

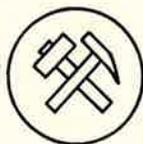


REPUBLICA ORIENTAL DEL URUGUAY

MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA

DIRECCION NACIONAL DE

MINERIA Y GEOLOGIA



Boletín Nº 39

Año 1986

**METODOS DE EXPLORACION GEOQUIMICA
EMPLEADOS EN EL
INVENTARIO MINERO NACIONAL**

DI. NA. MI. GE.

Departamento de Geoquímica

Quím. JORGE SPANGENBERG

RESUMEN

La exploración minera moderna se orienta principalmente al estudio de cuerpos mineralizados subaflorantes o no aflorantes por medio de nuevos métodos de prospección. Entre estas técnicas prospectivas se encuentran los métodos geoquímicos, que intentan poner en evidencia la presencia de posibles cuerpos mineralizados por medio de la identificación de una repartición de tenores anómala en los materiales superficiales accesibles al muestreo.

El desarrollo de técnicas de análisis espectrométrico multielemento, con dosificación simultánea de más de 20 elementos trazas, hizo de la metodología geoquímica una herramienta potente altamente eficaz en reconocimientos mineros regionales.

El gran volumen de datos numéricos, que resulta de este tipo de estudios, únicamente puede ser procesado e interpretado mediante la aplicación de diversas técnicas estadísticas y cartográficas con la ayuda de un computador.

La información geoquímica multielemento permite el estudio de los diferentes factores geológicos-litológicos, pedológicos, metalogénicos, etc. responsables de los fenómenos de diferenciación geoquímica, facilitando la selección de zonas anómalas en ciertos elementos en un ambiente geoquímico determinado. Asimismo, el análisis multielemento amplió el espectro de las técnicas de exploración geoquímica, adaptándolas a los requisitos de un inventario minero.

En nuestro país se han comenzado a emplear los métodos de prospección geoquímica multielemento en forma sistemática a partir de 1980 con la iniciación del programa Inventario Minero Nacional.

La revelación de un número importante de anomalías estratégicas, en algunos casos ya controladas por estudios de detalle, ha permitido la localización de objetivos mineros desconocidos hasta el momento.

En este trabajo exponemos los aspectos generales de la metodología empleada.

MÉTODOS DE EXPLORACION

GEOQUIMICA EMPLEADOS EN EL INVENTARIO

MINERO NACIONAL

1. *Introducción*

En el pasado, la exploración minera era conducida por geólogos o prospectores, que investigaban los afloramientos, intentando descubrir alguna expresión visual relacionada con la presencia de una mineralización; o analizaban los sedimentos de los drenajes en busca de minerales pesados; resistentes a la alteración supergénica (oro, casiterita, scheelita, etc.) y, por consiguiente, capaces de concentrarse en los aluviones y eluviones.

Sin embargo, la era de la observación directa llegó a su fin una vez que fueron hallados y, en la mayoría de los casos, también explotados, los yacimientos aflorantes más importantes.

Podemos citar a título de ejemplo en nuestro país, el descubrimiento y explotación a fines del siglo pasado, de los yacimientos auríferos del departamento de Rivera y las mineralizaciones de cobre-plomo-zinc de la región de Minas (Mina Oriental, Mina Chape, Mina Reus, Mina Valencia, etc.).

Surgió entonces la necesidad de desarrollar nuevos métodos de prospección minera que posibilitaran la exploración de mineralizaciones su aflorantes, al igual que no aflorantes o ciegas, cubiertas por una cobertura vegetal o edafológica centimétrica a métrica o, asimismo, por una formación rocosa estéril. Entre estos métodos se encuentran las técnicas fotogeológicas, geofísicas y geoquímicas.

A mediados de la década de 1930, comienzan a aplicarse, primero en la Unión Soviética y luego en Occidente, los principios de la Geoquímica a la exploración minera, empleando el análisis espectrográfico de elementos presentes al estado de trazas como un complemento a la simple observación visual.

Con el desarrollo de métodos analíticos rápidos y precisos, tanto colorimétricos como de absorción o emisión atómica, se llega alrededor de 1960 ya a la aplicación en forma rutinaria de los métodos geoquímicos en los programas de evaluación de recursos minerales. Se procedía a

analizar sistemáticamente uno o más elementos metálicos en muestras de rocas, suelos, aluviones, sedimentos de lechos vivos, material vegetal, agua y mismo vapores de los suelos o de la atmósfera.

El objetivo de la prospección geoquímica es entonces poner en evidencia por vía química analítica una repartición de elementos anómala que revela, a nivel de los materiales superficiales accesibles al muestreo, la presencia de una mineralización de posible interés metalogénico.

En nuestro país son escasos los antecedentes sobre la aplicación de prospección geoquímica en trabajos de exploración minera y la mayoría de los mismos no han dado lugar a publicaciones ni figuran bajo la forma de informes inéditos en los archivos oficiales. Aparentemente el único trabajo documentado corresponde a una prospección geoquímica táctica de cobre realizada sobre un indicio aurífero de Isla Patrulla (Goso H. y Umpierrez M., 1967, 1974).

En 1980 comienza por resolución gubernamental la ejecución del programa Inventario de los Recursos Minerales del territorio nacional, mediante un contrato de transferencia tecnológica entre el Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M.) de Francia y la D.I.N.A.M.I.G.E., Este proyecto de exploración minera regional se basa fundamentalmente en los métodos de prospección geoquímica, pero como todo programa de inventario minero implica una acción multidisciplinaria con la integración de la información resultante de los trabajos geoquímicos y la originada en los estudios de reconocimiento geológico y geofísico efectuados paralelamente.

En los capítulos siguientes evaluamos diferentes aspectos metodológicos de la prospección geoquímica regional que se lleva a cabo en nuestro país, y presentamos brevemente los resultados más importantes obtenidos hasta el momento.

2. La geoquímica como técnica de exploración minera

2.1. Generalidades

Los métodos geoquímicos de exploración minera se basan en la determinación sistemática de uno o varios caracteres químicos en los materiales de la corteza terrestre, susceptibles de ser muestreados. Las propiedades químicas generalmente medidas son las concentraciones de elementos mayores, menores o en trazas, al igual que algún parámetro físico-químico como pH y Eh. La naturaleza del material muestreado permite

clasificar los estudios geoquímicos en litogeoquímicos —muestras de rocas—, pedogeoquímicos —muestreo de suelos, aluviones y sedimentos—, hidroggeoquímicos —estudio de las aguas naturales—, geoquímicos —muestreo de materiales vivos, esencialmente plantas, denominándose en este caso fitogeoquímicos— y atmogeoquímicos —muestreo de aire y vapores—.

Los métodos litogeoquímicos son junto a los pedogeoquímicos, que en la Unión Soviética se engloban con los primeramente mencionados, los más empleados en las campañas de prospección minera.

El medio muestreado es función del objetivo y escala de las investigaciones geoquímicas en el sector considerado, dadas las condiciones geológicas, topográficas y climáticas reinantes en el mismo; y varía al pasar de un trabajo de reconocimiento a estudios más detallados.

En un programa de reconocimiento, el objetivo es cubrir un área importante a escala regional, en busca de alguna indicación de la presencia de una mineralización. Esta primera *prospección estratégica* definirá las localidades anómalas de interés para la prospección minera de detalle, eliminando en principio las áreas aparentemente estériles.

Los tipos de muestreo más eficientes para el reconocimiento de grandes superficies corresponde a los sedimentos de lechos vivos y los aluviones o coluviones de terraza o de fondo de hondonada. Estos son representativos de cuencas de drenaje más o menos vastas, lo que permite el empleo de una densidad de muestreo baja, generalmente de 1 a 3 especímenes por cada km².

La detección de las zonas geoquímicas anómalas es factible por las diferencias existentes en cuanto a la distribución de algunos elementos en el material muestreado asociado a una mineralización, en comparación con aquellos procedentes de un medio estéril.

La interpretación de los resultados analíticos de aluviones requiere el conocimiento de los factores que rigen la relación de la composición química del material muestreado, con los diferentes tipos de rocas y suelos del área de drenaje de donde ha derivado.

El proceso dinámico conocido como *dispersión geoquímica*, por medio del cual, los elementos son desplazados dentro de partículas sólidas, sistemas poliatómicos complejos y mismo átomos ionizados a nuevos ambientes geoquímicos; es uno de los temas más tratados en los libros de

exploración geoquímicas, Rose A. W., Hawkes H. E. y Webb J. S., 1979; Granier C. 1973; Beus A. A. y Grigorian S. V., 1977; Levinson A. A., 1980; ...).

En exploración geoquímica interesa la *dispersión geoquímica secundaria* (Hawkes H. E., 1967), que tiene lugar en la superficie por la alteración, erosión, transporte y deposición, modificando la distribución inicial de los elementos químicos.

La dispersión geoquímica secundaria puede ser el efecto exclusivo de procesos mecánicos, como el desplazamiento de material bajo la acción del viento, agua, glaciares, etc. La así denominada dispersión mecánica implica generalmente la mezcla de los materiales; y depende, en esencia, de los caracteres climáticos y topográficos.

Los procesos químicos y bioquímicos son más complejos, y dan lugar a fracciones de diferentes composición química, lo que se conoce como diferenciación geoquímica secundaria. Para una oro-hidrografía determinada la temperatura, el pH y Eh, y las actividades de los iones en solución controlan, siguiendo las leyes de la termodinámica química, la naturaleza y magnitud de los procesos de disgregación y disolución de minerales primarios con la separación de una fase inmóvil residual y una fase migratriz; las características dinámicas de ambas fases; la absorción e intercambio iónico en partículas coloidales; la redeposición de sales e hidróxidos poco solubles; la neoformación de minerales en el ambiente secundario; etc.

