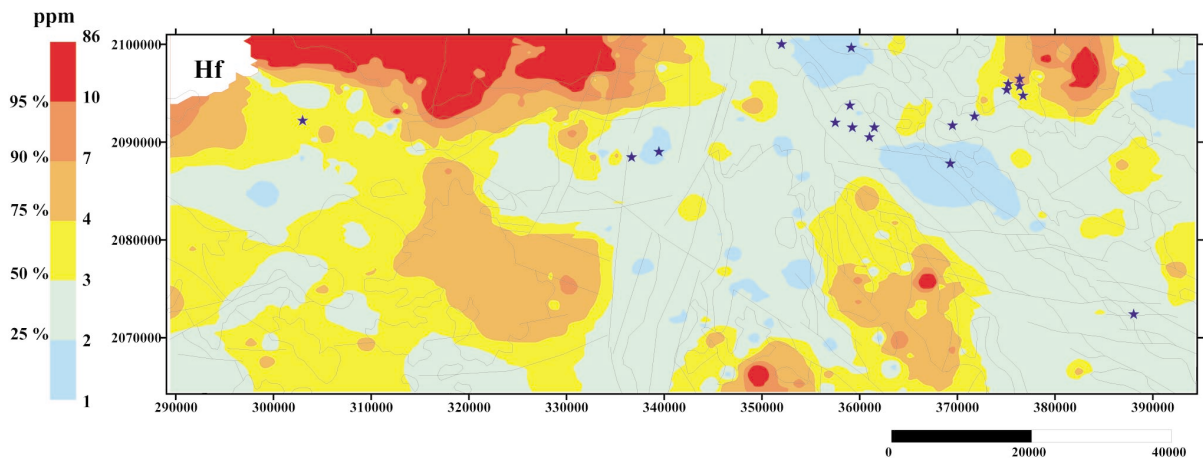


Figura 8. Geoquímica de sedimentos de corriente. Distribución del hafnio.

Figure 8. Stream sediment geochemistry. Hafnium distribution.

lla N-S que afecta a este intrusivo. Se observan mayores contenidos de Lu, Na, P, Y, Yb en el bloque oriental y de Fe y V en el occidental, lo que sugiere que dicha falla se para una facies posiblemente más evolucionada en su sector E. En el caso de la peridotita de la Fm Loma Caribe, se observa un claro contraste en los contenidos de algunos elementos normalmente asociados a estas litologías en su parte N y en su parte más meridional (Ni, Co, con mayores concentraciones en el sector N de la unidad), mientras que otros, igualmente afines, como el Cr, presentan una repartición más homogénea. Ello está inducido, probablemente, por procesos supergénicos en relación con situaciones morfológicas específicas, al desarrollarse preferentemente en la zona N procesos de laterización que han conducido a concentraciones de Ni y Co que, en ocasiones, llegan a ser económicas. Merece señalarse también, el probable efecto que tienen, en las distribuciones de elementos, los procesos de hidrottermalismo asociados a amplios sistemas convectivos que han actuado en distintas áreas y a menudo con consecuencias productivas. En relación con ello, llaman la atención los bajos contenidos de la mayor parte de los elementos "litológicos" en la Fm Los Ranchos, en la cual existen, por otra parte, evidencias de una alteración hidrotermal generalizada, posiblemente debida a un lavado o lixiviación por fluidos hidrotermales. Esta misma situación es posible, aunque en otro sentido, en los materiales sedimentarios del Grupo Peralta, que muestran, en amplios sectores, fondos elevados en elementos en principio no esperables en este tipo de materiales (Cs, p.ej., elemento que se encuentra enriquecido en el entorno de Pueblo Viejo).

Elementos con distribuciones más erráticas, sometidos a más variaciones locales o sin gran correlación con la geología

Es necesario reseñar que las distribuciones espaciales de estos elementos son, de alguna manera engañosas, por cuanto se trata, en general, de elementos con concentraciones muy bajas y, en gran medida, por debajo del límite de detección analítico, por lo que sus pautas de repartición espacial en la parte inferior de su rango de variación no se conocen. Se manifiestan, en general, las anomalías locales en contraste con el límite de detección, por debajo del cual se situarían las variaciones de tipo litológico. A este grupo pertenecen elementos como Ag, con varias manifestaciones o anomalías en las tonalitas o en los materiales del Grupo Peralta, así como otras en relación con mineralizaciones conocidas epitermales o de sulfuros masivos; Au (Fig. 9) con una distribución muy llamativa, en la que además de anomalías más o menos

amplias en relación con mineralizaciones existentes - Pueblo Viejo, sobre todo - aparecen otras anomalías de gran desarrollo superficial, como en los materiales sedimentarios del Grupo Peralta, y pautas con cierto grado de asociación a unidades litológicas - Fm Siete Cabezas, C. Río Verde, Peralvillo, Maimón - o a estructuras lineamentarias, como es el caso de una amplia banda anómala de dirección ENE-OSO, coincidente con un gran accidente de desgarre, visible en la imagen de satélite, y que pasa por Pueblo Viejo. El Be presenta amplias anomalías aisladas, la más significativa de las cuales se sitúa sobre las peridotitas y en el accidente lineamentario mencionado para el Au. Hay que pensar, en este caso, en concentraciones de Be de tipo supergénico, por procesos de adsorción por óxidos de Fe-Mn en ámbitos de meteorización laterítica. El Mo se manifiesta, casi exclusivamente, como signatura de la mineralización de Pueblo Viejo. El Pb (Fig.10) que, además de constituir una gran anomalía en relación con Pueblo Viejo, delimita una serie de amplias zonas anómalas en la Fm Don Juan, en zonas del Grupo Peralta, N de Loma Caribe, en áreas de la tonalita Del Río, algunas de las cuales se sitúan igualmente sobre el accidente ENE-OSO, coincidiendo con anomalías de Be. Esta asociación, típicamente granítica, sugeriría la hipótesis de posibles intrusivos graníticos subflorantes en esta zona de debilidad. Sin embargo, la fuerte correlación de Be con Fe, como se verá más adelante, refuerza la idea de un control supergénico. Bi, Se, Sn, W, forman pequeñas anomalías en relación con Pueblo Viejo -Se,W- o sin relación con mineralizaciones conocidas. El Cd (Fig. 11), además de mostrar un cierto control litológico en relación con las Fm Tireo y Fm Siete Cabezas, presenta diversas anomalías entre las cuales destaca una muy amplia y elongada que corta a las principales estructuras en dirección NE-SO, situada sobre materiales peridotíticos y del C. Duarte, que podrían tener un significado supergénico.

Elementos en los que existe un control geológico al cual se superponen otros factores (mineralización, hidrottermalismo, procesos edáficos etc..)

Entre éstos, que presentan a menudo pautas difíciles de interpretar, por las interferencias de varios controles, se pueden citar los siguientes:

Al, tiene una distribución poco coherente, pero que parece asociarse, al margen de una cierta relación con el magmatismo intrusivo, con la Fm Tireo y las otras unidades de arco isla. El As (Fig. 12), cuyos fondos más elevados se asocian a la Fm Tireo y a todas las unidades de arco-isla, en particular Peralvillo Norte, D. Juan y

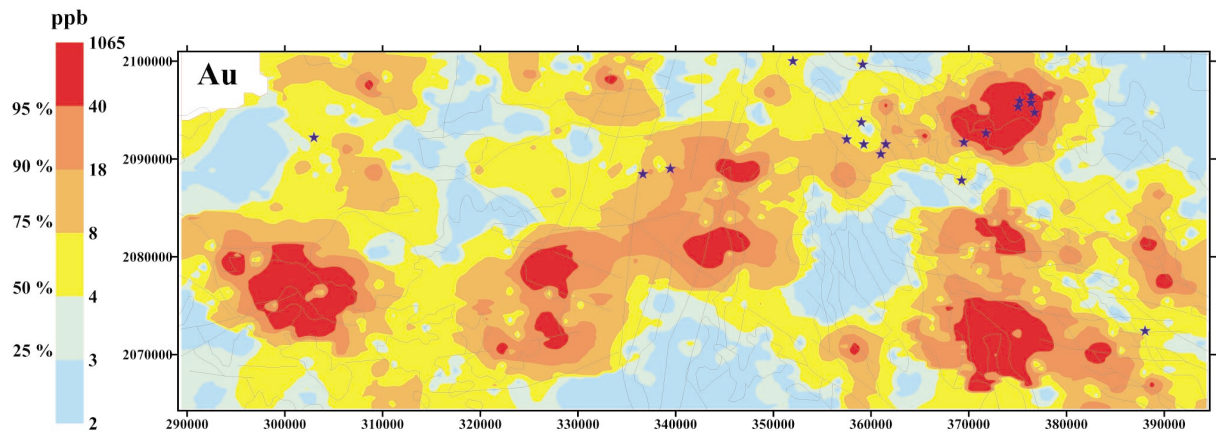


Figura 9. Geoquímica de sedimentos de corriente. Distribución del oro.

Figure 9. Stream sediment geochemistry. Gold distribution.

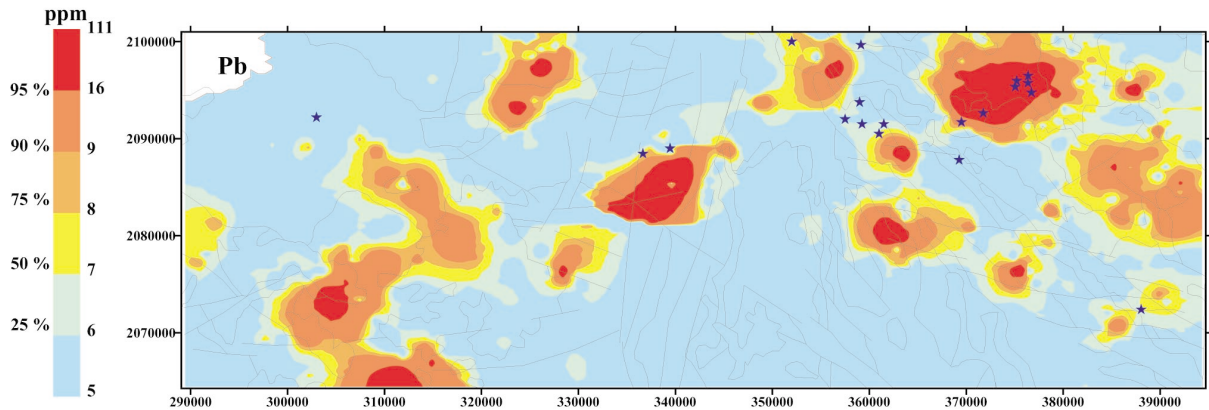


Figura 10. Geoquímica de sedimentos de corriente. Distribución del plomo.

Figure 10. Stream sediment geochemistry. Lead distribution.

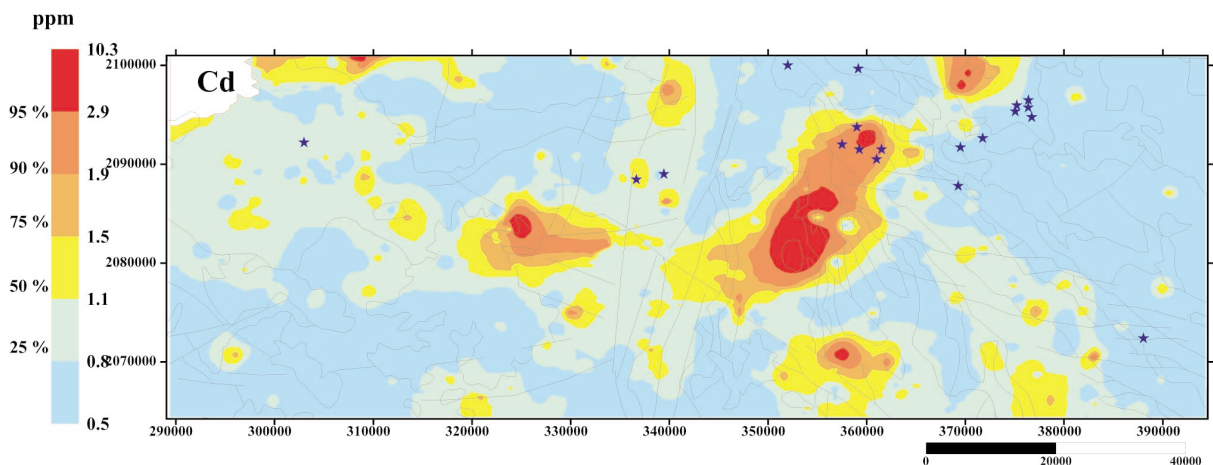


Figura 11. Geoquímica de sedimentos de corriente. Distribución del cadmio.

Figure 11. Stream sediment geochemistry. Cadmium distribution.

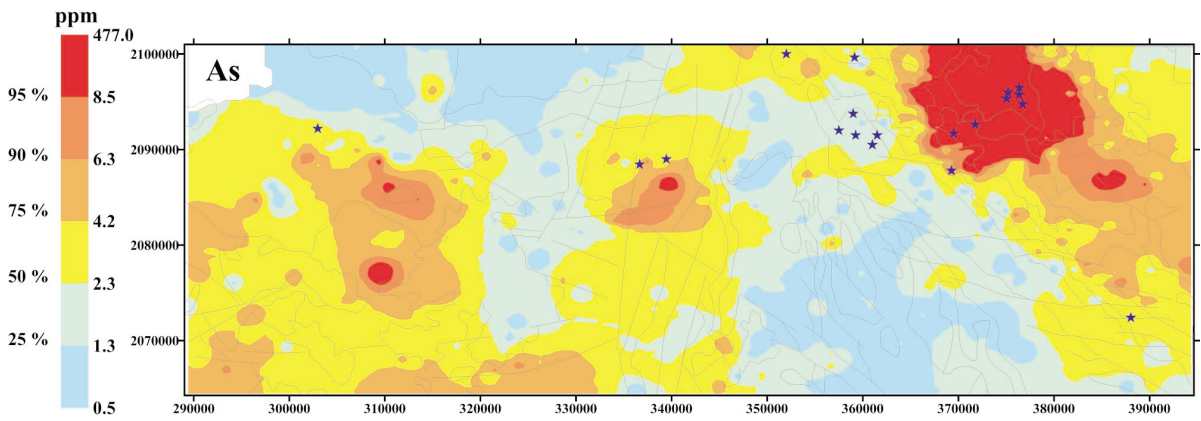


Figura 12. Geoquímica de sedimentos de corriente. Distribución de arsénico.

Figure 12. Stream sediment geochemistry. Arsenic distribution.

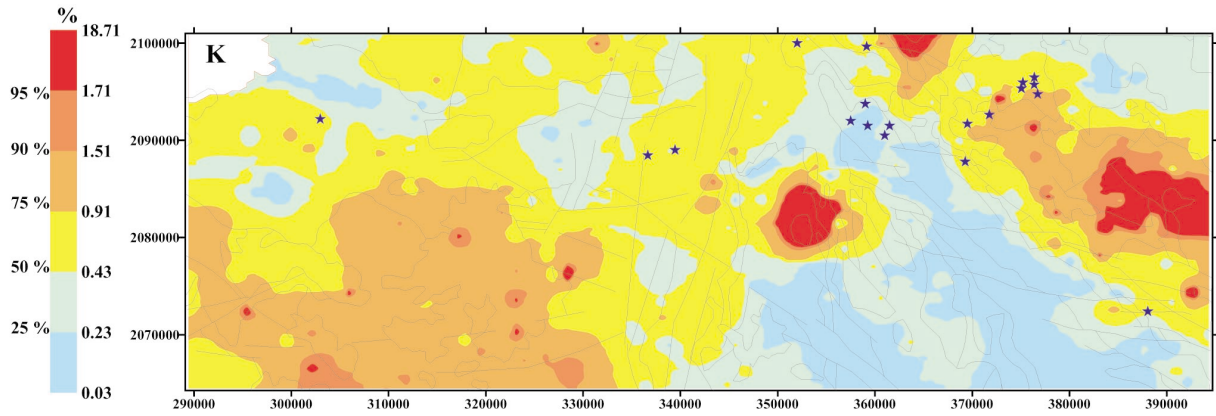


Figura 13. Geoquímica de sedimentos de corriente. Distribución de potasio.

Figure 13. Stream sediment geochemistry. Potassium distribution.

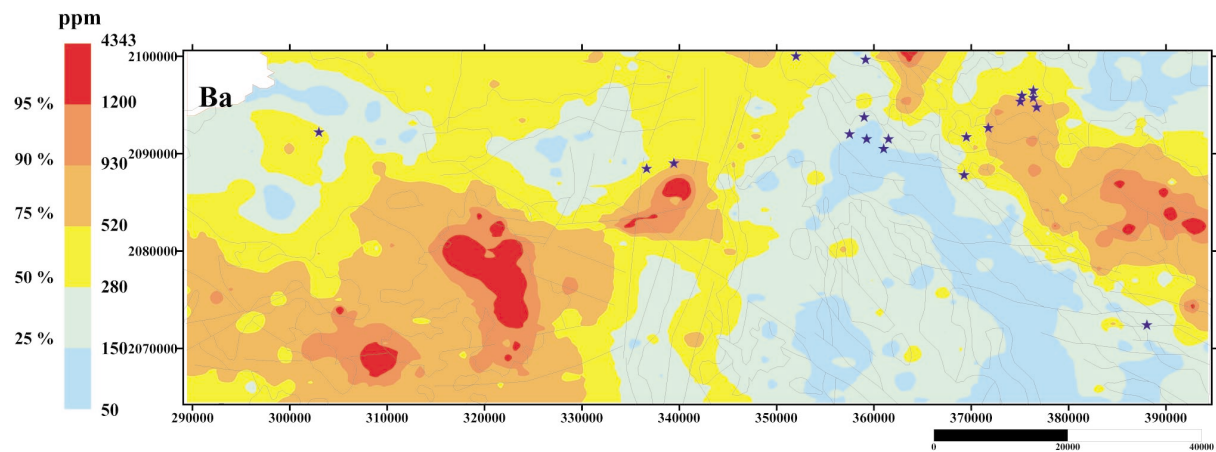


Figura 14. Geoquímica de sedimentos de corriente. Distribución del bario.

Figure 14. Stream sediments geochemistry. Barium distribution.

Los Ranchos (con una gran anomalía de mineralización) y, los más deprimidos, a las unidades oceánicas, Loma Caribe, C. Duarte. El K (Fig. 13), tiene una distribución controlada, en sus fondos más elevados, por el volcanismo cuaternario, los materiales sedimentarios del Grupo Peralta y por las unidades de arco isla del Cretácico, y en los contenidos medios por las tonalitas, por oposición a las unidades peridotíticas, de gabronoritas y el C. Duarte, en las cuales está deprimido. A este factor litológico se superponen procesos más locales de mineralización e hidrotermalismo -procesos epitermales- patentes en el Grupo Peralta, en la Fm Tíreo y en las Fm D. Juan, Peralvillo Norte y gabronoritas. El Ba (Fig. 14) y el Rb, tienen una distribución espacial prácticamente idéntica a la del K, como es de esperar dados los conocidos procesos de sustitución de Rb y Ba por el K en los silicatos potásicos, con la excepción de una importante anomalía de K en las gabronoritas, y de Ba en el Grupo Peralta, sin correlación entre estos tres elementos. El S, a cuya distribución, con claro control litológico, por las rocas del Grupo Peralta y, en sentido negativo, por la Fm Los Ranchos, se sobreimponen importantes anomalías -Pueblo Viejo y Fm Tíreo- y otras más ténues en las Fm Siete Cabezas y C. Río Verde. El Ta, está asociado a litologías tonalíticas pero también a mineralizaciones hidrotermales como Pueblo Viejo. El Zn (Fig. 15), al igual que el Cu, discrimina claramente a la Fm Tíreo de las otras unidades, aunque a esta pauta se superpone un control metalogénico y/o litológico, de alcance más local, que se expresa por numerosas anomalías, de mayor o menor amplitud, asociadas a pequeños stocks tonalíticos o granodioríticos (contrastando con fondos muy bajos en los grandes afloramientos de tonalitas) y a la mineralización de Pueblo Viejo.

Estudio estadístico bivalente

Para conocer las relaciones o dependencias entre elementos, tomados de dos en dos, se ha elaborado una tabla de coeficientes de correlación. En ella pueden apreciarse varios rasgos significativos. Destacan las fuertes correlaciones positivas entre los siguientes elementos:

- Los elementos del grupo de las Tierras Raras (Ce, La, Eu, Lu, Nd, Tb, Sm, Yb, Y) y el Hf y Th están muy correlacionados entre ellos, aunque destacan los pares Ce-La y Lu-Yb o Lu-Nd, siendo las correlaciones de Eu e Y con los demás elementos del grupo algo más débiles. La mayor parte de ellos muestra un cierto grado de correlación con Na, Rb y K. Son correlaciones de origen litológico (rocas intrusivas intermedias o ácidas, vulcanitas ácidas).

- El Al muestra correlaciones con la mayor parte de los elementos anteriores pero siempre débiles ($<0,5$). En general, el grado de correlación de este elemento con otros no alcanza nunca valores destacados (Na, Rb, K,...).

- Son significativas y coherentes los fuertes coeficientes de correlación entre Ni, Cr y Co, así como entre Fe-Sc-Mg-V. Las existentes entre elementos de los dos grupos, aunque apreciables, son más ténues. Llama la atención la fuerte relación entre Be y Cr-Ni-Co, mientras que las de Be con elementos "graníticos" como Al, Rb, Na, K es débil o negativa.

- Son asimismo significativas las de Rb con Ba y Cs, mayores incluso que la existente con K. Cu, Pb, Zn, Au. Existen correlaciones débiles con otros elementos, aunque son significativas las de Pb-S, Zn-Cu, Zn-Cd, S-Sb.

Tratamiento estadístico multivariante

Análisis de componentes principales

El objetivo del análisis multivariante es reducir la dimensionalidad del gran volumen de información introducido por cerca de 50 variables geoquímicas en 684 muestras a un número más reducido de variables, que sintetizan el comportamiento de los elementos y las relaciones internas que subyacen entre ellos. La técnica de análisis multivariante utilizada es la del análisis de componentes principales (ACP), muy empleada y adecuada a las características de la información geoquímica multielemental. Se ha efectuado el ACP sobre aquellas variables que tienen un grado de variabilidad apreciable (excluyéndose aquellas con muchos valores por debajo del límite de detección) y que muestran un grado de correlación significativo con las restantes variables. En definitiva, se han incluido y tratado 42 variables o elementos químicos. Se han extraído 7 factores tras un proceso de rotación del espacio factorial por el método Varimax normalizado, cuyos resultados están expresados en el cuadro adjunto (Tabla 1).

Consignando, entre paréntesis, las variables cuyo peso es inferior a 0,5, pero considerándose significativos aquellos pesos factoriales comprendidos entre 0,25 y 0,5, el sentido y estructura de los factores extraídos es el que se muestra en la Tabla 1.

Los siete factores extraídos explican en conjunto el 62,2 % de la variabilidad de la información geoquímica y todos los factores representan, cada uno, más del 5%.

Tabla 1. Pesos factoriales del Análisis de Componentes Principales. Factores extraídos con rotación Varimax normalizada.

Table 1. Factorial loads from Principal Components Analysis. Factor extraction with normalized Varimax method.

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6	Factor 7
Al	0,186	0,358	0,062	-0,037	0,249	0,575	-0,162
As	-0,123	0,026	-0,031	0,886	0,036	-0,019	-0,141
Au	0,048	0,044	0,057	0,345	0,001	0,037	0,104
Ba	0,499	-0,121	-0,145	0,115	0,076	0,064	-0,639
Be	-0,043	0,045	0,068	0,014	-0,676	0,022	0,006
Br	0,045	0,007	0,126	-0,009	-0,234	0,276	-0,122
Ca	0,35	-0,339	-0,364	0,074	0,066	0,068	0,293
Cd	-0,041	-0,196	0,52	0,055	-0,241	-0,038	0,013
Ce	0,913	0,076	0,015	0,008	0,033	-0,131	-0,187
Co	-0,161	-0,067	0,219	-0,061	-0,899	0,072	0,159
Cr	-0,089	-0,071	0,045	-0,012	-0,888	-0,083	0,065
Cs	0,137	-0,122	-0,246	0,213	-0,048	0	-0,393
Cu	-0,04	0,03	0,229	0,094	0,071	0,533	0,035
Eu	0,736	0,402	0,027	-0,012	0,057	0,342	0,003
Fe	-0,101	-0,191	0,807	-0,015	-0,257	-0,039	0,241
Hf	0,281	0,363	0,191	0,01	0,102	-0,609	0,058
K	0,181	-0,071	0,113	-0,04	0,087	0,037	-0,631
La	0,922	-0,036	-0,064	0,036	0,071	-0,191	-0,169
Lu	0,021	0,894	0,008	0,011	0,076	-0,241	0,013
Mg	0,115	-0,398	0,011	-0,017	-0,422	0,127	0,533
Mn	-0,108	0,175	0,634	-0,129	-0,255	0,13	-0,101
Na	0,375	0,339	-0,313	-0,168	0,201	0,085	-0,088
Nd	0,898	0,067	-0,022	0,012	0,05	-0,085	-0,088
Ni	-0,084	-0,095	0,03	-0,01	-0,922	-0,084	0,047
P	0,526	-0,082	-0,062	-0,027	0,054	0,25	-0,575
Pb	-0,008	-0,052	0,026	0,515	-0,062	-0,011	-0,288
Rb	0,295	-0,061	-0,172	-0,051	0,028	0,078	-0,732
S	0,133	-0,203	-0,214	0,759	0,052	0,124	0,029
Sb	-0,086	0,02	-0,028	0,89	0,029	-0,016	-0,075
Sc	-0,103	-0,048	0,431	0,005	-0,075	0,386	0,607
Sm	0,874	0,344	-0,018	0,018	0,102	0,096	-0,046
Sr	0,698	-0,25	-0,241	-0,025	0,066	0,062	-0,303
Ta	0,315	0,17	0,392	0,043	0,065	-0,263	0,012
Tb	0,226	0,537	0,021	0,014	-0,044	0,089	0,181
Th	0,751	0,016	-0,038	0,039	0,062	-0,368	-0,317
Ti	0,106	0,212	0,671	0,022	0,073	0,234	0,085
U	0,436	0,277	0,07	0,049	-0,003	-0,536	-0,196
V	-0,119	-0,18	0,785	-0,025	0,099	0,055	0,258
W	0,053	0,041	0,049	0,474	0,022	-0,071	0,109
Y	0,041	0,79	-0,229	-0,089	0,042	0,292	0,105
Yb	0,036	0,905	0,009	0,031	0,076	-0,189	0,015
Zn	-0,091	-0,126	0,384	0,336	-0,088	0,252	-0,122
Expl.Var	6,401	3,955	3,577	3,026	3,554	2,367	3,289
Prop.total	0,152	0,094	0,085	0,072	0,085	0,056	0,078

Se ha representado la distribución de los factores score derivados del análisis de componentes principales por el método de mallado (mallas obtenidas por interpolación por el método de inverso de la distancia al cuadrado) y contornos, con parámetros similares a los utilizados anteriormente. De sus pautas de distribución espacial y de la naturaleza de sus asociaciones elementales pueden deducirse los siguientes significados de las asociaciones factoriales :

Factor 1: La-Ce-Nd-Sm-Th-Eu-Sr-P-(Ba-U-Na-Ca-Ta-Rb-Hf-Tb-Al-K).

Explica el 15,24% de la varianza total.

Esta asociación (Fig.16), formada por elementos del grupo de tierras raras ligeras y elementos afines de tipo petrogenético, así como por elementos mayores (Na, K, Al.), muestra una distribución que se ajusta, con bastante precisión, a los afloramientos de vulcanitas cuaternarias (con la mayor intensidad), de tonalitas-granoritas, y de rocas sedimentarias del grupo Peralta. Asimismo se delimitan, aunque de forma más tenue las tonalitas foliadas. Es un factor de carácter litológico.

Factor 2 : Yb-Lu-Y-Tb-(Eu-Al-Hf-Sm-Na-U-Ti).

Explica el 9,42% de la varianza total.

Asociación constituida básicamente por las tierras raras más pesadas. Su distribución (Fig. 17) matiza a la del factor 1 y la complementa. También tiene afinidad por el magmatismo intermedio-ácido de arco isla, pero excluye a algunos tipos de éste. Se ajusta a los afloramientos de tonalitas-granodioritas (aunque no en forma global, sino a zonas dentro de ellas, indicando quizás una diferenciación de facies con diferente composición) y excluye claramente al vulcanismo cuaternario y a las gabronoritas. A diferencia del anterior, se define una relación con la Fm Siete Cabezas, Complejo Río Verde, Fm Peralvillo Sur, Fm Maimón, Fm Don Juan y Fm Los Ranchos, ya sea por la propia naturaleza del magmatismo que conforma sus materiales o por la presencia aflorante o subflorante de pequeños intrusivos de naturaleza intermedia-ácida. La discriminación de estos dos factores, ya vislumbrada al analizar las distribuciones de los elementos químicos que las componen o las correlaciones entre ellos, obedece sin duda a las diferentes características químicas de los elementos del grupo de las Tierras Raras. Éstas, con rasgos geoquímicos globales bastante semejantes, alta movilidad en el medio primario, baja movilidad en el supergénico, carácter litófilo y afinidad granítica,

muestran sin embargo pequeñas diferencias debidas a las diferencias de radio iónico. Así, suelen diferenciarse las tierras raras ligeras (Ce-La-Nd-Sm), con mayor radio iónico, de las pesadas (Lu-Y-Yb-Tb) con menor radio, siendo el Eu un caso intermedio. Por ello, aunque apareciendo en general todas asociadas, existe una tendencia a una diferente distribución o ubicación en los minerales que se forman a lo largo de los procesos de cristalización magmática. Estas diferencias pueden acentuarse en función de pequeñas diferencias del quimismo magmático. En este caso se aprecia bien el diferente comportamiento y asociación a diferentes episodios ígneos.

Factor 3: Fe-Ti-V-Mn-Cd-(Se-Zn-Ta-Cu-Co).

Explica el 8,52% de la varianza total.