La dispersión geoquímica, tanto física como química, da lugar a *aureolas* o *halos* de dispersión con tenores anómalos, que favorecen la detección de los cuerpos mineralizados al abarcar una zona suprayacente significativamente mayor a la de los mismos. El ambiente secundario es entonces el más interesante en prospección geoquímica; y la comprensión cabal de los fenómenos de dispersión activos en él es esencial para la realización eficiente de un estudio geoquímico y particularmente, para la interpretación de los resultados del mismo (Krauskopf K. B., 1967; Erhart H., 1967; Levinson A. A., 1980).

En zonas de contexto geomorfológico complejo y especialmente en presencia de recubrimientos alóctonos importantes, los fenómenos de dispersión distorsionan la relación roca-suelos (sedimentos), y tornan sumamente difícil la interpretación de la señal pedogeoquímica en función de la distribución de unidades litológicas, posibles mineralizaciones, ...

En suma, la alteración y erosión de las concentraciones minerales y la gran variedad de procesos asociados, posibilitan la detección y selección de anomalías geoquímicas en la fase de reconocimiento estratégico.

En los sectores anómalos, se lleva a cabo un reconocimiento de detalle cuyo propósito es confirmar, en primer lugar, la anomalía estratégica y delinear su forma, extensión y nivel de tenores respecto al fondo medio —contraste o intensidad de la anomalía— y su posible filiación con una mineralización. Este estudio conocido como *prospección táctica* intentará localizar al supuesto yacimiento generalmente mediante un muestreo de suelos a malla cerrada.

La toma de suelos se realiza en el área señalada como anómala en la fase de prospección estratégica, según una malla de muestreo regular y un paso entre muestras, que en la mayoría de los casos oscila entre los 20 a 200 metros. Esta modalidad de muestreo origina una información más puntual, que resulta más efectiva para localizar la raíz de la anomalía superficial, con la mayor precisión posible. La interpretación de los resultados de esta etapa asiste al prospector en el establecimiento del programa de exploración en profundidad, por medio de trincheras y perforaciones.

El desarrollo de las técnicas de espectrometría de emisión condujo al establecimiento de los métodos geoquímicos multielementos, en los cuales las muestras son analizadas para 20 a 30 (a veces hasta 50) elementos, tanto al estado de trazas como macrocomponentes. Tal es el caso de la espectrometría de emisión a lectura directa en la cual se implantó la alimentación de las muestras al arco en forma de polvo sobre una cinta para maximizar la eficiencia del análisis geoquímico (Daniels A. et al., 1959; Ataman G. et al., 1963 y 1965; Craft E. R., 1964; Cameron E. M. et al., 1967; Moal J. Y. et al., 1970 y 1979). Más recientemente se perfeccionó el empleo de plasmas como fuente de excitación, introduciéndose la muestra en solución. La alta temperatura del plasma y la mayor homogeneidad de las soluciones respecto a las muestras sólidas eliminaron parcialmente las desventajas del cuantómetro: inestabilidad del arco de excitación; falta de reproductividad en el muestreo del polvo, límites de detección demasiado elevados y baja sensibilidad. Estos métodos, y específicamente la espectrometría de emisión a plasma conductivo, permiten el análisis de más de 20 elementos trazas, y en algunas técnicas es posible dosificar simultáneamente los elementos mayores.

El procesamiento del gran volumen de información obtenido requiere necesariamente el uso de un computador.

Esta metodología moderna de la prospección geoquímica es aplicada actualmente en el Uruguay gracias al contrato de transferencia tecnológica establecido entre el Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M.) de Francia y la D.I.N.A.M.I.G.E. en mayo de 1980.

El reconocimiento geoquímico multielemento sistemático realizado en el marco de Inventario Minero del Uruguay implica el accionar armónico de una serie de técnicas dentro de una infraestructura que abarca diferentes unidades de la D.I.N.A.M.I.G.E.: equipos de prospectores, taller de preparación de muestras, laboratorio químico-analítico, y los servicios de geoquímica aplicada e informática.

El diagrama general de la figura 1 muestra esquemáticamente la intercorrelación entre las diferentes operaciones, involucradas en el programa de prospección geoquímica, desde la toma de las muestras a la interpretación de los resultados analíticos, y corresponde a una adaptación a las condiciones locales del experimentado por el B.R.G.M. en la última década tanto en Francia metropolitana como asimismo Guyana, Zaire, Portugal, Indonesia, Irán, etc.

Consideraremos a continuación las etapas esenciales de la prospección geoquímica, tal como son operacionales en el Inventario Minero Nacional:

- muestreo
- pretratamiento de las muestras
- análisis
- procesamiento e interpretación de los resultados

2.2. Muestreo

Como vimos en la sección anterior, la información geoquímica multielemento surge de la evaluación cuantitativa de diversos caracteres —tenores de elementos generalmente presentes al estado de trazas—, mediante la acción de un dispositivo de medida sobre el campo de las observaciones (Leymaire P., 1972; Roche H. y de la Grandclaude Ph., 1972).

En lo concerniente a la significación de los datos, se plantea un problema sumamente importante, que es la adaptación del sistema de observación en exploración geoquímica.

A la repartición real del o de los elementos considerados en el sector, se confronta la configuración del muestreo caracterizada por la naturaleza, tamaño, densidad y posicionamiento de los especímenes recolectados y sometidos a análisis.

El valor de los resultados va a depender esencialmente de la intercorrelación entre la configuración del muestreo y la configuración de la distribución espacial de los elementos dosificados. Cuanto mejor se conozca la relación dispositivo de observación-estructura del campo de observación, más fácil será la interpretación de los datos geoquímicos. Leymaire P. (1969) expone detalladamente la relación entre los datos geoquímicos y el muestreo, en términos de la teoría de la información.

2.2.1 Modalidades del muestreo

El relevamiento geoquímico estratégico que se realiza en el Uruguay está basado en el muestreo de material aluvionar. Los aluviones finos extraídos de cursos de agua secundarios constituye el tipo de muestras más eficientes a nivel de estudios de reconocimiento regional, puesto que son representativos —en el sentido de la mejor muestra compuesta natural— de todas las rocas y suelos de la cuenca de drenaje.

En la práctica, las muestras recolectadas pueden clasificarse en cuatro tipos, en orden decreciente de representatividad:

—sedimentos de lechos vivos, que corresponden al material fino del fondo de las cañadas (generalmente se mezclan con muestras sobre cada vertiente lateral), y dan lugar a una excelente imagen geoquímica del área de la cuenca de drenaje aguas arriba de la estación de muestreo;

—suelos en flat, que son tomados en los suelos consolidados sobre las márgenes de las cañadas y corresponden a antiguos aluviones;

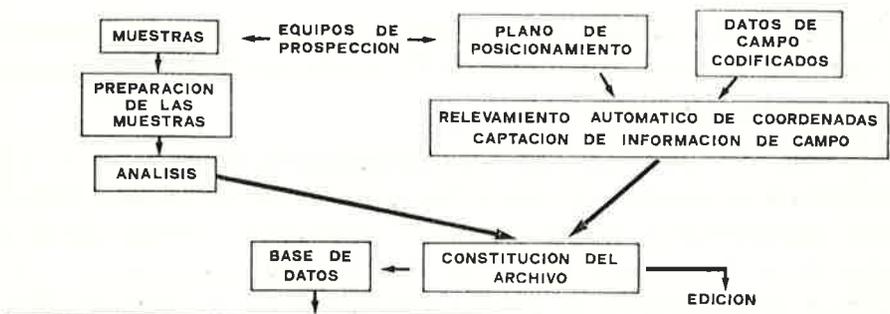
—suelos en fondo de hondonada, cuando el drenaje es poco acentuado; y

—suelos verdaderos, cuando el desarrollo de la red hidrográfica es insuficiente para alcanzar la densidad de muestreo deseada.

Las tres primeras modalidades de muestreo dan lugar a muestras representativas de un área relativamente importante, y las observaciones realizadas sobre ellas tienen un carácter vectorial. Los suelos propiamente dichos proporcionan una información más puntual.

En el campo se codifican el tipo de muestra, los litofacies predominantes en la localidad de muestreo, la presencia de cultivos y posibles

ADQUISICION Y REGISTRO DE DATOS



TRATAMIENTO DE DATOS

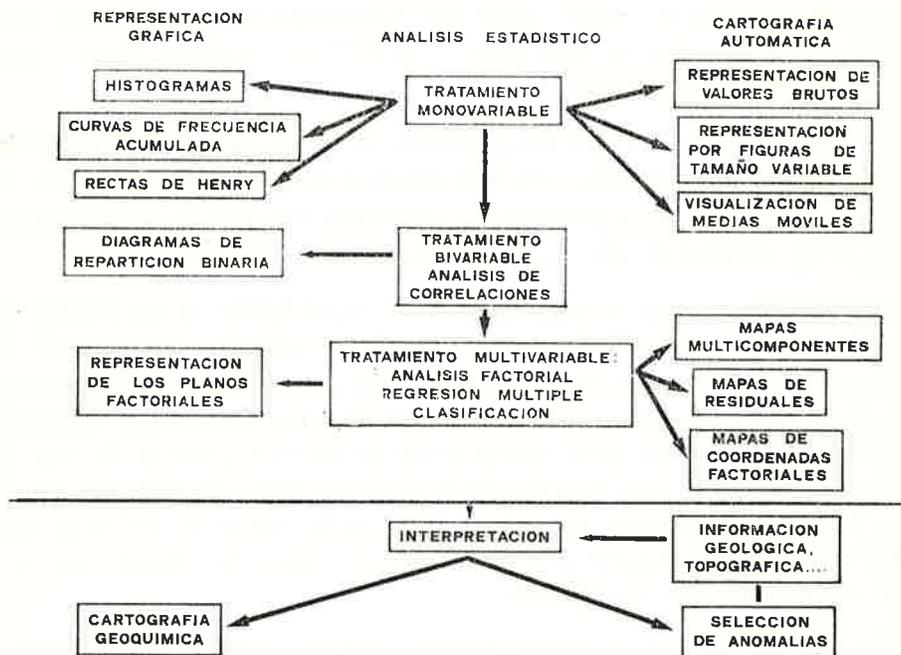


FIG.1: Diagrama esquemático de la secuencia de operaciones involucradas en la prospección geoquímica.

fuentes de polución, por ej.: antiguos trabajos mineros, terraplenes, desechos, etc. Estos datos conforman las caracteres extrínsecos de la información geoquímica y son de gran utilidad en la fase de interpretación.