Asociación formada por elementos afines geoquímicamente, del grupo ferromagnesiano y accesoriamente por elementos más típicos componentes de mineralización. Este factor (Fig. 18) discrimina positivamente al afloramiento de gabronoritas, y con algo menos de claridad, a una parte de la intrusión tonalítica del N de Constantza (facies más básica y la más occidental) y a la Fm Siete Cabezas (basaltos). La Fm Tireo en su conjunto, las formaciones Peralvillo Sur y Maimón, muestran también la expresión atenuada de este factor, discriminándose en cambio negativamente las formaciones sedimentarias del grupo Peralta. La asociación de elementos como Zn, Co y, quizás, Cd, puede estar, en parte, causada por fenómenos de coprecipitación y adsorción por hidróxidos de Fe y Mn.

Factor de carácter litológico, con influencia de una componente supergénica.

Factor 4: Sb-As-S-Pb-(W-Au-Zn-Cs).

Explica el 7,21% de la varianza total.

La estructura de la asociación sugiere que se trata de un factor de mineralización, dada la naturaleza de los elementos que lo componen. Muestra una distribución (Fig.19) más dispersa y atomizada, sin una relación clara con la estructura litológica-estratigráfica. Destacan tres áreas amplias y con significación de este factor, que corresponden a la anomalía asociada a la mineralización de Pueblo Viejo, a una zona comprendida entre el afloramiento de vulcanismo cuaternario y el batolito del Río (Fm Tireo) y a la zona entre la intrusión de la Jautía y la del Río (Fm Tireo). Otras áreas más pequeñas aparecen en la Fm Duarte, en las de Siete Cabezas, Peralvillo Sur y Maimón.

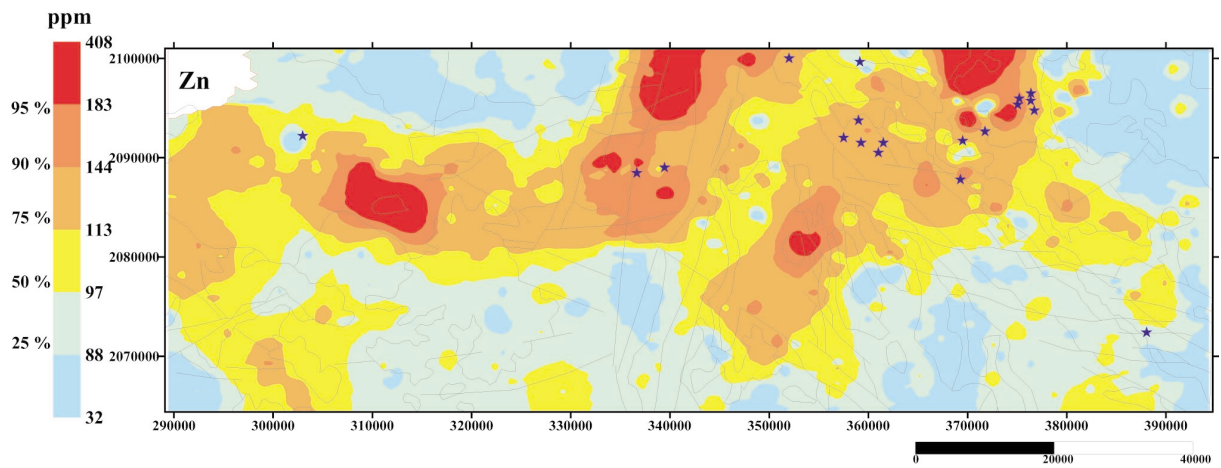


Figura 15. Geoquímica de sedimentos de corriente. Distribución del cinc.

Figure 15. Stream sediments geochemistry. Zinc distribution.

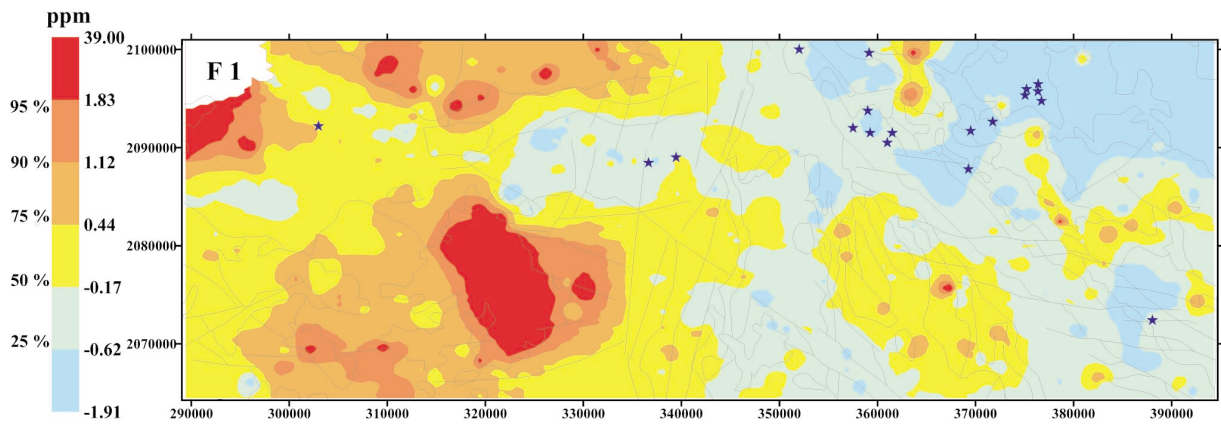


Figura 16. Geoquímica de sedimentos de corriente. Distribución del factor 1. F 1 : La-Ce-Nd-Sm-Th-Eu-Sr-P-(Ba-U-Na-Ta-Rb-Hf)

Figure 16. Stream sediments geochemistry. Factor 1 distribution. F 1 : La-Ce-Nd-Sm-Th-Eu-Sr-P-(Ba-U-Na-Ta-Rb-Hf)

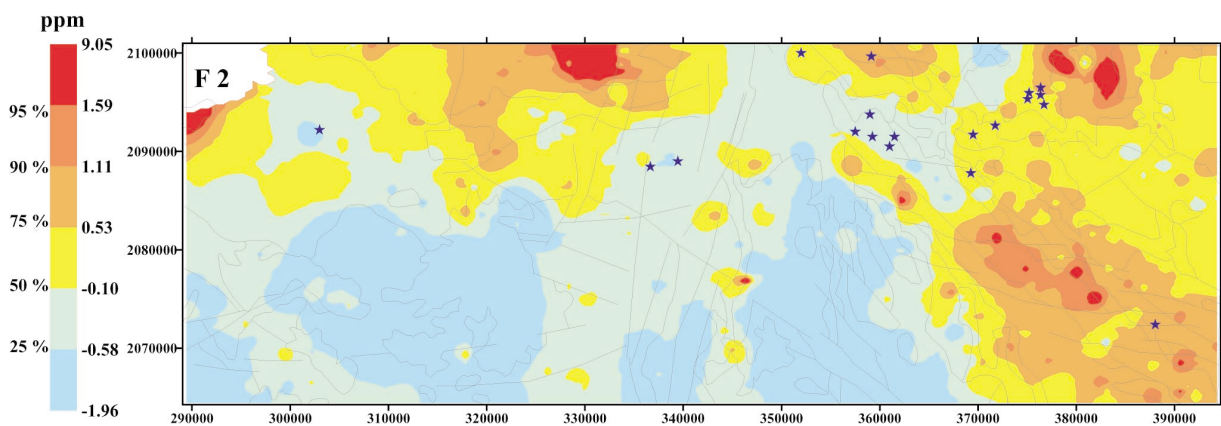


Figura 17. Geoquímica de sedimentos de corriente. Distribución del factor 2. F 2 : Yb-Lu-Y-Tb-(Eu-Al-Hf-Sm-Na-U)

Figure 17. Stream sediments geochemistry. Factor 2 distribution. F 2 : Yb-Lu-Y-Tb-(Eu-Al-Hf-Sm-Na-U)

Factor 5 (negativo): Ni-Co-Cr-Be-(Mg-Mn-Fe-Cd-Br)
Explica el 8,46% de la varianza total.

Su estructura y composición señalan una naturaleza litológica para este factor. Con una composición muy coherente y definida, tiene, asimismo, una distribución (Fig.20) muy coherente y ajustada al afloramiento de rocas ultrabásicas, más o menos serpentinizadas, de la Fm Loma Caribe. Se observan algunas pequeñas manchas (vulcanismo cuaternario, Fm Duarte, Fm Maimón) que pueden corresponder a diferenciaciones básicas y a enriquecimientos locales en elementos como Ni, Co, Fe, Cr. Este factor tiene, en gran parte, un significado litológico, pero tiene también una componente de tipo supergénico, que explica localmente la asociación de Fe-Mn y Be-Cd, probablemente adsorbidos y coprecipitados con hidróxidos de Fe-Mn.

Factor 6: Al-Cu (Sc-Eu-Br-P-Y-Zn-Ti)
Explica el 5,63% de la varianza total.

Su composición es algo ambigua desde un punto de vista geoquímico. Se ajusta, en su distribución espacial (Fig.21), a la Fm Tiro y a las formaciones Siete Cabezas, C. Río Verde y Peralvillo Sur y Maimón. Se discrimina el batolito de El Río (tonalitas) y la Fm Los Ranchos por su antagonismo a este factor.

Factor 6 (negativo): Hf-U-(Th-Ta)
Explica el 5,63% de la varianza total.

Su composición parece ser de tipo litológico. Su distribución presenta la imagen negativa y antitética de la anterior. Define al batolito de El Río (aunque en forma irregular), a las noritas y a la Fm Duarte con las tonalitas foliadas, y a la Fm Los Ranchos. Es un factor litológico.

Factor 7 (negativo): Rb-K-Ba-P-(Cs-Th-Sr-Pb-Ce-Al)
Explica el 7,83% de la varianza total.

Parece una asociación con significado litológico.

Su distribución (Fig. 22) describe probablemente a manifestaciones ígneas intrusivas o volcánicas de carácter ácido, apareciendo fundamentalmente asociado a las formaciones Maimón (por su propia litología o los intrusivos que contiene), Peralvillo Norte, Don Juan y Los Ranchos. Asimismo, se delimitan bien los materiales sedimentarios más recientes del SO de la zona.

Clasificación de la población muestral

Se han mencionado previamente dos rasgos que condicionan la definición de anomalías, que es uno de los fi-

nes de este estudio. En primer lugar, la baja densidad de muestreo, la gran capacidad de arrastre de los cauces desmuestreados y la gran movilidad y dispersión en ámbitos morfoclimáticos como el existente en la zona. Ello se traduce en una dispersión amplia (mecánica y química) y en una desviación de la distribución de los elementos con respecto a los límites de las unidades litológicas, en cuya proximidad las muestras de sedimentos representan mezclas en proporciones variables de materiales provenientes de unidades litológicas diferentes. En segundo lugar la complejidad litológica de las formaciones cartografiadas, que suelen contener diversos tipos de rocas con diferente quimismo. Esta heterogeneidad geoquímica primaria hace más difícil correlacionar las características geoquímicas primarias y secundarias a una escala que no sea de detalle.

Por todo ello, y para establecer y definir los umbrales de anomalías geoquímicas que van a conducir a la delimitación de áreas anómalas prospectivas, no es, a veces, válida la clasificación puramente litológica a partir del mapa geológico. En estas situaciones parece más lógico proceder a una clasificación de la población muestral basada en las características geoquímicas de las muestras, definiendo clases geoquímicas homogéneas, con la mayor significación geológica posible, en las que marcar umbrales y anomalías. Estas clases, además de tener una significación geológica, deben tener fondos geoquímicos contrastados, pues en caso contrario desaparece la utilidad de la clasificación. Las anomalías así definidas están referidas a su medio geoquímico real y no a dominios geológicos de significación geoquímica a veces dudosa.

La clasificación se ha efectuado por la técnica multivariante de análisis de conglomerados ("cluster analysis"). Se ha realizado por un proceso no jerárquico, con el objeto de hacer una única partición del grupo en k grupos, por la variante de reasignación. El algoritmo empleado se denomina método de "K-means" o método del centroide. Se establece previamente el número de grupos o clases a constituir. Se ha disociado el grupo total en 4 clases geoquímicas a partir de la matriz de los factores score deducida del ACP, teniendo en cuenta que los factores sintetizan ya la información geoquímica global. Se han elegido los factores 1-2-3-5-6-7 (eliminando el factor 4 por no ser estrictamente litológico).

En la figura 23 está representada la ubicación de las muestras con expresión de la pertenencia a su clase geoquímica. La representación de las clases geoquímicas sobre la base geológica permite observar que aunque sus miembros no presentan una clasificación o separación

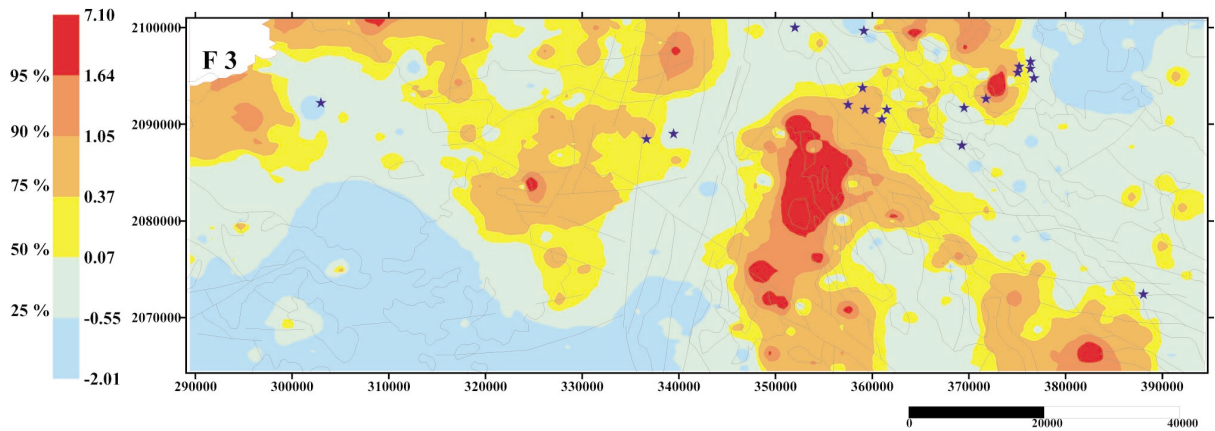


Figura 18. Geoquímica de sedimentos de corriente. Distribución del factor 3. F 3 : Fe-Ti-V-Mn-Cd-(Sc-Zn-Ta-Cu-Co)

Figure 18. Stream sediments geochemistry. Factor 3 distribution. F 3 : Fe-Ti-V-Mn-Cd-(Sc-Zn-Ta-Cu-Co)

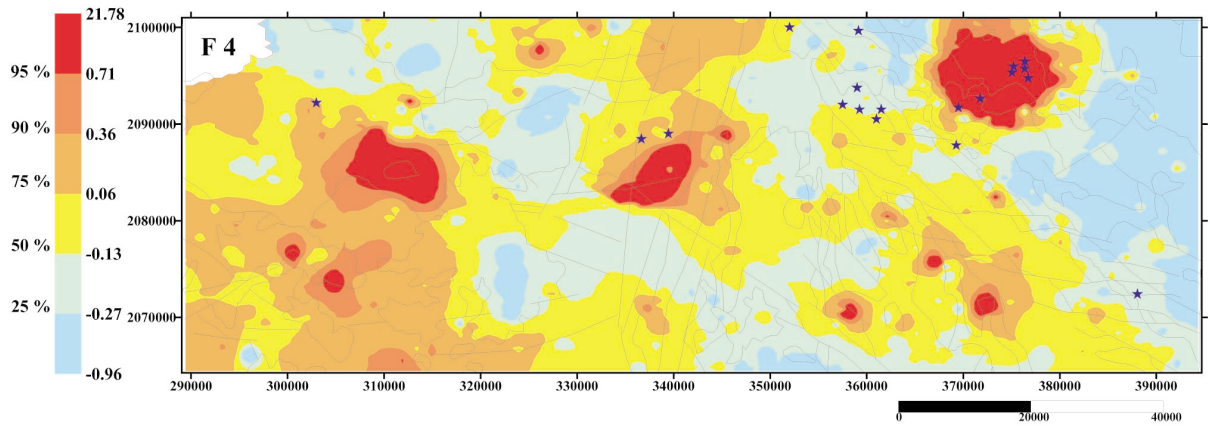


Figura 19. Geoquímica de sedimentos de corriente. Distribución del factor 4. F 4 : Sb-As-S-Pb-(W-Au-Zn-Cs)

Figure 19. Stream sediments geochemistry. Factor 4 distribution. F 4 : Sb-As-S-Pb-(W-Au-Zn-Cs)

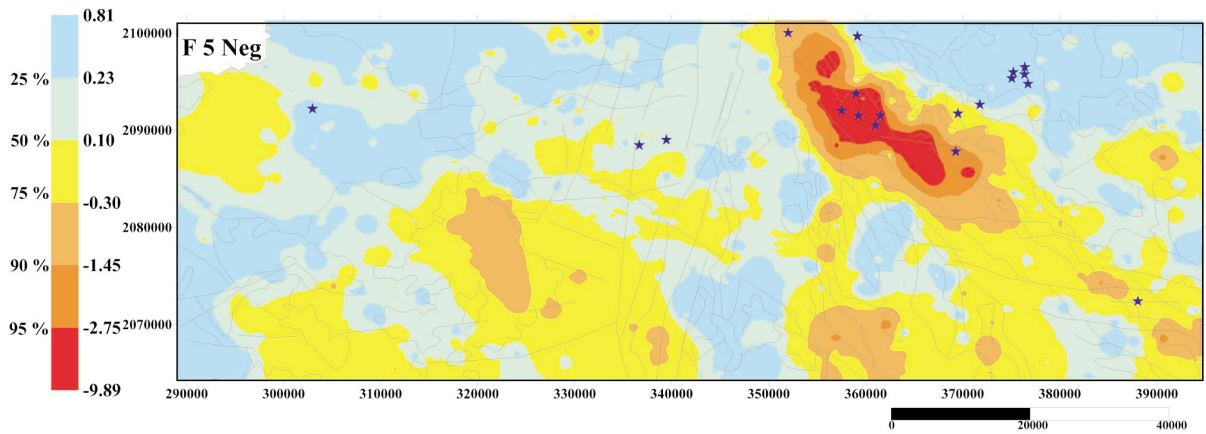


Figura 20. Geoquímica de sedimentos de corriente. Distribución del factor 5 (negativo) F 5 (neg.) : Ni-Co-Cr-Be-(Mg-Mn-Fe-Br)

Figure 20. Stream sediments geochemistry. Factor 5 (negative) distribution. F 5 (neg.) : Ni-Co-Cr-Be-(Mg-Mn-Fe-Br)

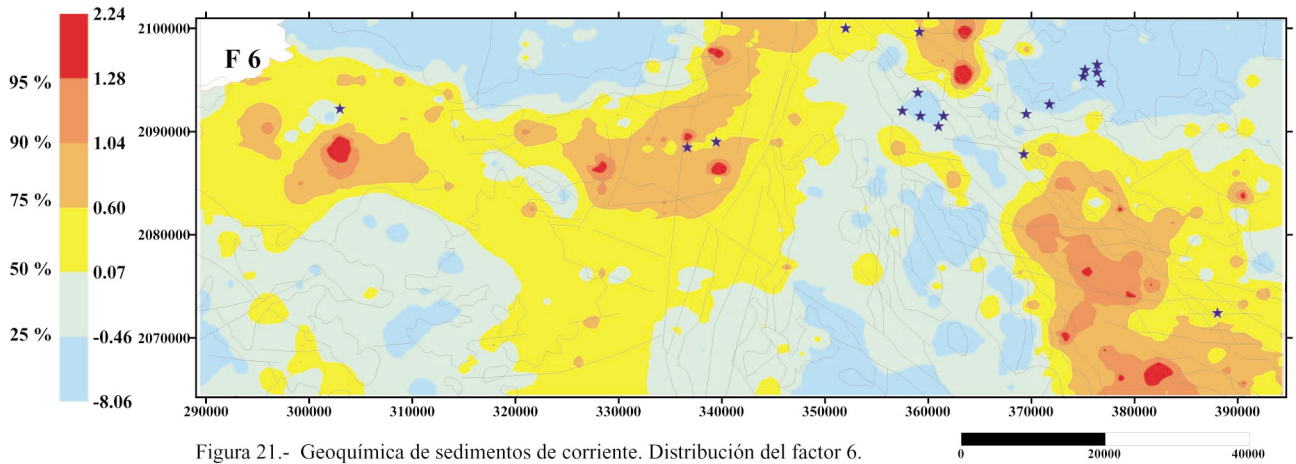


Figura 21.- Geoquímica de sedimentos de corriente. Distribución del factor 6.
F 6 : Al-Cu-(P-Sc-Y-Zn)

Figure 21.- Stream sediments geochemistry. Factor 6 distribution.
F 6 : Al-Cu-(P-Sc-Y-Zn)

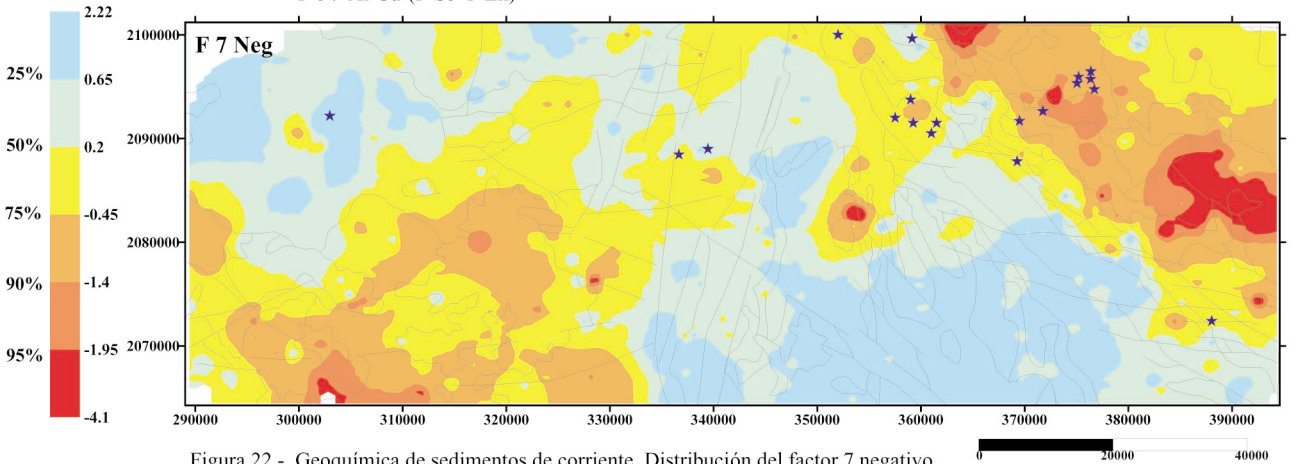


Figura 22.- Geoquímica de sedimentos de corriente. Distribución del factor 7 negativo.
F 7 (neg.) : Rb-K-Ba -P-(Cs-Pb-Sr-Th)

Figure 22.- Stream sediments geochemistry. Factor 7 (neg.) distribution.
F 7 (neg.) : Rb-K-Ba-P-(Cs-Pb-Sr-Th)

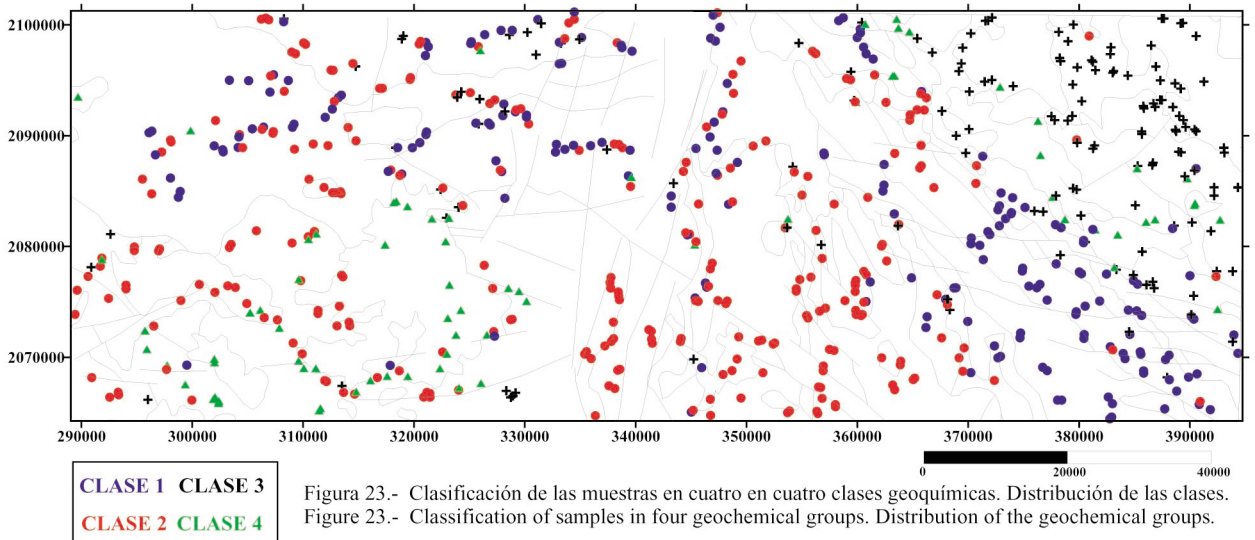


Figura 23.- Clasificación de las muestras en cuatro en cuatro clases geoquímicas. Distribución de las clases.
Figure 23.- Classification of samples in four geochemical groups. Distribution of the geochemical groups.

espacial estricta, al aparecer muestras de las distintas clases mezcladas y juntas en un mismo espacio geográfico, sí que se aprecian zonalidades en su repartición. Esta zonalidad adquiere un sentido al superponerla a las estructuras geológicas.

Puede apreciarse que:

- La clase 1 se ubica fundamentalmente en la Fm Tireo, en la mitad oriental del batolito tonalítico de El Río, en las tonalitas foliadas y, con mayor coherencia, en la Fm Siete Cabezas, en el Complejo Río Verde, en la Fm Peralvillo Sur. Esta clase agrupa litologías geoquímicamente semejantes.

- La clase 2, quizás la más ubícua, aparece en la mitad occidental de las tonalitas (Batolito de El Río), en un sector de la Fm Tireo, en las gabronoritas, en el Complejo Duarte y las tonalitas foliadas, y en la Fm Loma Caribe. También lo hace en las formaciones sedimentarias del grupo Peralta.

- La clase 3 tiene una mayor personalidad, apareciendo fundamentalmente en las formaciones del Cretácico Inferior (Maimón, Peralvillo Norte y, sobre todo, Los Ranchos). Es de resaltar la homogeneidad y coherencia de este dominio que, aunque intuida en anteriores tratamientos, se pone ahora más claramente de manifiesto. Hay que resaltar la existencia de una agrupación de muestras, muy cohesionadas espacialmente, al SE del afloramiento de vulcanismo cuaternario, y de otra en el batolito del El Río, con la misma signatura geoquímica.

- La clase 4 tiene, asimismo, una gran y clara coherencia espacial con el vulcanismo cuaternario y, localmente, con sectores de la Fm Maimón y Peralvillo Norte.

En síntesis, parece deducirse una aceptable y homogeneidad geoquímica en las formaciones del Cretácico Inferior (Los Ranchos, Maimón y Peralvillo Norte), ocupadas por la clase 3, y en las vulcanitas cuaternarias y la Fm Maimón, asimilables a la clase 4. La Fm Maimón parece contener materiales geoquímicamente contrastados pertenecientes a dos clases. La Fm Loma Caribe, el Complejo Duarte y las noritas forman también un dominio coherente, que integra un amplio espectro geoquímico de naturaleza básica-ultrabásica. Las formaciones del Cretácico Superior (Siete Cabezas, Peralvillo Sur) son asimismo muy homogéneas (clase 1). Son, sin embargo, más heterogéneas las litologías del batolito del Río (pro-

bles zonaciones del intrusivo) y de la Fm Tireo (afinidades básicas y ácidas, presencia de una gran y dispersa actividad hidrotermal).

Todo ello conduce a la definición de una serie de clases geoquímicas que, con mayor o menor grado de homogeneidad, dan una aproximación a los dominios geoquímicos básicos de la zona. Estos dominios sirven para estimar los fondos geoquímicos en el área y valorar su variabilidad, así como para marcar los umbrales de anomalía de los elementos de mineralización e indicadores. Los fondos o backgrounds pueden ser determinados como un rango de variación normal (rango entre los percentiles 5% y 95%, p.ej. o como un estimador central, de los cuales el más robusto y fiable es la mediana (percentil del 50%).

En la figura nº 24 se representan, en forma de diagramas de cajas, los principales rasgos de las distribuciones en cada clase geoquímica, concretamente las medianas (expresión robusta del fondo) y la dispersión de los elementos mayores y de algunos elementos traza. Puede asimismo comprobarse en ellos que las clases definidas están geoquímicamente contrastadas. Los fondos más elevados en Al y elementos alcalinos (K, Na) aparecen en el grupo 4, los de Ca y Mg son más elevados en la 2, los de Fe y Ti, son más elevados en la 1, siendo los de la mayoría de los elementos (salvo As y Pb) más bajos en la clase 3 (clase más despersonalizada).