En los estudios tácticos es empleado el muestreo de suelos verdaderos, (pase del horizonte B o horizonte C) puesto que estos proporcionan una información bien localizada.

En presencia de mineralizaciones subaflorescentes, el muestreo de suelos residuales se adapta muy bien a los requisitos de los estudios tácticos. La alta dependencia y simplicidad de la información permite inferir la posición de la fuente mineralizada en la roca madre, tomando en consideración el desplazamiento de materia determinado por la topografía local.

Frente a la presencia de un recubrimiento alóctono espeso, el factor de dependencia es menor, pues las mineralizaciones ocultas por una capa de material estéril no dan lugar a un halo de dispersión superyacente tan fácilmente detectable.

A pesar de esto, es posible optimizar la señal geoquímica variando la profundidad de muestreo. Con frecuencia procedemos a determinar el horizonte de muestreo representativo mediante un estudio metodológico previo a la realización de la prospección táctica definitiva.

En definitiva, como afirman Rose A. W. et al (1979), si los efectos relacionados a la mineralización son intensos y relativamente locales, su distinción de los procesos normales es simple; por el contrario, si los efectos son débiles y se relacionan a la mineralización de manera compleja, la interpretación de los datos geoquímicos es más complicada. Queda entonces en evidencia, que la interpretación de los datos es más fácil y directa, cuando se dispone de mayor información sobre el ambiente que rodea la estación de muestreo y especialmente sobre la conexión del material muestreado con el sustrato.

En lo que respecta a la cantidad de material extraído en los puntos de muestreo, a veces, es necesario considerar los tipos de análisis a los cuales serán sometidas las muestras. En general es suficiente extraer muestras del orden de los 500g. que una vez tomizadas a 125 μ m, conducen a un mínimo de 60-80g de sedimentos finos.

En las campañas de geoquímica estratégica los prospectores miden la radiactividad en las localidades de muestreo mediante el uso de cintilómetros Mount Sopris SC131A o los SPP-2 de origen francés, y estiman el pH de las aguas empleando papel pHímetro.

2.2.2 Densidad de muestreo

La misión B.R.G.M. llevó a cabo un examen de las condiciones locales, esencialmente desde el punto de vista de la morfología y de la red hidrográfica, concluyendo que con un muestreo del tipo sedimentos de lechos vivos sólo se podría contar con una densidad de 1 a 2 muestras por cada Km². Una malla más densa conduciría a extraer una proporción importante de muestras de suelos, poco representativas en prospección estratégica, y habría sido incompatible con la superficie a cubrir y los medios disponibles (Misión B.R.G.M., 1982). Un ensayo realizado sobre dos hojas al 1/50000 (Las Flores y Treinta y Tres) demostró que una densidad de 1 ó 2 muestras por Km² puede considerarse adecuada para la región aurífera de la Isla Cristalina y para las zonas donde el objetivo de investigación son los metales de base.

Actualmente, conociendo la respuesta litogeoquímica de las regiones ya estudiadas, lo que ha permitido caracterizar la vocación metalogénica de las diferentes formaciones geológicas, se modela la densidad de muestreo en función de la información geológica obtenida por los equipos de geólogos en un reconocimiento previo de las zonas a prospectar. La densidad de muestreo oscila entonces entre 1 a 3 ó 4 muestras por Km².

Evidentemente no se puede considerar que el método empleado sea exhaustivo; pero si posibilita la detección de localidades anómalas reduciendo las superficies a cubrir en estudios más avanzados.

La selección preliminar de los puntos de muestreo se realiza en base a fotos aéreas y un mapa al 1/50000 de la red hidrográfica con una grilla quilométrica.

En lo que respecta a estudios tácticos podemos decir que la malla de muestreo es generalmente regular (cuadrada o rectangular), con un paso que oscila entre 20 a 200 m. y dependerá de la naturaleza del prospecto. Cuando se trata de anomalías bien estructuradas se prefiere la realización de perfiles geoquímicos muy espaciados (500m. o más) (perpendiculares a la alineación estructural, con tomas de muestras a un paso de 50 ó 100m.

Frente a anomalías estratégicas poco extensas, que es necesario confirmar, o zonas anómalas muy amplias, en las cuales se busca reducir y determinar con mayor precisión el área a someter a controles de detalle, es conveniente emplear una fase prospectiva de malla intermedia entre la estratégica y la táctica. La misión D.R.G.M. denominó *semitáctica* a esta modalidad de prospección geoquímica. Se trata de un control con una

mallas de muestreo de 10 a 15 muestras por Km², que comprende la toma de los mismos tipos de materiales de alteración superficial —aluviones y suelos— que un reconocimiento estratégico. En consecuencia, si consideramos la naturaleza de las muestras y el objetivo del estudio, es más adecuado sustituir la denominación de semitáctica por la de prospección estratégica orientada.

2.3. Pretratamiento de las muestras

La preparación de las muestras implica las operaciones de secado, tamizado, envase y almacenamiento de las muestras.

Esta fase se lleva a cabo en un taller acondicionado especialmente para dicho servicio.

Las muestras se secan dentro de bandejas plásticas en un ambiente completamente vidreado, en forma tal de aprovechar al máximo la energía solar, y calefaccionado eléctricamente. Una vez secas, las muestras son disgregadas en morteros y tamizadas a 125,um, La fracción fina es conservada en tubos de plástico de 30g de capacidad aproximada.

De cada muestra se almacena un tubo como testigo y otro es enviado a los laboratorios para su análisis químico.

2.4. Análisis químico

Las muestras geoquímicas estratégicas son objeto de análisis multielemento por espectrometría de emisión plasma (EEP) en los laboratorios de la DI.NA.MI.GE. Este método fisicoquímico posibilita el análisis simultáneo de 22 elementos para cada muestra (Boucetta M. y Fritsche J., 1979).

A continuación, damos la lista de los elementos analizados y los respectivos límites inferiores de dosificación (que no concuerdan necesariamente con los límites de detección):

Fe ₂ O ₃	0.10%	Ni	10ppm
Mn	10ppm	Cr	10ppm
Ba	10ppm	Ag	0.2ppm
P	10ppm	Sn	20ppm
V	10ppm	W	10ppm
B	10ppm	Mo	2ppm
Sb	20ppm	Co	10ppm
As	20ppm	Be	1ppm
Pb	10ppm	Cd	1ppm
Zn	10ppm	Y	5ppm
Cu	10ppm	Nb	10ppm

Distinguimos un elemento mayor, Fe_2O_3 , dos elementos menores, Mn y P, y 19 elementos al estado de trazas, Ba, V, B,...

El análisis químico multielemento aumentó considerablemente la información geoquímica adquirida en los estudios de prospección regional, modificando en forma importante los criterios de interpretación (Bertraneau J. et al., 1979; Bequinet J. et al., 1979).

El estudio de las variaciones de más de un elemento conduce a definir las anomalías geoquímicas ya no en función del tenor del metal de base prospectado, sino que en término de una asociación de elementos. Es así que el uso de elementos indicadores o asociados a la mineralización, como lo son Mo, Ag, Au, As, Bi, Col, Ba, entre otros, facilita la jerarquización de las anomalías detectadas, diferenciando las de interés metalogénico de las parásitas o falsas, de origen formacional o pedológico.

El análisis multielemento permite reducir la densidad de muestreo debido al aumento de información que implica en cada estación de muestreo. Esto se debe a que en esta metodología la significación de una anomalía puntual es examinada en base a sus niveles anómalos en diferentes elementos, v. gr. Cu-Mo-As o Pb-Zn-Cd, que al evocar asociaciones típicas de depósitos de sulfuros justifican la realización de otros controles.

Generalmente, determinados grupos de elementos responden en forma similar a las condiciones del medio. El efecto de uno o varios fenómenos geológicos sobre un conjunto de muestras del sector estudiado, se manifiesta como una sobreposición más o menos compleja de procesos de diferenciación geoquímica. Las intercorrelaciones entre los diferentes elementos dosificados son examinadas mediante la aplicación de métodos estadísticos multivariantes, y las variaciones del espectro geoquímico de los materiales muestreados, reflejan la acción de diferentes factores naturales (litológicos, metalogénicos, ...).

Cuando se trata de prospecciones tácticas, en las cuales ya se ha identificado la paragénesis de la anomalía geoquímica, el análisis de las muestras se lleva a cabo por espectrometría de absorción atómica para un número más reducido de elementos, que dependerán de la anomalía en estudio.