CONSIDERACIONES SOBRE LAS SIGNATURAS GEOQUÍMICAS DE LAS UNIDADES EN LOS SEDI- MENTOS Y LA PETROGÉNESIS

La similitud con la cual los datos geoquímicos obtenidos de medios de muestreo como suelos o sedimentos reflejan las características geoquímicas de las rocas de origen es función de los rasgos morfoclimáticos del área, que condicionan la migración y eliminación de algunos elementos. Plant y Tarney (1994) analizan las características de las dispersiones en diferentes medios y señala que, para algunos de ellos, las dispersiones químicas no son excesivamente distorsionantes de las signaturas geoquímicas de las rocas primarias. Ello implica que, en esos casos, pueden utilizarse los datos geoquímicos multielementales para caracterizar, con cierta aproximación, las signaturas geoquímicas de unidades geológicas y mineralizaciones. A los problemas de inexactitud que se pueden presentar para algunos elementos por cuestiones de dispersiones químicas importantes (contenidos más bajos en los suelos o sedimentos) o de efectos de concentración en ellos (contenidos más elevados)

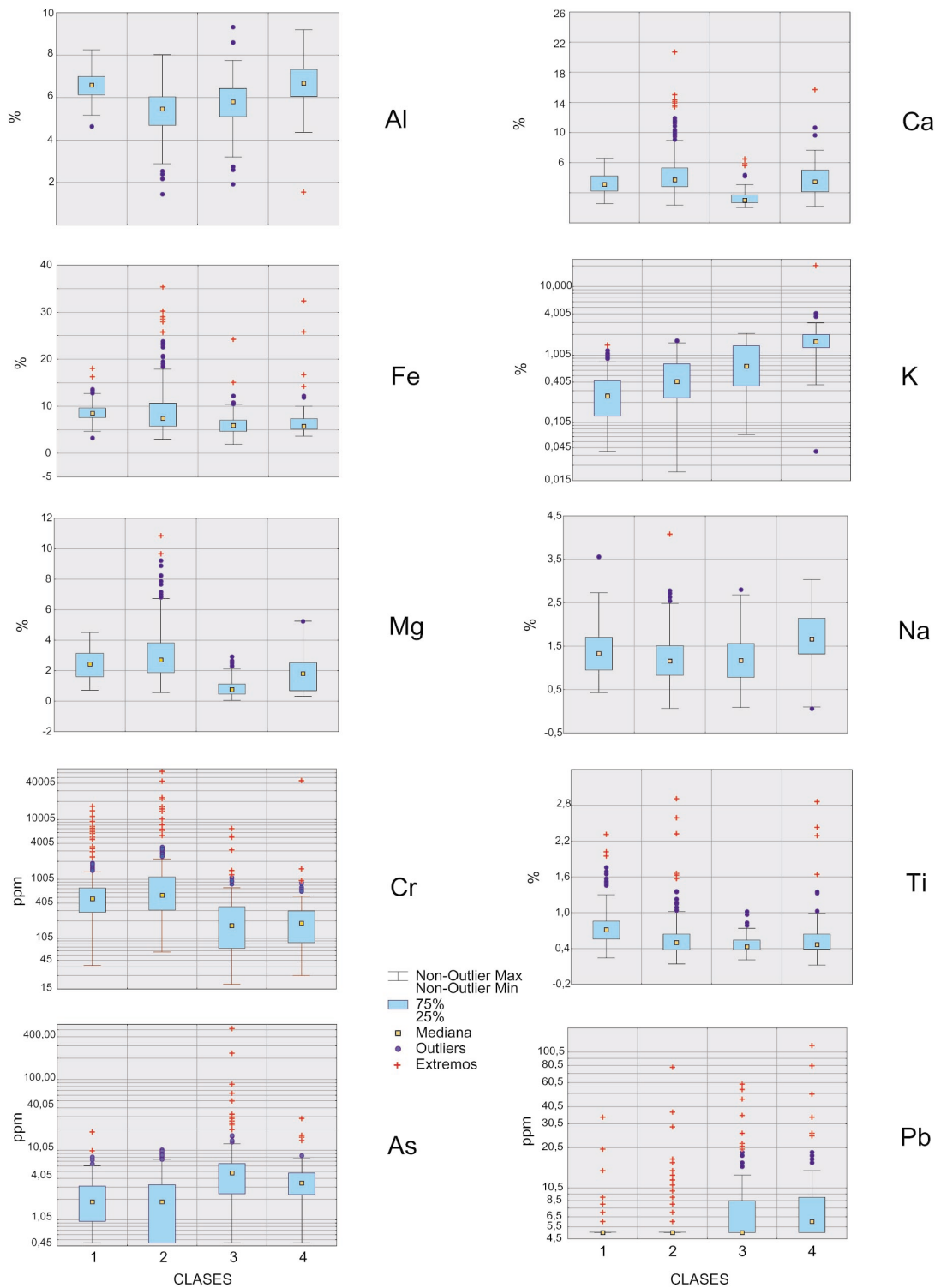


Figura 24. Diagramas de cajas de elementos mayores y algunos elementos traza por clases geoquímicas.

Figure 24. Plots of major elements and of some trace elements according to geochemical groups.

oponen ventajas como son el elevado número de análisis de que se dispone y el efecto de promedio de un área amplia que supone la muestra de sedimentos. En el caso de la zona de estudio, el análisis de los mapas de tendencias confirma que, en general, existe una buena correspondencia cualitativa entre geoquímica de sedimentos y litologías.

Se han elaborado, para avanzar más en la comprensión de la signatura geoquímica de las unidades ígneas, una serie de diagramas Spider de elementos de Tierras Raras, de elementos incompatibles y de otros elementos traza normalizados con respecto a los contenidos en condritos (C.1). Para ello, se han seleccionado muestras situadas lo más alejadas posible de los bordes de recintos geológicos, evitándose tomar como representativas de la unidad muestras pertenecientes a distintas clases geoquímicas (clase mayoritaria). En las figuras nº 25 a 33 se observan los siguientes hechos:

- Las unidades con mayor afinidad oceánica (Peridotitas, Fm Siete Cabezas, C. Río Verde, Fm Peralvillo Sur) no muestran una depresión en las tierras raras y algunos de los elementos incompatibles, aunque sí que pueden diferenciarse las curvas de estos elementos con respecto a las de otras unidades como C. Duarte, Maimón y, sobre todo, Peralvillo Norte, Tireo, Los Ranchos, tonalitas s.l. y el volcanismo cuaternario, que evidencian ya un mayor fraccionamiento. Las peridotitas y la corteza oceánica (y en menor medida el C. Duarte) muestran unas tendencias que se podrían asimilar con las de un MORB de tipo E (algo enriquecido en T.R.), como señalan Plant y Tarney (1994) y Plant et al. (1990). Las formaciones volcánicas de arco isla oceánico muestran espectros muy similares, aunque, en ciertos casos, presentan fenómenos de fraccionamiento o mezcla evidentes. Destacan la Fm Peralvillo Norte, las tonalitas y el volcanismo cuaternario que representan un magmatismo más tardío. La Fm Peralvillo Norte muestra evidentes enriquecimientos en elementos como Ba, Pb, U, Sr, K y empobrecimientos en Ni y Cr (¿incorporación, aunque sea a pequeña escala, de material continental?). Estas tendencias son comunes a las granodioritas, al volcanismo cuaternario y a la Fm Los Ranchos.

- Los distintos tipos de intrusivos presentan también claras diferencias en algunos casos, que indican diferentes grados de evolución aunque no de origen. Así, puede verse (Fig. 26) un mayor fraccionamiento en T.R. ligeras en la tonalita de El Río con respecto a las demás, y unos enriquecimientos pequeños de la de Zambrana, de la de El Río y del volcanismo cuaternario en elementos como Ba, U, Th y depresiones en Cr y Ni (Fig. 29 y 32).

- Los materiales volcánicos de la Fm Los Ranchos presentan también diferencias según estén en la aureola del yacimiento de Pueblo Viejo, afectados por procesos hidrotermales evidentes, o más alejados de él. (Fig. 27, 30 y 33). La zona de influencia presenta mayores contenidos en K, Pb, U, Th y concentraciones deprimidas en Ni, Cr, Ti y Co, rasgos que deben atribuirse a los procesos de alteración hidrotermal que aportan elementos de afinidad litófila y lixivian a los siderófilos.

- Se confirma la concordancia de rasgos geoquímicos entre muestras de sedimentos y litologías, mineralizaciones y la validez de las signaturas definidas a partir de ellos.

ALTERACIONES HIDROTERMALES Y SU SIGNATURA GEOQUÍMICA EN SEDIMENTOS

A partir de la hipótesis, comprobada, de la congruencia de datos geoquímicos en sedimentos y rocas, se ha intentado reflejar la distribución de las alteraciones hidrotermales que han afectado a los materiales de la zona de forma muy intensa, a partir de la señal que de ellas llevan los sedimentos. Para ello, se han calculado índices de alteración como son los cloritización y sericitización de Hashimoto (Ishikawa et al., 1976) definido por $(MgO + K_2O) / (MgO + K_2O + CaO + Na_2O)$ y de sericitización, definido por $K_2O / (K_2O + Na_2O)$ (Saki, y Date, 1980). Este último puede servir para identificar alteraciones muy similares desde un punto de vista mineralógico como son las de tipo argílico o de pirofilitización.

La representación en mapas de contornos de estos índices muestra que, aunque más desarrolladas en unas unidades que en otras, las alteraciones no se ajustan tan estrechamente a los recintos geológicos, sino que ocupan zonas dentro de ellos. Puede apreciarse en las figuras 34 y 35 que la alteración cloritica y sericitica se localizan preferentemente en la Fm Tireo, en el C. Duarte y parcialmente en las formaciones Los Ranchos, Peralvillo Norte y Maimón, que albergan mineralizaciones volcanosedimentarias y/o epitermales. La alteración sericitica tiene una distribución algo diferente, señalando preferentemente a zonas amplias en los materiales sedimentarios de la cuenca de back-arc, en las rocas volcánicas del cuaternario y en las formaciones Los Ranchos, Maimón, Peralvillo Norte y D. Juan, además de pequeñas anomalías más puntuales. Parece existir una relación, lógica por otra parte, entre los tipos de yacimientos más comunes o esperables en cada litología y las

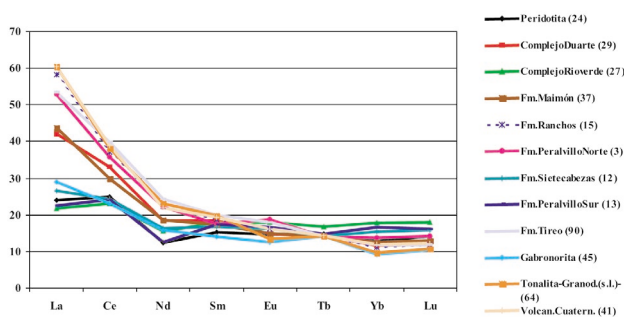


Figura 25. Diagrama Spider de Tierras Raras en sedimento de corriente de las diferentes unidades litológicas. (Valores normalizados a condrito)

Figure 25. Spider diagram of Rare Earths values in stream sediments according to geological units (Chondrite normalized)

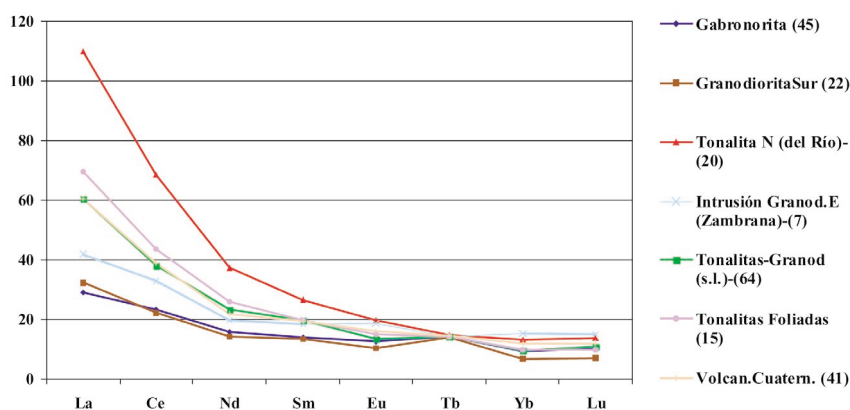


Figura 26. Diagrama Spider de Tierras Raras en sedimento de corriente de las unidades litológicas intrusivas y del vulcanismo cuaternario. (Valores normalizados a condrito)

Figure 26. Spider diagram of Rare Earths values in stream sediments according to the intrusive units and to the quaternary vulcanism. (Chondrite normalized)

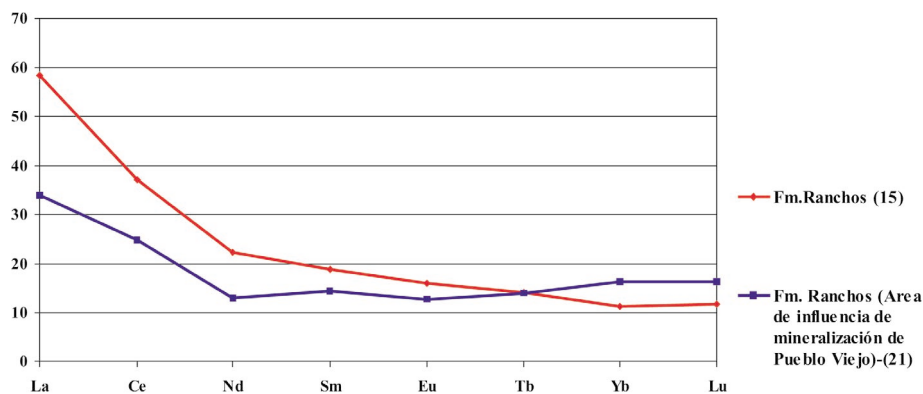


Figura 27. Diagrama Spider de Tierras Raras en sedimento de corriente de la Fm. Los Ranchos en la zona de influencia de la mineralización de Pueblo Viejo y en áreas más extensas. (Valores normalizados a condrito)

Figure 27. Spider diagram of Rare Earths values in stream sediments on Los Ranchos Fm. near to the Pueblo Viejo ore deposit and in a more distant area. (Chondrite normalized)

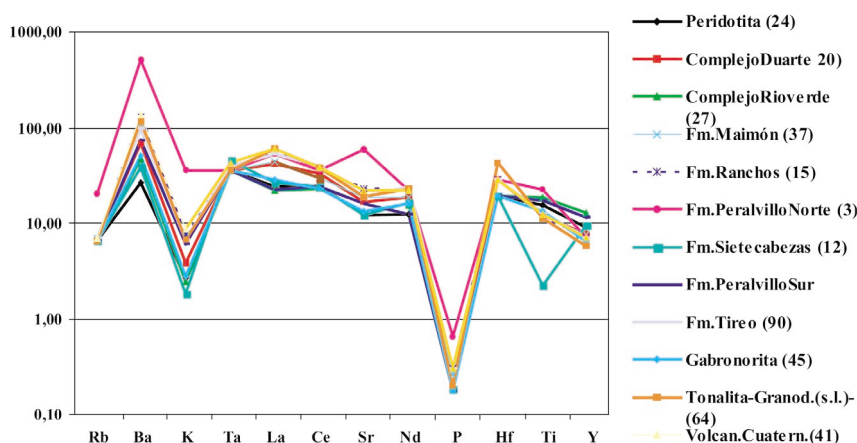


Figura 28. Diagrama Spider de contenidos de elementos incompatibles en sedimentos de corriente de las diferentes unidades litológicas. (Valores normalizados a condritos)

Figure 28. Spider diagram of incompatible elements in stream sediments according to geological units (Chondrite normalized)

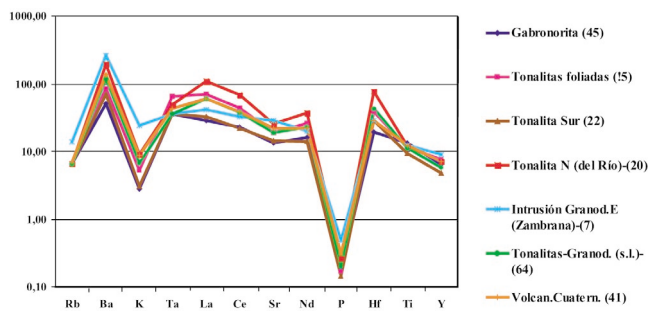


Figura 29. Diagrama Spider de contenidos en elementos traza incompatibles en sedimentos de corriente de las unidades litológicas intrusivas y del volcanismo cuaternario. (Valores normalizados a condrito)

Figure 29. Spider diagram of incompatible elements in stream sediments according to the intrusive units and to the quaternary vulcanisme (Chondrite normalized)

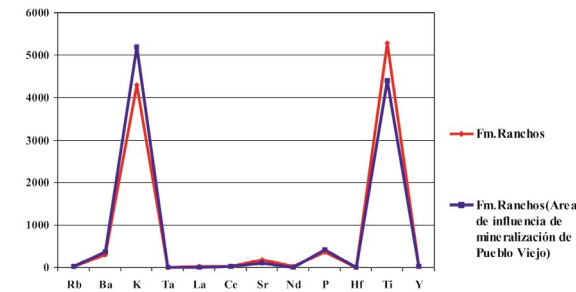


Figura 30. Diagrama Spider de contenidos de elementos incompatibles en sedimento de corriente de la Fm Los Ranchos en la zona de influencia de la mineralización de Pueblo Viejo y en áreas más extensas. (Valores normalizados a condrito)

Figure 30. Spider diagram of incompatible elements in stream sediments on Los Ranchos Fm from a neighbouring and distant area to the Pueblo Viejo ore deposit (Chondrite normalized)

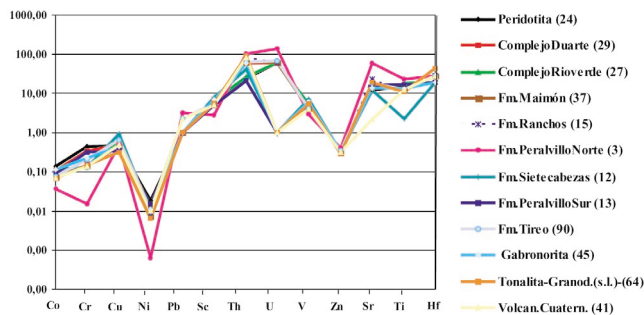


Figura 31. Diagrama Spider de contenidos de elementos en sedimento de corriente de las diferentes unidades litológicas. (Valores normalizados a condrito)

Figure 31. Spider diagram of trace elements in stream sediments according to the geological units (Chondrite normalized)

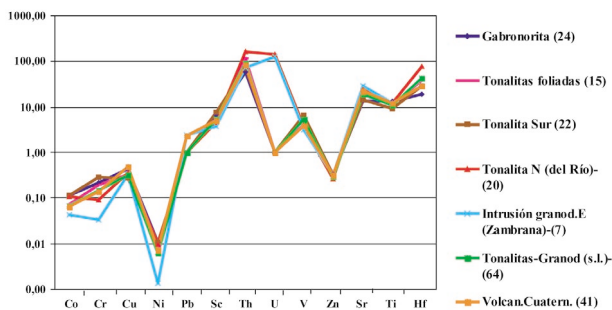


Figura 32. Diagrama Spider de contenidos de elementos traza en sedimentos de corriente de las diferentes unidades litológicas intrusivas y del volcanismo cuaternario. (Valores normalizados a condritos)

Figure 32. Spider diagram of trace elements in stream sediments according to the intrusive units and the quaternary vulcanisme (Chondrite normalized)

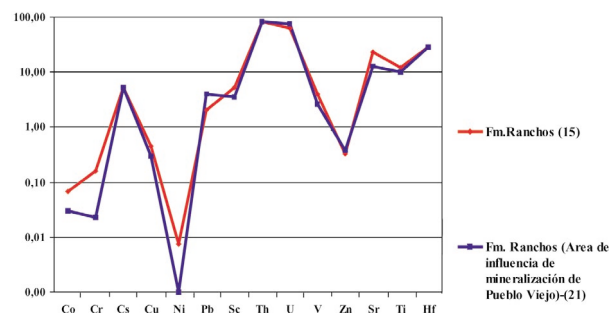


Figura 33. Diagrama Spider de elementos traza en sedimentos de corriente de la Fm Los Ranchos en la zona de influencia de la mineralización de Pueblo Viejo y en áreas más extensas. (Valores normalizados a condritos)

Figure 33. Spider diagram of trace elements in stream sediments on Los Ranchos Fm from a neighbouring area and a distant area to the Pueblo Viejo ore deposit (Chondrite normalized)

alteraciones. Aún cuando Pueblo Viejo muestra los dos tipos, la alteración sericitica se asociaría mejor, como más característica, a las mineralizaciones epitermales y la cloritización a los volcano-sedimentarios. Ello concuerda con las alteraciones hidrotermales que se evidencian en los principales tipos de mineralización presentes o esperables en la zona, que se diferencian bastante netamente, aún cuando pueden presentar formas intermedias: silicificación-argilitización-alunitización (cloritización subordinada) en las de tipo epitermal, y cloritización-sericitización en las de tipo VHMS (Franklin, 1997; Arribas, 1995; Robert et al., 1997).

ANOMALÍAS GEOQUÍMICAS.

La fijación de umbrales de anomalía se ha efectuado de dos maneras en función de tipos de elementos. En aquellos que muestran fondos y dispersiones muy diferentes según las clases geoquímicas, los umbrales se han determinado específicamente para cada grupo. En aquellos elementos que no muestran diferencias significativas según las clases, o bien cuyos contenidos están generalmente por debajo del límite de detección, se han definido unos umbrales de anomalías únicos para toda la población.

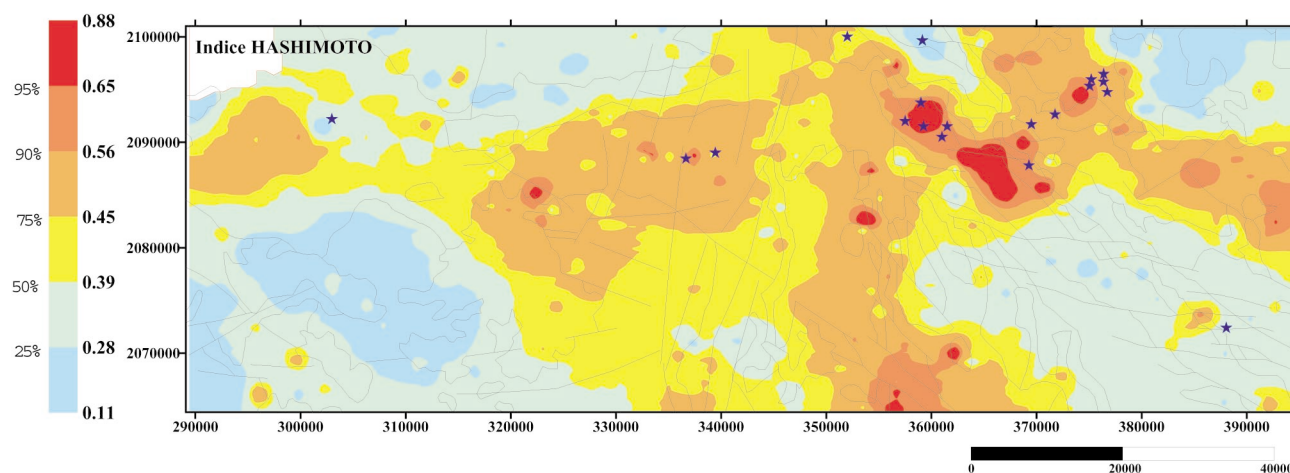


Figura 34. Geoquímica de sedimentos de corriente. Distribución del índice de Hashimoto de cloritización y sericitización $(\text{MgO} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$

Figure 34. Stream sediments geochemistry. Distribution of the Hashimoto index of chloritization and sericitization $(\text{MgO} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$

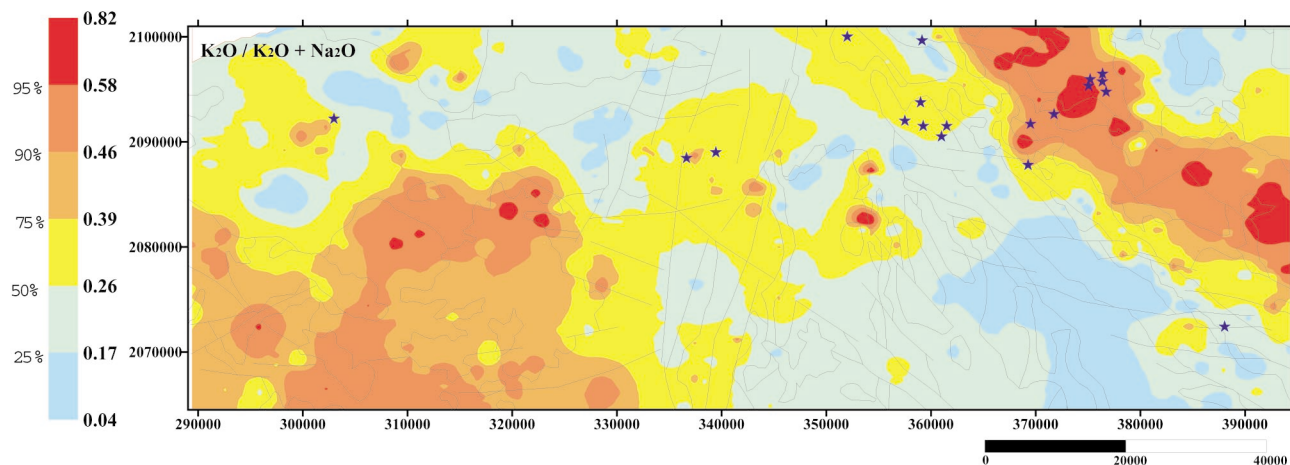


Figura 35. Geoquímica de sedimentos de corriente. Distribución del índice de sericitización $\text{K}_2\text{O} / \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$

Figure 35. Stream sediments geochemistry. Distribution of the sericitization index $\text{K}_2\text{O} / \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$

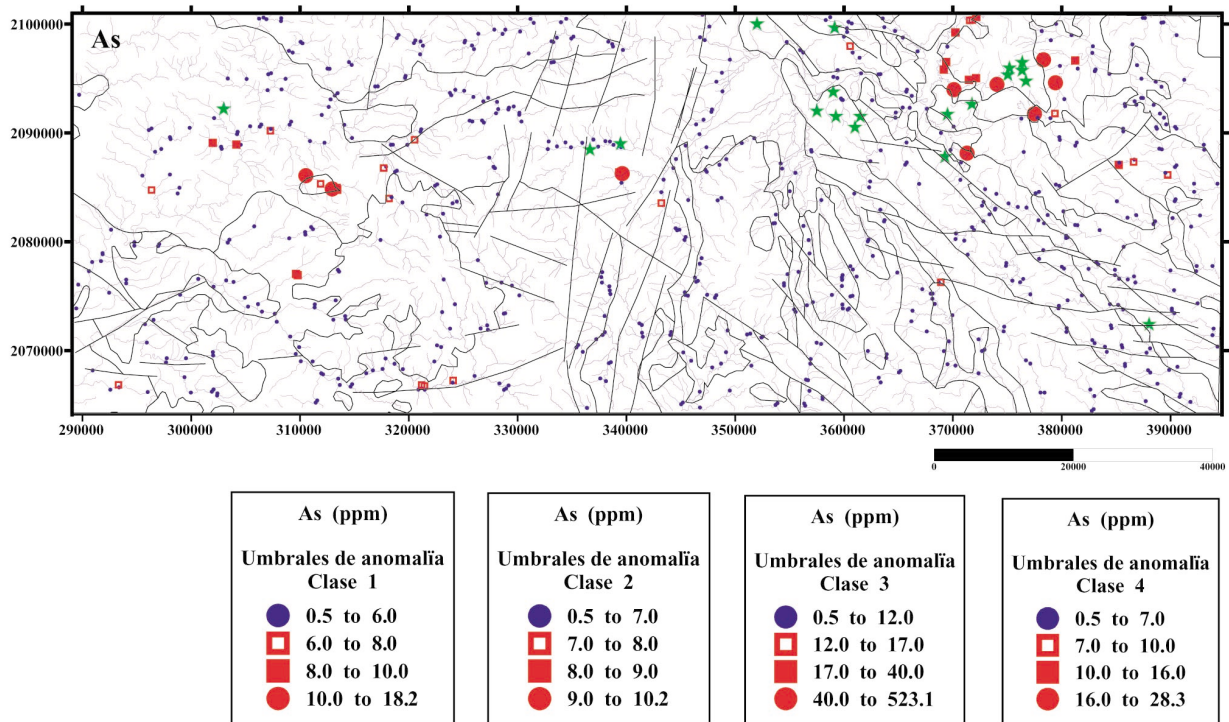


Figura 36. Geoquímica de sedimentos de corriente. Anomalías de arsénico por clases geoquímicas.

Figure 36. Stream sediments geochemistry. Arsenic anomalies according to geochemical groups.

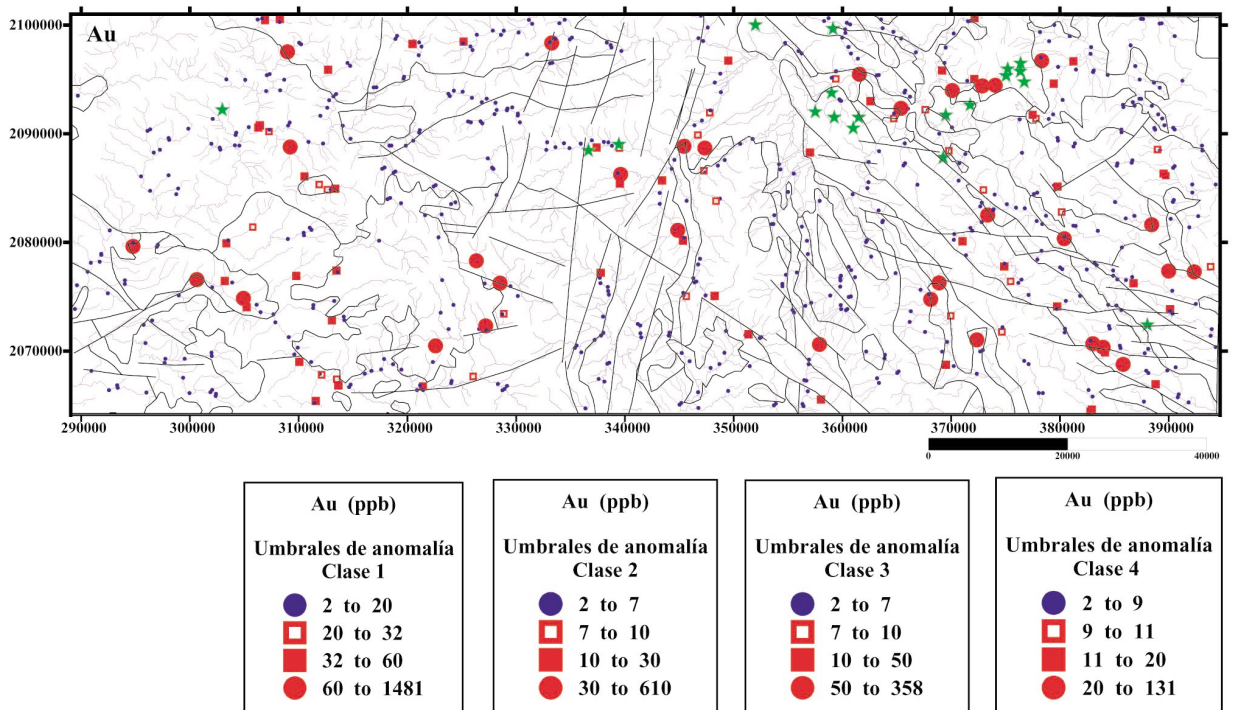


Figura 37. Geoquímica de sedimentos de corriente. Anomalías de oro por clases geoquímicas.