2.5. Precisión de la información adquirida

Recientemente hemos realizado un estudio de precisión de los datos geoquímicos multielementos del programa de prospección estratégica (Spançenberg J. 1983a). La evolución de la precisión de los datos se efectuó considerando:

—los resultados analíticos de muestras de referencia introducidas sistemáticamente en las series a analizar, y

—los análisis de muestras dobles, recolectadas en dos puntos diferentes de una misma localidad de muestreo, y repartidas en las zonas cubiertas por el Inventario Minero en el período junio 1980-junio 1983.

A partir de las muestras de referencia es posible determinar la precisión analítica global media (submuestreo analítico, puesta en solución y lectura instrumental). Las muestras dobles, en cambio, permiten evaluar el error de manipulación originado por la totalidad de las operaciones; es decir, muestreo, pretratamiento y análisis químico de las muestras. Este último control provee una medida de la varianza intralocalidades y de la variabilidad geoquímica interlocalidades.

En la tabla 1 exponemos las precisiones medias estimadas a partir de tres lotes de testigos analizados en la DI.NA.MI.GE. (Spangenberg J., 1983a). Fueron excluidos aquellos elementos cuyos tenores raramente sobrepasan el límite de dosificación. La mayoría de los elementos son determinados con una precisión satisfactoria (menor que 30%) para los requisitos de una prospección geoquímica.

Un análisis de varianza efectuado sobre los datos analíticos de las muestras dobles permitió comparar la varianza entre las muestras de una misma localidad con la varianza interlocalidades (Spangenberg J., 1983a y las referencias ahí citadas). En la tabla 2 presentamos los coeficientes de determinación (varianza explicada por una única muestra), la relación de las varianzas interlocalidades e intralocalidades (F') y los componentes de varianza geoquímica regional y varianza debida a los errores de manipulación.

Los F' observados son significativos (nivel de confianza del 99%); sin embargo, el As muestra una componente de error importante (35%). El Cu y Pb, con una varianza de 17% y 18% respectivamente, se ven afectados por errores de manipulación de cierta importancia. Para el resto de los elementos, la varianza de error no supera el 15% de la total. Destacamos que las medidas de Ni (1%), Be (3%) y Fe_2O_3 , P y Cr (5%) se caracterizan por una varianza de error muy pequeña. Estos resultados deben considerarse únicamente a título indicativo, puesto que sólo son válidos para una prospección estratégica con una densidad de muestreo de 1 a 2 muestras por Km^2 . Por último, agregamos que en prospecciones regionales los valores típicos de la varianza de error oscilan entre 10 y 20%, es decir que la varianza geoquímica es de un 80 a 90% (Bölviken B. et al, 1972).

Elemento	Límite de dosificación	Intervalo de variación	Precisión media (%)
Fe203 (%)	0.1	4.0 — 5.0	19
Mn (ppm)	10	209 — 476	11
Ba (ppm)	10	410 — 660	8
P (ppm)	10	611 — 1388	8
V (ppm)	10	63 — 140	20
B (ppm)	10	17 — 27	26
As (ppm)	20	44 — 823	23
Pb (ppm)	10	26 — 235	15
Zn (ppm)	10	70 — 103	10
Cu (ppm)	10	42 — 99	12
Ni (ppm)	10	16 — 51	26
Cr (ppm)	10	37 — 182	14
Ag (ppm)	0.2	0.7 — 2.0	55
Be (ppm)	1	1 — 3.7	44
Y (ppm)	5	8.6 — 9.1	12
Nb (ppm)	10	24 — 38	24

Tabla 1: Precisión media () e intervalos de tenores medios de lotes de testigos analizados por EEP en la DI.NA.MI.GE. (Spangenberg J., 1983a).

Elemento	N	Intervalo de variación	r^2_L (%)	F'	S^2 (%)	S^{2r} (%)
Fe ₂ O ₃ (%)	17	2.1 - 10.1	90	40.3	95	5
Mn (ppm)	17	128 - 2228	88	31.4	93	7
Br (ppm)	17	339 - 1435	88	35.77	94	6
P (ppm)	17	190 - 788	92	42.7	95	5
V (ppm)	17	42 - 99	76	15.1	87	13
As (ppm)	17	20 - 49	42	5.0	65	35
Pb (ppm)	17	14 - 38	72	11.0	82	18
Zn (ppm)	17	35 - 112	86	22.5	91	9
Cu (ppm)	17	11 - 41	71	11.6	83	17
Ni (ppm)	17	10 - 37	98	164.8	99	1
Cr (ppm)	17	14 - 110	92	40.8	95	5
Co (ppm)	17	10 - 43	90	34.7	94	6
Be (ppm)	17	1 - 8	94	62.2	97	3
Y (ppm)	17	15 - 118	92	27.3	93	7
Nb (ppm)	17	23 - 64	83	21.5	91	9

Tabla 2: Análisis de varianza de los tenores de las muestras dobles recolectadas en prospección estratégica. N: número de cuplas; r^2_L : coeficiente de determinación para los valores log transformados; F': relación de varianzas interlocalidades e intralocalidades; S^2 : componentes de varianza debido a variaciones geoquímicas regionales; y S^{2r} : componentes de varianza debido al error total de medida; (Spangenberg J., 1983a).

En el marco de un trabajo de tesis (Spangenberg, J., 1984) estimamos la precisión analítica de los datos multielementos mediante la repetición del análisis de un cierto número de muestras. En la segunda determinación se efectuaron dos medidas instrumentales sobre la misma solución, pero en lotes diferentes, intentando lograr condiciones de medida diferentes (estabilidad del espectrómetro) De esta forma, fue posible evaluar la componente de variabilidad estrictamente instrumental y la componente de error introducida por la puesta en solución, en comparación con la varianza geoquímica interlocalidades.

Para poder comparar la variación analítica con la geoquímica, en la que incluimos los errores de muestreo, consideramos un diseño anidado desbalanceado cuya estructura se muestra en la figura 2.

En este caso, tratándose de un modelo desbalanceado únicamente es posible llevar a cabo un test de Fisher aproximado para examinar si los componentes de varianza son significativamente diferentes de cero. El procedimiento general es discutido por Garret R. G. y Goss T. I. (1978) y Goss T. I. et al (1978), que desarrollan un diseño desbalanceado con cuatro niveles para la evaluación de los errores de muestreo y análisis químico en prospecciones geoquímicas. Para la realización de los cálculos empleamos una versión modificada de un programa publicado por Garret R. G. y Goss T. I. (1980).

En la tabla 3 presentamos esquemáticamente los resultados de un análisis de varianza efectuado con logtransformación de los tenores.

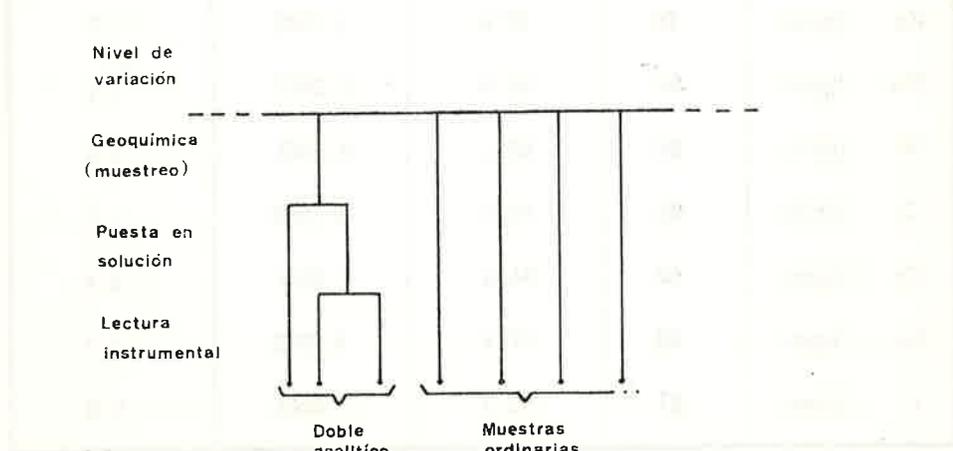


FIG. 2: Estructura de los datos empleados para evaluar los diferentes componentes de la precisión analítica (Spangenberg J., 1984)

Para el Fe, Ba y P el componente de varianza debido a la puesta en solución de las muestras pedogeoquímicas difiere significativamente de cero a un nivel de 0.001. La contribución de los errores de puesta en solución a la variabilidad total de los tenores demás elementos es trivial a un nivel de significación del 5%. Excepto el Ba y el Be todos los elementos considerados exhiben una componente de varianza analítica menor del 10%.

Los tres elementos (Fe, P y Ba) cuyo error de disolución es mayor que el espectrométrico tienen un carácter de macrocomponentes (especial-

Elemento	2 r (%) L	Componentes de varianza (%)		
		Geoquímica	Disolución	Instrumental
Fe ₂ O ₃ (%)	100	98.6	1.1AS	0.3
Mn (ppm)	98	99.3	0.0NS	0.7
Ba (ppm)	98	85.7	13.5AS	0.8
P (ppm)	100	97.0	0.0NS	0.4
V (ppm)	96	92.1	2.6AS	7.9
Pb (ppm)	92	94.1	0.4NS	5.5
Zn (ppm)	98	97.6	0.7NS	1.7
Cu (ppm)	98	98.9	0.0NS	1.1
Ni (ppm)	94	95.1	0.0NS	4.9
Cr (ppm)	96	94.8	0.0NS	5.2
Co (ppm)	92	94.6	0.0NS	5.4
Be (ppm)	88	87.4	4.9NS	7.7
Y (ppm)	81	93.2	0.0NS	6.8

Tabla 3: Componentes de varianza (geoquímica y muestreo) e intra-muestras (puesta en solución y medida instrumental) y varianza explicada por una sola lectura instrumental, r^2L (%).

mente el Fe). La solubilidad de estos elementos es determinada por su forma de presentación en los especímenes geoquímicos —ya sea formando minerales independientes, sustituyendo a otros elementos en la red cristalina de ciertos minerales, llenando fisuras, absorbiéndose sobre otros constituyentes, . . .—, la mezcla disgregante empleada y los demás parámetros de la disolución (temperatura, presión, tiempo, . . .). En el caso del Ba la alta varianza depuesta en solución (13.5%) reveló una desviación en el esquema analítico, objeto de estudio en los laboratorios de la D.I.N.A. M.I.G.E.

Si definimos la eficiencia analítica en forma análoga a la eficiencia de muestreo de Miesch A. T. (1976), como el cociente entre la varianza interlocalidades y la suma de las varianzas de los errores analíticos (disolución y lectura instrumental) resulta deseable obtener valores superiores a la unidad. En nuestro caso todos los valores exceden la unidad y los valores más pequeños se observan para el Ba, Be e Y.

Actualmente hemos implantado en la prospección geoquímica regional un sistema de control de información que considera independientemente las operaciones de muestreo, preparación, y análisis químico (puesta en solución y lectura instrumental). Esto requiere de un plan experimental de muestreo múltiple en los diferentes niveles de variación (Spangenberg J. 1983a, 1983b). El esquema de muestreo básico corresponde a un diseño jerárquico, estratificado desbalanceado que emplea un procedimiento de selección semialeatorio (figura 3).

Las muestras dobles se toman en suelos o sedimentos según lo señale el plano de prospección, con una frecuencia del 1%. Vale decir que una de cada cien estaciones de muestreo dará lugar a una muestra de control. En este punto de muestreo se recolecta la muestra ordinaria y en un segundo punto alejado del primero por no más de 100 m se recogen dos muestras distanciadas por un máximo de 5m. Una de estas últimas muestras da lugar a dos submuestras a analizar.

Dentro de los lotes de muestras a analizar se incluyen además muestras de referencia con una frecuencia del 1%.

En ocasiones la solución proveniente de la disgregación de las muestras de referencia es sometida a dos lecturas instrumentales lo que posibilita, como vimos, la discriminación entre la varianza de puesta en solución y la varianza espectrométrica, como componentes del error analítico.

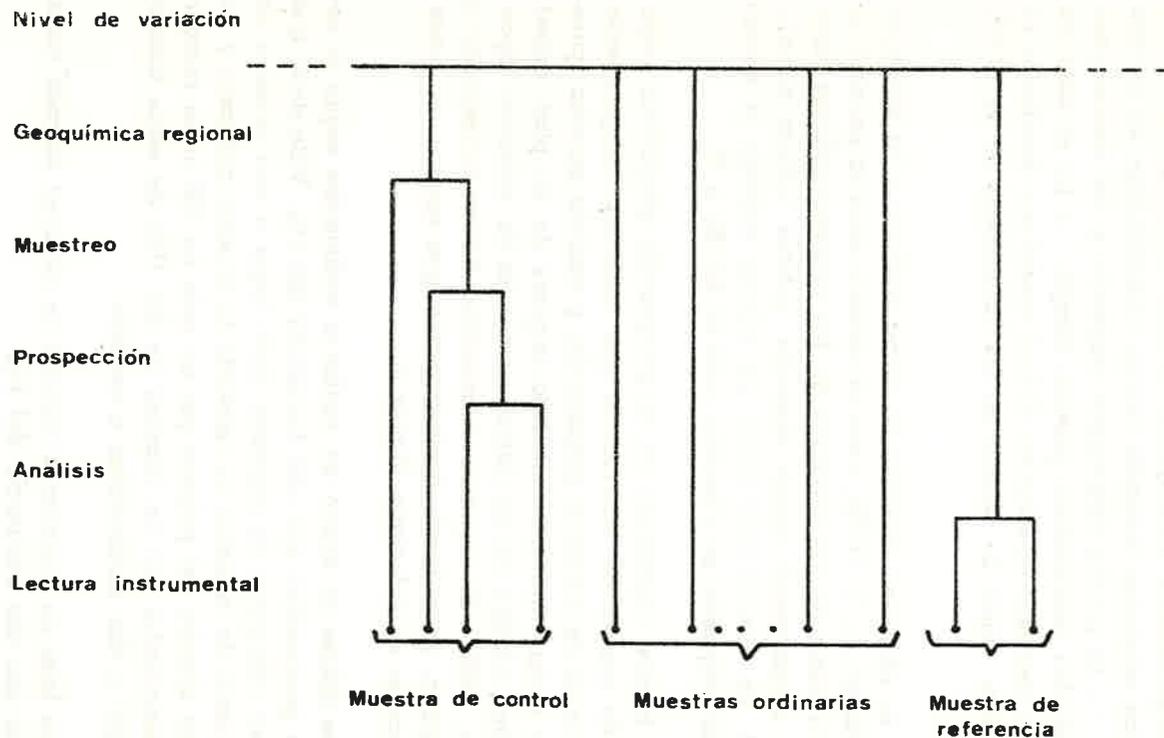


FIG. 3.: *Diseño del sistema de control de la información geoquímica en prospección estratégica.*

Este nuevo sistema de control monitorea estrechamente la señal geoquímica a interpretar, y en consecuencia es posible diferenciar claramente las variaciones geoquímicas reales de las fluctuaciones erráticas introducidas por los globalmente denominados errores de manipulación. El geoquímico puede interpretar entonces con alta fiabilidad a la información geoquímica en términos de variaciones del tenor de fondo y diferenciaciones posiblemente relacionadas a mineralizaciones.

2.6. *Tratamiento e interpretación de la información geoquímica*

En el marco de un programa de prospección geoquímica el análisis mutielemento da origen a una gran masa de información numérica.

La interpretación del conjunto de los resultados analítico se torna sumamente difícil por el uso de técnicas convencionales, que sólo permiten así que, el estudio particular de un determinado elemento permite revelar la presencia de muestras o grupos de muestras con tenores excepcionales; mientras que la consideración simultánea de varios elementos lleva tan sólo a retener alguna asociación particular de los mismos a nivel puntual. Ambos procedimientos pueden ser adecuados para delinear los caracteres más acentuados de las series de datos obtenidos. Sin embargo, son incapaces de conducir a una interpretación rigurosa de la información geoquímica global, pues no toman en cuenta al mismo tiempo a la totalidad de los datos químicos en relación con su estructura geográfica.

El objetivo del procesamiento de los datos es la determinación de las asociaciones de elementos que describen los fenómenos de diferenciación geoquímica, tanto petrológicos, litológicos, pedológicos etc., como de naturaleza metalogénica. El reconocimiento del tipo, extensión y forma de las zonas anómalas no es siempre inmediato, especialmente en el caso de cientos o aún miles de muestras analizadas para más de 20 elementos.

Sólo la consideración simultánea de todos los componentes informacionales geoquímicos y su estructura espacial, posibilita una interpretación objetiva y precisa del gran volumen de información numérica.

El tratamiento e interpretación de la información geoquímica mutielemento requiere entonces, en el marco de un estudio prospectivo, la aplicación de una serie de técnicas de análisis estadístico y representación cartográfica.

En la práctica, el empleo de un computador con un graficador automático asociado, nos permite tratar al conjunto de los datos numéricos por medio de programas informáticos desarrollados para las operaciones de cálculo estadístico y visualización.

En esta sección discutiremos rápidamente algunas de las técnicas de análisis estadísticos y de cartografía automática que empleamos en la D.I.N.A.M.I.G.E. durante la fase de interpretación de las prospecciones geoquímicas. Por un análisis más detallado de los diferentes métodos referimos al lector a un trabajo previo (Spangenberg J., 1984).

2.6.1 *Recolección y registro de la información*

COMPONENTES INFORMACIONALES

Los componentes informacionales en prospección geoquímica pueden clasificarse respecto a su conexión con el objeto del estudio en (Roche H. de la y Grandclaude Ph., 1972):

—*caracteres intrínsecos*: que son aquellos directamente determinados sobre el objeto descrito, como los elementos analizados y otros parámetros como el PH, Eh, ...;

—*caracteres extrínsecos*: que permiten definir las relaciones del objeto considerado con el medio ambiente natural que lo rodea; y comprenden la localización de las muestras (en coordenadas geográficas), y otros datos recolectados en la fase de muestreo: tipo de material, referencias sobre el cuadro geológico local, presencia de indicios, etc.

—*caracteres de conjuntura*: que informan sobre el tratamiento al que fue sometido el objeto. Estos caracteres son, accesorios y no conforman la señal a interpretar. Sin embargo, poseen una importancia en el desarrollo práctico del procesamiento de los datos principalmente en las etapas de recolección y registro de los mismos. Abarcan, por ejemplo, el objetivo del estudio, la identificación del prospector y del analista, la fecha de la toma de muestras y del análisis químico, la modalidad del muestreo y la técnica analítica empleada,...

Los caracteres intrínsecos, es decir las variables geoquímicas propiamente dichas, son interpretadas indefectiblemente en conjunción con los caracteres extrínsecos. De esta forma es posible examinar la información disponible en función de su repartición areal, la que se manifiesta como un relieve geoquímico en el cual se pueden reconocer los diferentes fenómenos geológicos activos en el sector estudiado.

REGISTRO DE LA INFORMACION. RECURSOS INFORMATICOS

La etapa inicial del procesamiento de los datos incluye el registro de los identificadores de las muestras (un número de cuatro dígitos único dentro de una zona geográfica) y su localización (coordenadas geográficas), la información adquirida en el campo sobre el ambiente de la estación de muestreo (cuadro geológico regional, litofacies locales, oro-hidrografía, naturaleza de los materiales de alteración superficial, tipo de muestras, etc.). En el campo esta información es recolectada bajo la forma de un código, de manera tal de facilitar su transferencia a la base de datos.