Figure 37. Stream sediments geochemistry. Gold anomalies according to geochemical groups.

Los criterios de elección de umbrales descansan sobre el mismo concepto de diagrama de cajas. Se han tomado como umbrales los valores correspondientes al *upper hinge* o límite de aparición de *outliers*, al paso de *outliers* a valores extremos, y, a veces, dentro de éstos se ha introducido otro umbral en función de las discontinuidades. Los umbrales así definidos figuran, junto a los diagramas de cajas a partir de los cuales han sido fijados, en los mapas de anomalías. Se han determinado y representado las muestras anómalas en mapas, elemento a elemento, sobre la base geológica y la situación de mineralizaciones conocidas (figuras 36 y 37).

Mineralizaciones importantes y ligadas a sistemas hidrotermales muy amplios (caso de Pueblo Viejo) presentan una respuesta o anomalía significativa y detectable en un grupo amplio de elementos, con la pauta de muestreo utilizada. La mineralización de Pueblo Viejo muestra en los sedimentos una signatura compleja y con amplia distribución: Au-Ag-As-Ba-Cd-Cs-Cu-Pb- Zn-Mo-Se-W-Co-Ta-S. Las otras mineralizaciones epitermales (Centenario) presentan una respuesta más limitada (Au-As-Zn-Cu) y reducida espacialmente. Las mineralizaciones volcanosedimentarias muestran respuestas y signaturas (Au-Cu-As-Bi-Zn) más pequeñas (Cerro Maimón) y a menudo no detectables con la densidad de muestreo aplicada. En forma similar, las agrupaciones de valores anómalos presentan diversos grados de coherencia geo-

química (de la asociación elemental anómala) y de consistencia espacial.

INTERPRETACIÓN Y SÍNTESIS FINAL

La síntesis e interpretación de los datos extraídos de la cartografía geoquímica, que aporta información sobre las relaciones geoquímica-geología, de los mapas de anomalías elementales, teniendo en cuenta el medio geológico y metalogenético del área, conduce a la definición de una serie de áreas anómalas prospectivas. La naturaleza y dimensiones de estas áreas son variables. Puede tratarse de pequeñas cuencas anómalas en posible relación con mineralizaciones concretas, o de áreas más amplias y menos definidas pero con una confluencia de rasgos que las hacen merecedoras de un estudio más detallado. Se ha tenido en cuenta, en general, un criterio de superposición de rasgos anómalos por diferentes conceptos (elementos metálicos más o menos complementarios en paragénesis de mineralización, elementos asociados a elementos indicadores de entorno geológico favorable, proximidad a estructuras). Se han despreciado las anomalías monoelementales, salvo cuando son repetitivas en muestras de una misma área. La consideración de todas las anomalías monoelementales puntuales llevaría a un exceso de puntos sobre los que fijar la atención o la exploración subsiguiente. Por ello, la conjugación de los di-

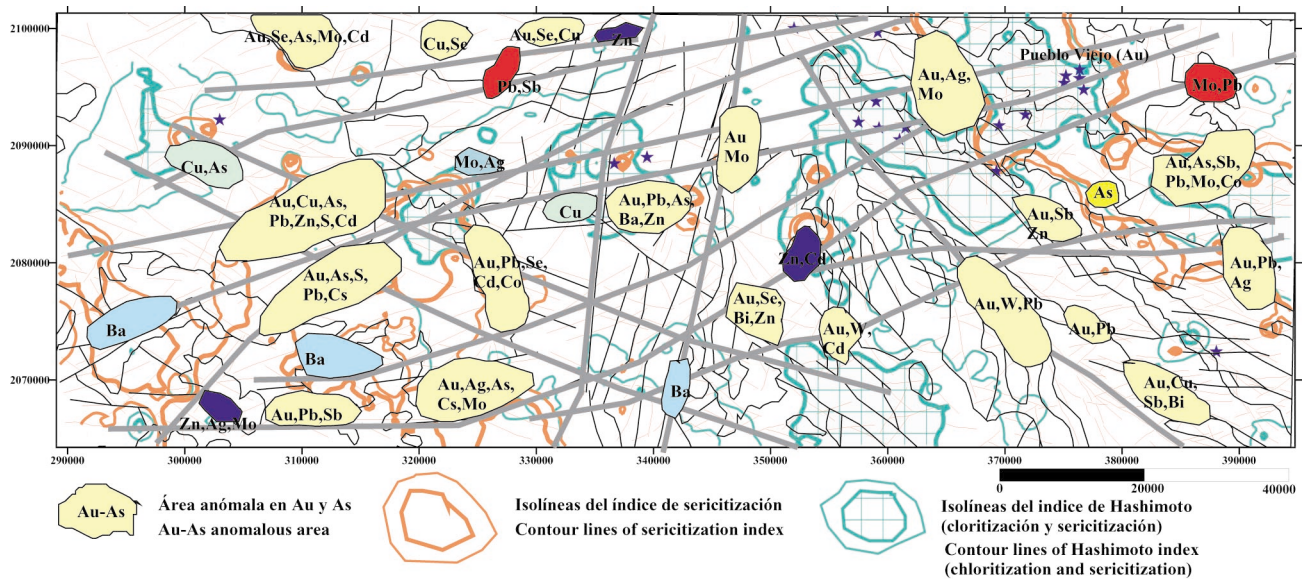


Figura 38. Mapa de síntesis de áreas anómalas, con expresión de la base geológica, lineamientos, indicios e isolíneas de índices de alteración.

Figure 38. Map of anomalous areas over geological, mineralization, lineal structures and contourlines of alteration index maps.

ferentes tipos de datos que aporta la información geoquímica multielemental, permite una valoración y jerarquización de las áreas de interés, objetivo que está implícito en cualquier proyecto de exploración. La composición geoquímica de las anomalías, aún con el handicap de una expresión incompleta, por efecto de la baja densidad de muestreo, junto con la distribución e intensidad de posibles alteraciones hidrotermales, aporta información sobre la naturaleza de las posibles mineralizaciones asociadas, siendo Au, Ag, Se, Mo, W, Ba, Pb, Zn, As, Cd, Cs.. elementos indicadores de mineralizaciones epitermales y

Cu, Zn, Sb, As, Bi, Au. de VHMS (Berger y Silbermann, 1986).

Las principales áreas anómalas prospectivas, delimitadas en la zona de estudio, pueden verse en la figura 38. Destacan, sin entrar en el análisis pormenorizado de las áreas anómalas, las importantes anomalías en los materiales sedimentarios de back-arc y en las vulcanitas cuaternarias. Su composición y las alteraciones asociadas inducen a pensar en una posible relación con procesos o mineralizaciones epitermales. Estas podría producirse en

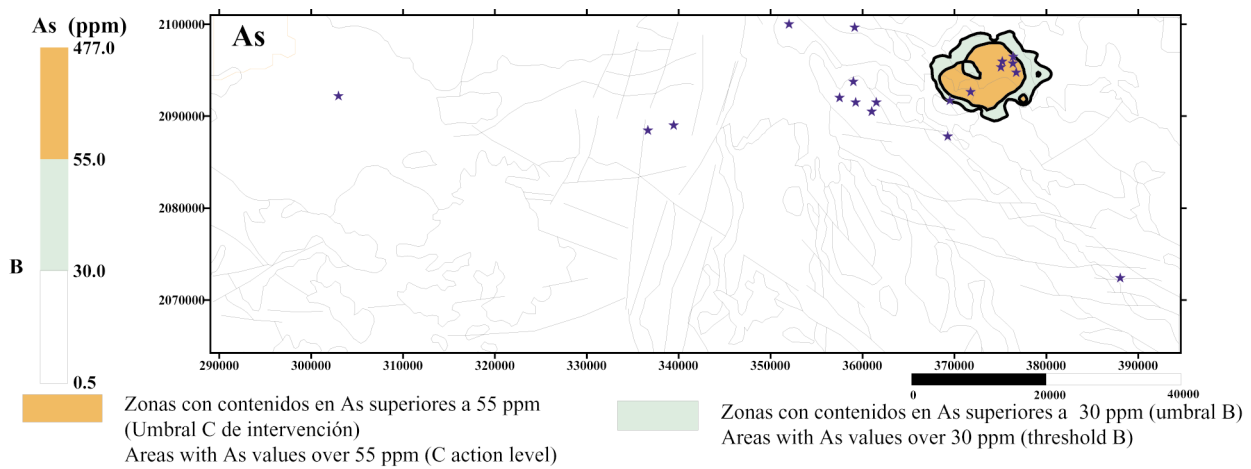


Figura 39. Geoquímica de sedimentos de corriente. Áreas con contenidos en As superiores a los límites B y C de la normativa de suelos holandesa.

Figure 39. Stream sediments geochemistry. Areas with arsenic values over B and C limits according to the dutch soil norms.

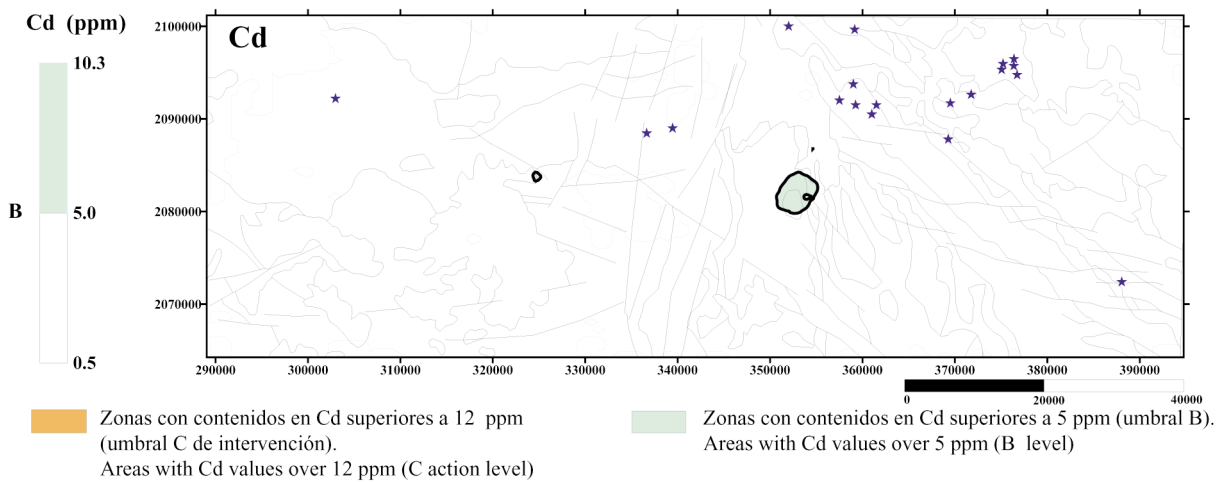


Figura 40. Geoquímica de sedimentos de corriente. Áreas con contenidos en Cd superiores a los límites B y C de la normativa de suelos holandesa.

Figure 40. Stream sediments geochemistry. Areas with Cd values over B and C limits according to the dutch soil norms.

conexión con un magmatismo tardío post-Eoceno, pues puede sospecharse de una continuidad hasta tiempos muy recientes de esta actividad. La similitud desde el punto de vista químico del volcanismo cuaternario con el del Cretácico Superior parece apoyarlo. Estas áreas, por la importancia y coherencia de las anomalías, y por estar situadas en un ámbito desprovisto de mineralizaciones, revisten un gran interés. Abren nuevas perspectivas de mineralizaciones epitermales en un contexto, hasta el presente, poco explorado.

Existen otras anomalías, en las formaciones Los Ranchos, Don Juan, Peralvillo Norte y Maimón o incluso en el C. Duarte, que podrían corresponder a este tipo de mineralizaciones dada su proximidad a stocks de tonalitas-granodioritas o su situación dentro del batolito del Río, y a su naturaleza (Mo, Pb, Au). Otras por el contrario, por su contexto y naturaleza, podrían estar más ligadas a procesos volcánico-sedimentarios. Hay que señalar la importancia de algunas de las anomalías de Au, cuya situación, alineadas y en proximidad a accidentes o corredores de desgarre (OSO-ENE, p.ej.) cobran significado, teniendo en cuenta el control lineamentario que tienen, a menudo, las mineralizaciones epitermales o los intrusivos asociados a ellas (Sillitoe, 1991).

La cartografía geoquímica y su aplicación a la diagnosis y al conocimiento medio ambiental

El sedimento, como muestra que representa una mezcla y un promedio de los materiales superficiales de la cuenca de drenaje, es susceptible de suministrar un información geoquímica de validez para hacer una estimación de los contenidos geoquímicos en los suelos erosionados en dicha cuenca. La información geoquímica multielemental regional puede, por ello, propocionar una definición de los fondos geoquímicos y de su variabilidad y, por otra parte, de las zonas con contenidos elevados en elementos potencialmente peligrosos para el medio y para la salud. Este tipo de información se utiliza (Appleton, 1995) para hacer un diagnóstico y una aproximación a estos problemas, que deben ser posteriormente estudiados con mayor detalle y con la metodología adecuada. Esta información es de particular interés en la Rep. Dominicana, país eminentemente turístico y con una gran preocupación por la conservación del medio.

En las figuras 39, 40 y 41 se han representado, con metodología similar a la ya explicada, las áreas en las cuales los contenidos en determinados elementos (en

este caso, As, Cd y Cr) exceden a los umbrales o límites que expresan las normativas de suelos contaminados, ya en uso en determinados países. Se ha escogido, a título puramente orientativo, la normativa holandesa de suelos contaminados, en la que se marcan para elementos potencialmente peligrosos, un nivel B, por encima del cual la zona o los suelos existentes en ella merecen un estudio de detalle, y un nivel C, o de intervención, por encima del cual es requerida una acción para la remediación de la situación, sin la cual esa área queda excluida para una mayoría de usos. Debe insistirse en el carácter de aproximación al problema que representa este enfoque, pues las normativas están referidas a tipos y metodologías de muestreo y análisis muy normalizados, pero constituyen, en cualquier caso, una mejora en el conocimiento de la situación del medio.

Con respecto a la mayor parte de los elementos problemáticos desde un punto de vista ambiental (As, Pb, Cd, Sb..) el área de Bonao-Constanza presenta concentraciones muy bajas y por debajo de los límites de estudio o intervención, salvo ocasionalmente y a escala local (As y Cd en Pueblo Viejo). El Cr delimita, no obstante, zonas más amplias con contenidos más importantes. Sin embargo, es evidente, en este último caso, que estos contenidos no pueden ser interpretados (excepción hecha, a nivel muy local y sólo en parte, en Pueblo Viejo) como contaminaciones antrópogénicas, sino como un rasgo natural del territorio.

CONCLUSIONES

La cartografía geoquímica desarrollada a partir de sedimentos de corriente en el área de Bonao-Constanza permite, con la metodología seguida en este estudio y dadas sus características de carácter morfoclimático, aportar una imagen con un apreciable grado de resolución, de las distribuciones geoquímicas, de los fondos geoquímicos y de su variabilidad. La estrecha correspondencia entre contenidos en sedimentos y en los materiales primarios facilita la caracterización geoquímica y la definición de las firmas de las principales estructuras geológicas y de las mineralizaciones, así como interpretaciones de tipo geológico-metalogénico que son básicas para conocer la potencialidad metalogénica del territorio. La base de datos geoquímicos elaborada puede servir de punto de partida para otra serie de estudios territoriales, entre los cuales son significativos los de carácter medio ambiental.