Las coordenadas son calculadas a partir del mapa de prospección, con el posicionamiento de los puntos de muestreo, mediante un digitalizador o en nuestro caso particular un coordinatógrafo, operando en modalidad fuera de línea.

Los datos analíticos obtenidos en el laboratorio son registrados a la salida del instrumento de medida por medio de un miniordenador con un dispositivo de almacenamiento (disco magnético). Una vez verificados, corregidos y estandarizados son transferidos al archivo de base, que quedará pronto para el análisis de los datos. El esquema de recolección, codificación y transferencia de datos es esencial para el desarrollo eficiente, preciso y económico del procesamiento de la información en la campaña de prospección geoquímica.

El archivo informático contiene los datos dispuestos en forma de una gran tabla rectangular denominada *matriz de información espacial*. Cada vector línea de esta matriz comprende los valores de los caracteres geoquímicos observados para cada muestra, y cada columna representa a una variable y es el vector de las concentraciones de un elemento para cada muestra. Un extracto de la edición de un archivo se muestra en la figura. 4.

Los programas de administración de archivo (creación, corrección, transformación, etc.) y de tratamientos estadísticos y cartográficos fueron en su gran mayoría transmitidos por el B.R.G.M., y han sido instalados y adaptados por personal de la DI.NA.MI.GE.

2.6.2. Tratamiento estadístico

En un estudio que concierne n muestras descritas por p indicadores geoquímicos puede representarse a cada muestra por un punto con p

INC.	X	Y	N. HO	FE2X	FA	PB	ZA	CO	NI	AS	OD	AG	SE	BA	P *
0001	627.015	371.436	156	4.18	538	13	102	64	28	20	1	0.2	20	303	682
0002	626.847	371.188	156	4.90	1595	14	58	25	19	20	1	0.2	20	465	256
0003	619.232	374.975	156	4.82	949	10	123	21	25	20	1	0.2	20	645	812
0004	618.860	375.051	156	4.40	1228	15	53	17	15	20	1	0.2	20	418	247
0005	619.586	378.967	156	3.25	409	11	53	16	16	20	1	0.2	20	384	256
0006	619.744	373.558	156	5.79	2509	15	118	22	21	20	1	0.2	20	726	575
0007	620.183	373.127	156	4.56	813	10	115	20	24	20	1	0.2	20	453	481
0008	620.581	373.205	156	4.69	912	11	61	18	18	20	1	0.2	20	442	383
0009	620.224	372.560	156	3.78	529	10	65	23	15	20	1	0.2	20	405	348
0010	620.450	372.578	156	7.16	2293	12	80	16	20	33	1	0.2	20	453	470
0011	620.289	375.065	156	4.32	444	18	107	27	23	20	1	0.2	20	451	233
0012	618.351	373.563	156	5.26	4808	21	69	15	27	20	1	0.2	20	395	412
0013	618.269	372.724	156	4.35	336	10	70	27	31	20	1	0.2	20	490	705
0014	619.028	372.012	156	5.38	1893	22	62	31	17	20	1	0.2	20	554	573
0015	618.786	371.965	156	8.58	2824	11	76	21	23	20	1	0.2	20	574	376
0016	619.002	372.515	156	5.21	530	10	58	23	27	20	1	0.2	20	482	258
0017	621.536	372.738	156	4.39	726	11	81	36	30	21	1	0.2	20	450	343
0018	621.660	373.555	156	8.42	1336	12	97	43	55	26	1	0.2	20	314	278
0019	618.632	368.883	156	6.52	1174	14	55	23	21	20	1	0.2	20	386	356
0020	619.456	369.433	156	6.45	1271	13	77	21	18	20	1	0.2	20	385	992
0021	619.659	369.611	156	5.28	2163	12	85	23	20	20	1	0.2	20	386	794
0022	619.282	370.355	156	2.77	783	10	53	42	14	20	1	0.2	20	320	435
0023	621.096	370.784	156	4.62	1374	13	77	15	17	20	1	0.2	20	371	401
0024	621.536	371.825	156	3.85	1837	14	85	19	16	20	1	0.2	20	430	604
0025	621.743	371.878	156	5.12	2648	18	93	23	22	20	1	0.2	20	602	378
0026	622.139	371.716	156	7.59	1548	12	72	32	31	20	1	0.2	20	514	665
0027	621.954	371.240	156	4.10	1979	13	107	24	27	20	1	0.2	20	546	346
0028	624.517	372.329	156	8.87	1783	24	83	35	39	20	1	0.2	20	564	715
0029	624.740	372.507	156	6.46	2940	14	106	32	43	20	1	0.2	20	382	409
0030	622.528	374.586	156	8.55	2720	16	96	25	26	20	1	0.2	20	363	599
0031	622.528	374.586	156	5.56	2490	10	105	26	19	20	1	0.2	20	611	633
0032	622.296	373.857	156	7.35	3168	21	141	45	51	31	1	0.2	20	387	564
0033	622.710	373.456	156	7.31	2187	15	112	59	43	20	1	0.2	20	475	426
0034	622.563	370.624	156	4.08	955	12	74	25	19	20	1	0.2	20	458	445
0035	622.847	311.014	156	4.80	1226	17	63	42	24	47	1	0.2	20	525	415
0036	623.391	370.879	156	16.79	1003	20	185	54	41	20	1	0.2	20	312	305
0037	622.810	370.025	156	4.49	1504	13	61	27	20	20	1	0.2	20	427	506
0038	623.402	368.817	156	8.40	400	33	72	32	26	20	1	0.2	20	494	780
0039	623.333	369.434	156	6.59	7214	20	195	34	32	20	1	0.2	20	443	454
0040	626.193	369.930	156	4.56	1272	17	81	28	25	20	1	0.2	20	375	483
0041	625.876	370.184	156	4.59	1599	15	55	19	21	20	1	0.2	20	470	405
0042	624.994	370.257	156	5.72	501	21	80	26	22	20	1	0.2	20	452	418
0043	624.907	370.780	156	5.16	1620	15	65	39	21	20	1	0.2	20	434	510
0044	625.486	370.781	156	4.72	847	10	49	25	16	20	1	0.2	20	365	419
0045	624.916	371.282	156	3.62	1604	14	67	21	14	20	1	0.2	20	453	548
0046	625.729	371.674	156	5.62	999	10	125	36	29	20	1	0.2	20	353	475
0047	625.459	371.845	156	6.78	710	18	98	82	26	20	1	0.2	20	443	296
0048	621.466	369.205	156	4.50	1709	12	73	15	15	20	1	0.2	20	527	728
0049	622.392	369.272	156	4.73	2334	17	125	34	29	20	1	0.2	20	257	298
0050	624.925	369.055	156	4.45	212	15	55	23	24						

FIG. 4

INC.	X	Y	B	BE	SA	NC	W	Y	NB	V	NI	CO	CR	RAD.	PH *
0001	627.015	371.436	21	2	20	2	10	31	14	161	28	10	56	100	
0002	626.847	371.188	16	2	20	2	10	17	10	90	19	18	46	100	
0003	619.232	374.979	12	2	20	2	10	21	10	59	25	10	47	100	
0004	618.860	375.051	11	2	20	2	10	18	10	79	15	12	38	100	
0005	619.586	373.587	11	2	20	2	10	32	10	64	16	10	42	100	
0006	619.744	373.598	12	2	20	2	10	28	10	70	21	13	41	100	
0007	620.188	373.127	12	2	20	2	10	24	10	69	24	10	37	60	
0008	621.581	373.205	14	2	20	2	10	16	10	80	18	12	48	60	
0009	620.224	372.560	10	2	20	2	10	21	10	80	15	10	41	80	
0010	620.450	372.573	10	1	20	2	10	19	10	55	20	23	30	80	
0011	620.289	375.065	16	3	20	2	10	30	10	86	23	13	70	150	
0012	618.351	373.563	10	2	20	2	10	21	10	63	27	25	59	100	5.5
0013	618.289	372.724	11	1	20	2	10	27	10	71	31	10	81	80	
0014	619.028	372.012	16	2	20	2	10	30	10	92	17	12	52	80	
0015	618.786	371.969	10	1	20	2	10	23	10	64	23	13	42	80	
0016	619.002	372.519	13	2	20	2	10	31	10	86	27	10	55	80	
0017	621.536	373.739	12	1	20	2	10	16	10	100	30	12	74	80	
0018	621.660	373.559	10	1	20	2	10	20	10	156	55	21	180	80	
0019	618.632	368.883	10	2	20	2	10	25	10	69	21	14	48	100	
0020	619.496	369.433	10	1	20	2	10	29	10	63	18	14	33	100	
0021	619.699	369.611	10	1	20	2	10	28	10	58	20	11	38	100	
0022	619.282	370.355	10	2	20	2	10	28	10	56	14	10	33	80	
0023	621.096	370.784	10	2	20	2	10	22	10	56	17	10	38	100	5.5
0024	621.536	371.825	10	1	20	2	10	23	10	57	16	11	36	100	5.0
0025	621.743	371.878	11	2	20	2	10	20	10	70	22	18	47	100	6.0
0026	622.139	371.718	16	2	20	2	10	20	10	109	31	13	70	120	
0027	621.954	371.240	13	3	20	2	10	26	10	81	27	10	51	120	
0028	624.517	372.329	12	2	20	2	10	23	10	101	39	24	43	100	5.5
0029	624.740	372.507	13	2	20	2	10	27	10	94	43	16	36	120	
0030	622.218	374.808	13	2	20	2	10	28	10	66	26	14	51	80	
0031	622.528	374.586	16	2	20	2	10	26	10	55	19	10	63	80	
0032	622.296	378.857	15	2	20	2	10	21	10	109	51	28	78	80	
0033	622.710	373.496	16	2	20	2	10	23	10	115	43	21	95	80	
0034	622.568	370.624	10	2	20	2	10	18	10	77	19	10	42	100	5.5
0035	622.847	371.014	10	2	20	2	10	27	10	121	24	10	54	100	
0036	623.391	370.379	10	3	20	2	10	36	10	124	41	14	49	150	5.5
0037	622.810	370.025	10	2	20	2	10	18	10	81	20	10	37	100	
0038	623.402	369.817	10	2	20	2	10	24	10	86	26	10	44	100	5.5
0039	628.333	369.434	10	3	20	2	10	36	10	65	32	15	43	100	
0040	626.193	369.930	14	2	20	2	10	16	11	116	25	14	56	100	
0041	625.576	370.134	12	2	20	2	10	13	10	84	21	20	45	100	
0042	624.994	370.257	16	3	20	2	10	19	10	108	22	10	59	100	5.5
0043	624.907	370.780	10	2	20	2	10	26	10	107	21	10	45	100	5.5
0044	625.486	370.731	14	2	20	2	10	10	10	84	16	10	57	100	
0045	624.916	371.282	10	2	20	2	10	39	10	72	14	10	33	100	
0046	625.729	371.674	10	3	20	2	10	27	10	84	29	10	48	100	
0047	625.459	371.845	10	2	20	2	10	32	16	170	26	10	49	100	5.5
0048	621.466	369.205	10	2	20	2	10	23	10	63	15	10	31	100	
0049	622.392	369.272	10	2	20	2	10	29	10	78	29	11	46	100	5.5
0050	624.925	365.055	10	2	20	2	10	15	10	79	24	10	47	100	5.5

FIGURA 4

coordenadas en el espacio vectorial RP y cada variable por un punto en Rn . La tabla de datos es entonces una matriz $X_{n,p}$ con n generalmente mucho mayor que p .

Siendo así, los métodos estadísticos van a estudiar la nube de puntos en RP o Rn , examinando la distancia entre los individuos (muestras) o entre las variables (elementos, Eh , pH , ...).

Durante el análisis estadístico de la información originada en un trabajo de reconocimiento geoquímico, hablamos con frecuencia de poblaciones geoquímicas y de clases o grupos geoquímicos. Recordemos estos conceptos.

Una población geoquímica es un conjunto general abstracto infinito de valores de la concentración de un elemento químico, que representa la distribución regular, en el sentido estadístico, de dicho elemento en una unidad natural bien definida (formación geológica, litología específica, etc.).

En la realidad, las poblaciones geoquímicas se estudian mediante un número limitado de observaciones, patentizado en las operaciones de toma y análisis químico de muestras de un material superficial determinado. El conjunto de estas observaciones conforman una clase o grupo geoquímico y equivalen al concepto estadístico de muestra.

A cada unidad geoquímica le corresponde entonces una población geoquímica, para el tipo de muestras y elementos considerados, que en la práctica es representada por un grupo geoquímico.

En varios textos se encuentran desarrollos detallados sobre los métodos de análisis estadísticos de datos geológicos; citamos a Krumbein W. y Graybill F. (1965); Vistelius A. (1967); Koch G. y Link R. (1970, 1971); Laffitte P. (1972); Davis J. (1973); Agterberg F. (1974); Guillaume A. (1977), entre otros.

Los métodos estadísticos pueden dividirse en descriptivos e inferenciales o previsionales. Los descriptivos expresan los datos de manera tal de dar una imagen sintética más fácilmente interpretable que los valores originales; recurriendo a parámetros característicos y representaciones gráficas. Las técnicas inferenciales estiman a partir de la muestra, las propiedades de la población geoquímica de la cual es representativa. Ambos métodos son de gran utilidad cuando van acompañados de la evidencia y la experiencia geológica.

Empleados en conjunto de manera interactiva permiten al geoquímico poner de manifiesto en la información multielemento caracteres sutiles, pero importantes para la interpretación, no revelados por los datos brutos.

No obstante, la aplicación de la estadística matemática en exploración geoquímica puede ser sometida a fuertes críticas desde un punto de vista teórico estricto. En la práctica no es siempre sencillo realizar inferencias, las cuales implicarían el planteamiento y la justificación de un cierto número de hipótesis estadísticas, que no siempre son cumplidas por los datos geológicos, generalmente muy complejos y heterogéneos. Se obtienen simplemente "indicaciones" y preferimos hablar de análisis cuasiestadístico o protoestadístico, considerado una excelente herramienta para la resolución de problemas concretos en prospección geoquímica (Davis J. 1974; Chapman R. P., 1978; Spangenberg J., 1984). La validez de los resultados de un tratamiento surge de la evaluación crítica de las conclusiones extraídas del mismo y de su significación física.

Distinguimos tres tipos de tratamientos estadísticos:

—el examen de la distribución estadística de cada carácter geoquímico (análisis monovariable);

—el estudio de las intercorrelaciones entre las muestras o los elementos tomados de dos en dos (análisis bivariable);

—las técnicas multidimensionales que conciernen simultáneamente a la totalidad de los datos y consideran la proximidad entre las muestras o las variables geoquímicas (análisis multidimensional).

2.6.2.1. *Estudio estadístico de las distribuciones experimentales de los elementos*

—Parámetros de distribución y momentos empíricos

Para la caracterización numérica de las distribuciones de las variables geoquímicas se emplea un cierto número de parámetros, entre los cuales distinguimos los parámetros de posición o tendencia central y los parámetros de dispersión.

Un programa informático determina el efectivo de muestras, el intervalo de variación (valores mínimo y máximo), la media aritmética, la desviación estándar, el coeficiente de variación (desviación estándar relativa), la media geométrica y la desviación geométrica y las presenta en una tabla (ver figura 5).

PARAMETROS ESTADISTICOS ELEMENTALES

PROSPECCION GEOQUIMICA ESTRATEGICA

ELEMENTO	MUESTRAS NUMERO DE	MINIMO VALOR	MAXIMO VALOR	MEDIA ARITM.	DESVIAC. ESTANDAR	COEFICIENTE VARIACION	MEDIA GEOMET.	DESVIACION GEOMET.
FE2X	733	1.54	16.79	5.34	1.99	0.37	4.99	1.45
MN	733	106.00	8.520.00	1.328.85	1.112.34	0.84	1.030.96	2.02
BA	733	135.00	1.310.00	548.55	185.83	0.34	517.15	1.41
P	733	68.00	992.00	399.73	160.35	0.40	369.50	1.50
V	733	24.00	413.00	80.31	39.72	0.49	73.91	1.47
E	733	10.00	25.00	10.79	1.92	0.18	10.65	1.18
AS	733	20.00	75.00	20.34	3.62	0.18	20.19	1.10
PE	233	10.00	95.00	16.67	9.80	0.59	14.90	1.55
ZN	733	22.00	215.00	79.21	25.41	0.32	75.31	1.38
CU	733	10.00	98.00	25.27	13.54	0.54	22.62	1.58
NI	733	10.00	280.00	34.43	28.16	0.82	26.65	2.01
CR	733	11.00	648.00	72.94	62.08	0.85	55.90	2.03
AG	733	0.20	0.60	0.20	0.03	0.15	0.20	1.06
SN	733	20.00	24.00	20.01	0.16	0.01	19.99	1.09
MJ	733	2.00	7.00	2.01	0.20	0.10	2.01	1.06
CD	733	10.00	52.00	14.61	6.42	0.44	13.57	1.44
BE	733	1.00	9.00	2.24	0.94	0.42	2.08	1.47
CD	733	1.00	2.00	1.00	0.05	0.05	1.00	1.03
Y	733	5.00	88.00	27.01	11.21	0.42	24.04	1.51
NB	733	10.00	23.00	10.10	0.84	0.08	10.07	1.10
PH	368	5.00	8.00	6.49	0.53	0.08	6.46	1.15
RAD.	733	40.00	200.00	88.06	23.84	0.27	84.90	1.32

FIGURA 5

Según la tendencia normal o logaritmonormal de la distribución estadística del elemento se usarán los parámetros aritméticos o los geométricos respectivamente.

En ciertas ocasiones se recurre a otros parámetros de posición como la moda y la mediana, estimatrices del valor central relativamente robustas.

La forma de las distribuciones se examina por medio de coeficientes que cunifican la asimetría y curtosis, como los coeficientes de Fisher y de Pearson.

—Representación gráfica de las distribuciones

Una de las primeras etapas en el tratamiento estadístico de una serie de datos geoquímicos es la determinación de las distribuciones estadísticas de los tenores de los elementos analizados. Las distribuciones se obtienen a partir de los datos por su ordenamiento ascendente en clases de una cierta amplitud. En los programas computacionales las clases se evalúan a partir del intervalo de variación de la variable y un determinado número de clases, parámetro cuya elección es delicada (Spangenberg J. 1984).

Los diagramas que permiten representar la distribución de cada elemento pueden ser diferenciales, histogramas, donde a cada intervalo de clase de los tenores le corresponde un rectángulo cuya área es proporcional a la frecuencia de la clase, o sino integrales, como las curvas de frecuencias acumuladas, que representan a la función de repartición de la variable.

La función de repartición es una estimación de la función de densidad de probabilidad de la población geoquímica, posibilita el ajuste de la distribución experimental a una ley modelo, en particular la ley normal y la ley logaritmonormal.