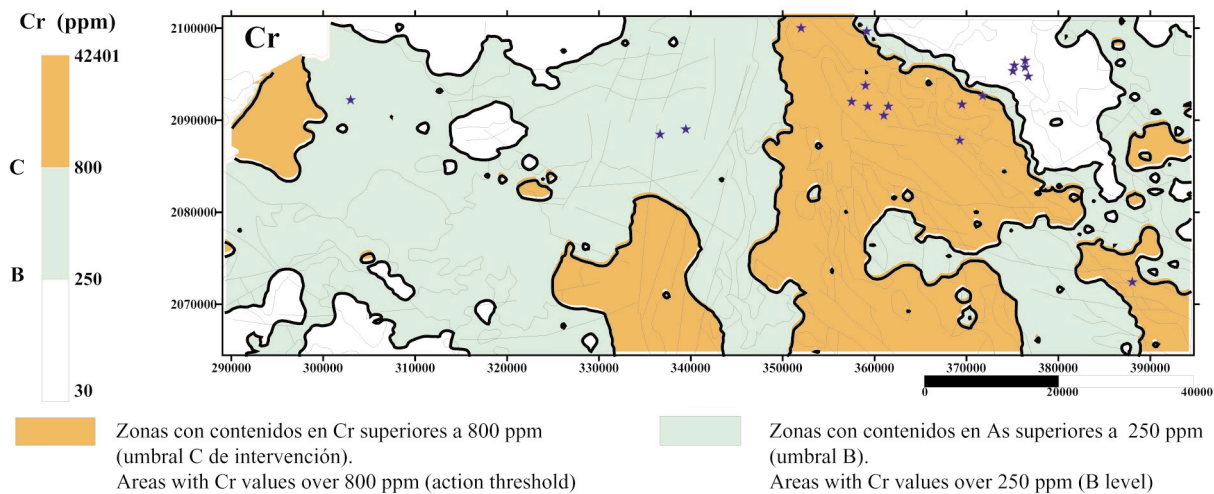


Figura 41. Geoquímica de sedimentos de corriente. Áreas con contenidos en Cr superiores a los límites B y C de la normativa de suelos holandesa.

Figure 41. Stream sediment geochemistry. Areas with Cr values over B and C limits according to the dutch soil norms.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro agradecimiento a nuestro colega Fernando Tornos por sus aportaciones y discusiones sobre los aspectos metalogenéticos y la descripción de yacimientos. Este trabajo forma parte de los resultados del Proyecto de Cartografía Geotemática en la República Dominicana, financiado por la Unión Europea a través del programa SYSMIN. Agradecemos la colaboración prestada por la Dirección General de la Minería de la República Dominicana.

BIBLIOGRAFÍA

Appleton, J.D., Ridgway, J., 1994. Drainage geochemistry in tropical rain forest terrains. In M.Hale and J. Plant (Eds). Drainage Geochemistry. Handbook of Exploration Geochemistry, Vol. 6 (G.J.S. Govett, Editor). Elsevier, 341-378.

Appleton, J.D., 1995. Potentially harmful elements from natural sources and mining areas: characteristics, extent and relevance to planning and development in Great Britain. British Geological Survey Technical Report WP/95/3. 63 pp.

Arribas, Jr. A., 1995. Characteristics of high sulphidation epithermal deposits and their relation to magmatic fluid. In J.F.H. Thompson (ed.). Magmas, fluids and ore deposits. Mineralogical Association of Canada Short Course, 23, 419-454.

Berger, B.R., Silbermann, M.L., 1986. Relationship of trace elements patterns to geology in hot-spring type precious metal deposits. In Berger, B.R., Bethke, P. (Eds). Geology and Geochemistry of epithermal systems. Reviews in Economic Geology, 2. 203-230.

Bowin, C. (1960). Geology of central Dominican Republic. Unpublished Ph. D. Thesis, Princeton University. Princeton, New Jersey, 211 pp.

Cox, D.P., Singer, D.A., 1988. Mineral Deposits Models U.S.G.S. Bull., 1693, 379 pp.

Dirección General de Minería (DGM) y Bundesanstalt für R. Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR); Cooperación Minera Dominico-Alemana (1991): Mapa geológico de la República Dominicana. Escala 1:250.000.

Darnley, A., Björklund, A., Bölviken, B., Gustavsson, M., Koval, P., Plant, J.A., Steenfelt, A., Tauchid, M., Xie Xuejing, 1995. A global geochemical database for Environmental and Resource Management Recommendations for International Geochemical Mapping. Final Report of IGCP Project 259. UNESCO.

Draper, G., Lewis, J., 1991. metamorphic belts in Central Española. In P. Mann, G. Draper y J.F. Lewis (eds). Geologic and tectonic development of the North America-Caribbean plate boundary in Española. Geol. Soc. Am. Spec. Paper, 262, 29-46.

Draper, G. Gutiérrez-Alonso, G., 1997. La estructura del Cinturón de Maimón en la isla de Hispaniola y sus implicaciones geodinámicas. Revista de la Sociedad Geológica de España, 10, 281-299.

Draper, G., Gutierrez, G., Lewis, J. F., 1996. Thrust emplacement of the Española peridotite belt: Orogenic expression of the Mid Cretaceous Caribbean arc polarity reversal. Geology, 24 (12), 1143-1146.

- Españat, J., Lewis, J., 1998. Field trip to the nickel laterite deposits, Bonao, Dominican Republic. SEG Fieldtrip Dominican Republic.
- Franklin, J.M., 1997. Lithogeochemical and mineralogical methods for base metal and gold exploration. In Gubins, A.G. (Ed.). Proceedings of Exploration 97. Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration, 191-208.
- Hutchison, Ch., 1983. Economic deposits and their tectonic setting. MacMillan Press. 315 pp.
- IGME, INYPSA, PROINTEC, 2000. Cartografía Geotématica de los Cuadrantes 1/100.000 de Bonao, Constanza y Azua. Programa SYSMIN. Informe inédito, 400 pp.
- Ishikawa, Y., Sagawuchi, T., Iwaya, S., Horiuchi, M., 1976. Delineation of prospecting targets for Kuroko deposits based on models of volcanism and underlying dacites and alteration halos. *Mining Geology*, 26, 105-117.
- Japan International Cooperation Agency (JICA), Metal Mining Agency Of Japan (MMAJ), 1984: Report on Geological Survey of Las Cañitas Area, Dominican Republic. Tokio, 22 pp.
- Kesler, S.E., 1978. Metallogenesis of the Caribbean region. *J. Geol. Soc. London*, 135, 429-441.
- Kesler, S.E., Russell, N., Seaward, M., Rivera, J., McCurdy, K., Cumming, G., Sutter, J., 1981. Geology and geochemistry of sulfide mineralization underlying the Pueblo Viejo gold-silver oxide deposit, Dominican Republic. *Economic Geology*. 76, 1096-1117.
- Kesler, S.E., Russell, N., Reyes, C., Santos, L., Rodriguez, A., Fondeur, L., 1991. Geology of the Maimón Formation, Dominican Republic. In Mann, P., Draper, G., Lewis, J.F. (eds). Geology and tectonic development of the North America-Caribbean plate boundary in Hispaniola. *Geol. Soc. Am. Spec. Paper*, 262pp.
- Kesler, S., 1997. Metallogenic evolution of convergent margins: selected ore deposit models. *Ore Geology Reviews*, 12, 153-171.
- Koschmann, A., Mackenzie Gordon, Jr., 1950. Geology and Mineral Resources of the Maimón-Hatillo District, Dominican Republic. *Geological Survey Bulletin* 964-D, 307-357.
- Lewis, J.F., 1980. Resumé of Geology in Hispaniola. In Field guide to the 9th Caribbean Geological Conference, Santo Domingo, Dominican Republic. Amigo del Hogar Publishers, 5-31.
- Lewis, J.F., Draper, G., 1990. Geological and tectonic evolution of the northern Caribbean margin. In G. Dengo y J.E. Case eds. *The Geology of North America. H, The Caribbean region*. *Geol. Soc. Am., Spec. Paper*, Colorado, 77-140.
- Lewis, J.F., Amarante, A., Bloise, G., Jiménez, G., Dominguez, H.D., 1991. Lithology and stratigraphy of upper Cretaceous volcanic and volcanoclastic rocks of Tiroo Group, Dominican Republic, and correlations with the Massif du Nord in Haiti. In P. Mann, G. Draper, J.F. Lewis (Eds.). Geologic and tectonic development of the North America-Caribbean plate boundary in Hispaniola. *Geol. Soc. Am. Spec. Paper*, 262 pp.
- Lewis, J.F., Escuder Viruete, J., Hernaiz Huerta, P.P., Gutiérrez, G., Draper, G., Pérez-Estaún, A., 2002. Subdivisión geoquímica del Arco Isla Circum-Caribeño, Cordillera Central Dominicana: Implicaciones para la formación, acreción y crecimiento cortical en un ambiente intraoceánico. *Acta Geologica Hispanica*, 37, 81-122
- Locutura, J., Bel-lan, A., Lopera, E., Tornos, F., 2000. Mapa de Recursos Minerales. Cuadrante de Bonao (6172). En : IGME, INYPSA, PROINTEC, 2000. Proyecto Cartografía Geotématica de la República Dominicana. Informe final (inédito).
- Mackenzie, D.H., 1977. Empirical assessment of anomalies in tropical terrain. *Association of Exploration Geochemists, Rexdale, Ont. Newslett.*, 21, 6-10.
- Mann, P., 1983. Cenozoic tectonics of the Caribbean structural and stratigraphic studies in Jamaica and Hispaniola. Thesis. New York University, Albany, 668pp.
- Mann, P., Draper, G., Lewis, J.F., Eds. 1991. Geologic and tectonic development of the North America-Caribbean plate boundary in Hispaniola. *Geol. Soc. Am. Spec. Paper*. 262 pp.
- Mazzuchelli, R.H., 1997. Geochemical exploration in areas affected by tropical weathering - an industry perspective. In A. G. Gubis (Ed). *Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial Conference on Mineral Exploration*, 315-322.
- Mitchell, A., Garson, M., 1981. Mineral deposits and global tectonics settings. Academic Press. 375 pp.
- Naciones Unidas, 1978. Informe sobre la metalogénesis en la República Dominicana. Proyecto Naciones Unidas para el Desarrollo. 122 pp.
- Nicolini, P., 1977. Les porphyres cuprifères et les complexes ultra-basiques du nord-est d'Haiti: essai de géologie provisoire. Tesis Doctoral, Univ. Pierre Marie Curie, Paris.
- Ottesen, R.T., Theobald, P., 1994. Stream sediments in mineral exploration. In M. Hale and J. Plant (Eds.). *Drainage Geochemistry. Handbook of Exploration Geochemistry*, 6. Elsevier. pp. 147-184.
- Plant, J., Slater, D., 1986. Regional geochemistry-potential developments. *Trans. Inst. Min. Metall.*, 95, B73-B70.
- Plant, J., Hale, M., Ridgway, J., 1989. Regional geochemistry based on stream sediment sampling. In G.D. Garland (Ed.). *Proceedings of Exploration '97*. Ontario Geological Survey, Spec. Vol., 3, 384-404.
- Plant, J., Breward, N., Simpson, P.R., Slater, D., 1990. Regional geochemistry and the identification of metallogenic provinces: examples from lead, zinc, barium, tin, uranium and gold deposits. *J. Geochem. Explor.*, 39, 195-224.
- Plant, J., Tarney, J., 1994. Mineral deposit models and primary rock geochemical characteristics. In M. Hale and J. Plant (Eds.). *Drainage Geochemistry. Handbook of Exploration Geochemistry*, 6. Elsevier, 11-72.

- Plant, J., Raiswell, R., 1994. Modifications to the geochemical signatures of ore deposits and their associated rocks in different surface environments. In M.Hale and J. Plant (Eds.). Drainage Geochemistry. Handbook of Exploration Geochemistry, 6. Elsevier, 341-378.
- Robert, F., Poulsen, K.H., Dubé, B., 1997. Gold deposits and their geological classification. In A.G. Gubis (Ed.). Proceedings of Exploration '97: Fourth Decennial Conference on Mineral Exploration., 209-220.
- Russell, N., Kesler, S.E., 1991. Geology of the maar-diatreme complex hosting precious metal mineralization at Pueblo Viejo, Dominican Republic. In P. Mann, G. Draper, J.F. Lewis (Eds). Geologic and tectonic development of the North American-Caribbean plate boundary in Hispaniola. Geol. Soc. Am. Spec. Paper 262, 203-215.
- Saki, Y., Date, J., 1980. Computer applications to the alteration data of the footwall dacite lava at the Ezuri Kuroko deposits, Akita Prefecture. Mining Geology, 30, 241-250.
- Salminen, R., Tavainen, T., Demetriades, A., Duris, M., Fordyce, F.M., Gregorauskiene, V., Kahelin, H., Kivisilla, J., Klaver, G., Klein, H., Larson, J. O., Lis J., J., Locutura, J., Marsina, K., Mjartanova, H., Mouvet, C., O'Connor, P., Odor, L., Ottonello, G., Paukola, T., Plant, J.A., Reimann, C., Scheremann, O., Siewers, U., Steenfelt, A., Van der Sluys, J., Williams, L., 1998. FOREGS Geochemical Mapping Field Manual. Geological Survey of Finland. Guide 47. 42 pp.
- Samama, J.C., 1986. Ore fields and continental weathering. Van Nostrand Reinhold. 318 pp.
- Sillitoe, R.H., 1991. Intrusion-related gold deposits. In R.P. Foster (Ed.). Gold Metallogeny and Exploration. London, Blackie, 165-209.
- Sillitoe, R.H., 1999. VMS and porphyry copper deposits: products of discrete tectonomagmatic settings. In Stanley et al (Eds.). Mineral Deposits: Processes to Processing. Balkema, 7-10.
- Simpson, P.R., Hurdley, J., Lalor, G., Plant, J., Robotham, H., Thompson, C., 1991. Orientation studies in Jamaica for multipurpose geochemical mapping of Caribbean region. Trans. Inst. Min. Metall., 100 B98-B110.
- Simpson, P., 1996. Environmental and legislative uses of regional geochemical baseline data for sustainable development. Episodes 19, 31-32.
- Sokolov, G., 1970. Deposits of the Union of Soviet Socialist Republics Survey of World Iron Ore Resources. New York, 381-410.
- Tooms, J.S., 1987. Exploration for gold in the humid tropics. J. Geochem. Explor. 29, 437-439.
- Tornos, F., Bel-lan, A., Locutura, J., Lopera, E., 2000. Mapa de Recursos Minerales. Cuadrante de Constanza (6072). En : IGME, INYPSA, PROINTEC, 2000. Proyecto Cartografía Geotemática de la República Dominicana. Informe final (inédito).
- Velinov, I., Gorova, M., Tcholakov, P., Tchounev, D., Ianeva, I., 1982. Secondary quartzites developed after Cretaceous volcanics from Zaza zone, Cuba. Geologica Balcanica, 13, 53-68.
- Walker, P.B., Tooms, J.S., 1963. Secondary dispersion of copper from the Parang lode, North Borneo. Br. Borneo Geol. Surv. Bull. 4, 91-118.
- Walther, H., Zitzmann, A., 1977. The iron ore deposits of Europe and adjacent areas. International Geological Congress. Published by BGR. 2 Vols.