En exploración geoquímica los fenómenos activos sobre el material muestreado son tan variados y complejos, que las distribuciones observadas son mixtas, asimétricas, leptocúrticas y con frecuencia plurimodales. En consecuencia es muy difícil ajustarlas a una distribución modelo.

El examen de los histogramas calculados brinda información sobre la homogeneidad o heterogeneidad de los datos, la ley de referencia que a priori se ajusta mejor a la distribución del elemento, y también es esencial para la definición de los tenores de fondo geoquímico y los valores anómalos. A partir de la función de repartición o curva de frecuen-

cias acumuladas se puede estimar la probabilidad de ocurrencia de un determinado tenor o, lo que es aún más importante, la concentración del elemento cuyo valor es superado por un determinado porcentaje de las observaciones.

—Ajuste de un modelo a las distribuciones. El uso de transformaciones.

En geoquímica, las distribuciones de referencia más usadas son la normal y la logaritmonormal o de Galton. Es así que, previo a los tratamientos estadísticos (análisis de varianza, cálculos de correlación y regresión, análisis factorial, etc.) se suele emplear la transformación logarítmica simple o alguna generalización de esta (Spangenberg J., 1984).

Las distribuciones geoquímicas están compuestas por varias poblaciones agregadas, que representan factores naturales bien definidos, fenómenos litológicos, petrográficos, pedogenicos, metalogénicos, etc., La distribución de frecuencias no puede disociarse de su distribución espacial.

Previo al tratamiento estadístico de la totalidad de la información, es conveniente realizar una partición de los datos según unidades o estratos geoquímicos homogéneos. Para ello se hace uso de los caracteres extrínsecos que codifican el cuadro geológico local de cada estación de muestreo, al igual que la naturaleza del material muestreado.

El empleo indiscriminado de la transformación logarítmica de los datos, propuesta por Ahrens L. H. (1954) como una ley fundamental en geoquímica, puede conducir entonces a parámetros estadísticos aberrantes que distorsionan los resultados de la mayoría de los tratamientos basados en ellos (Chapman R. P., 1976a, 1976b, 1977; Spangenberg J., 1984).

El inconveniente mayor de la transformación logarítmica es que puede llevar a errores de interpretación al resaltar las poblaciones geoquímicas de fondo y tender a suprimir las anómalas. Esto fusiona aún más ambos tipos de poblaciones, complicando la forma de la distribución y tornando más difícil la identificación de las anomalías geoquímicas.

No obstante, se han obtenido buenos resultados suponiendo un comportamiento lognormal de las series de datos originadas en estudios de prospección, lo que explica junto a la simplicidad de la función logarítmica que sea la transformación mejor adaptada al tratamiento de datos geoquímicos (Tennant C. B. et al, 1959; Sinclair A. J., 1974; Miesch A. T. 1977).

Finalmente diremos que los test de bondad de ajuste más empleados en la D.I.N.A.M.I.G.E son el test de chi-cuadrado y el test de anamorfosis de Henry. En este último se realiza una transformación gráfica de la función de repartición de la distribución utilizando papel gauusso-aritmético o gauusso-logarítmico. Las frecuencias acumuladas se representan en ordenadas según una escala gauussiana y en abscisas se disponen los tenores en una escala aritmética; logarítmica o potencial.

Si las concentraciones del elemento siguen la ley de distribución su-puesta, su función de repartición se anomorfosa en una recta. Esta repre-sentación gráfica posibilita la evaluación de los parámetros de la distri-bución (figura 6).

—Determinación estadística de los tenores de fondo geoquímicos y anomalías geoquímicas.

El objetivo y función de la prospección geoquímica son el reconoci-miento de zonas anómalas, o anomalías geoquímicas, relacionadas con una mineralización. Esto implica el conocimiento previo de los tenores de fondo normales de los elementos estudiados en la unidad geoquímica.

El tenor de fondo corresponde a la concentración normal del elemen-to en el material geológico superficial estudiado, no asociado a un cuer-po mineralizado. Este valor varía con el material primario y el medio secundario.

La distribución de un determinado elemento en el material de al-teración superficial, dentro de un medio litológicamente uniforme, va a depender de las fluctuaciones en la composición de la roca madre, cam-bios en los fenómenos pedogenéticos, acumulaciones locales de mate-ria orgánica, de óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso, y de la va-rianza propia del dispositivo de observación. Esto conduce a que defina-mos, en lugar de un valor único, a un intervalo de tenores de fondo nor-males.

Una vez establecidos los valores de fondo en un medio determinado, es posible reconocer las muestras anómalas cuyos tenores difieren sig-nificativamente de los normales.

El valor crítico, por encima del cual las observaciones son considera-das anómalas, es en el caso más simple el límite superior de las fluc-tuaciones del tenor de fondo. Desde un punto de vista estadístico implica definir el límite crítico L_j del elemento X_j , para una serie de efectivo ele-vado ($n_j > 30$) como:

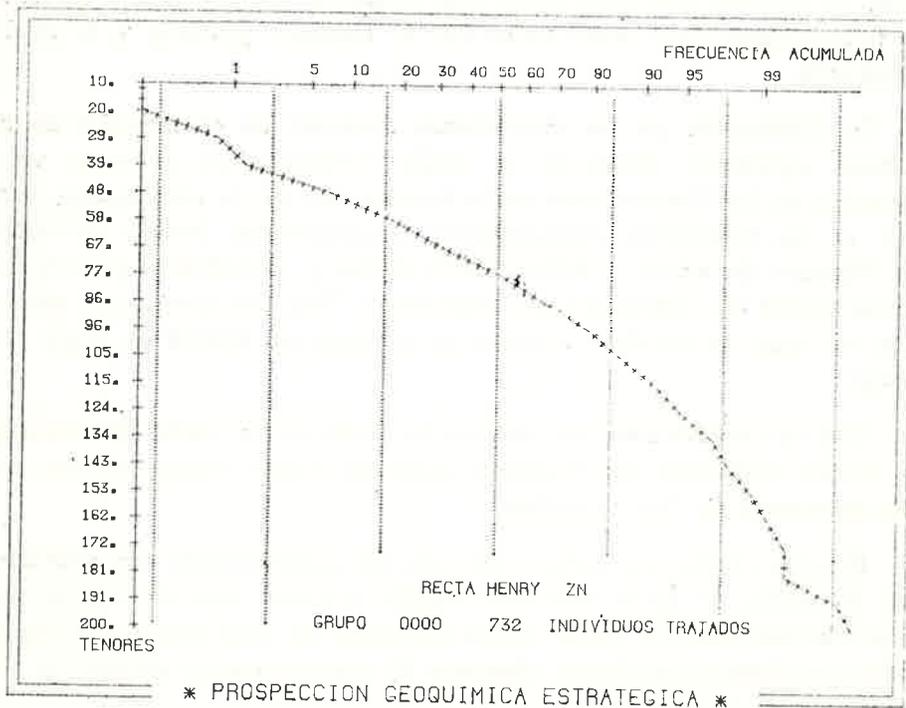
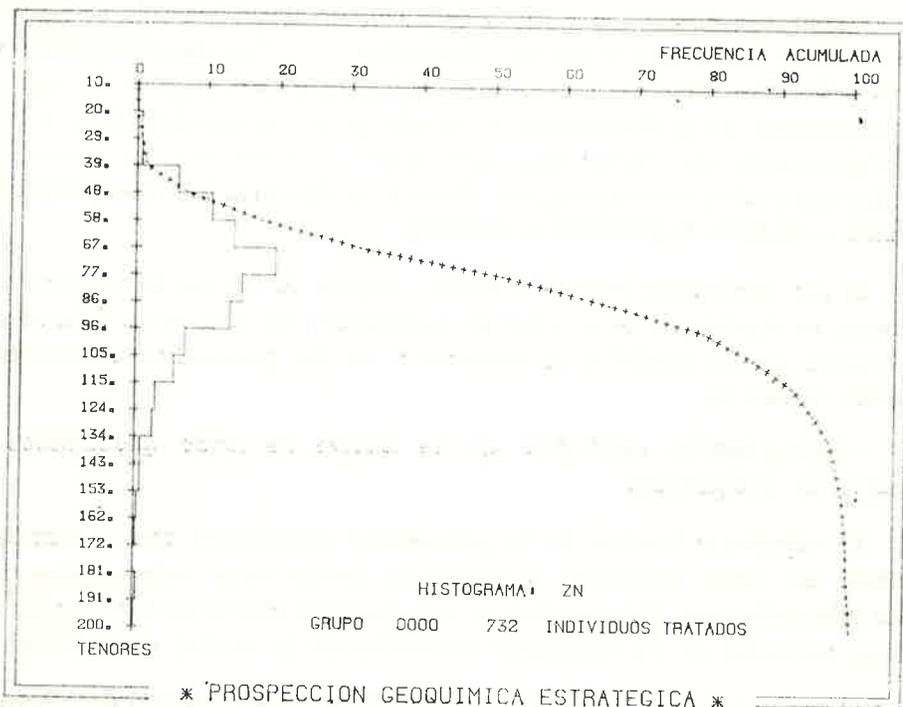


FIG. 6

$L_j = x_j + 2 s_j$ — distribución de tendencia normal

$L_j = G_j E_j^2$ — distribución de tendencia logarítmonormal,

que ocasiona en distribuciones simétricas la retención de un 2.5% del total de muestras (Hawkes H. E. y Webb J. S., 1962).

Cuando la distribución empírica es irregular, se recomienda la exclusión de los valores aberrantes antes de proceder al cálculo de los estadísticos.

En la práctica esto carece de significado, pues las distribuciones experimentales son complejas y surgen de una mezcla de varias poblaciones geoquímicas de tendencia normal o lognormal, representativas tanto de procesos geológicos normales como anómalos. Cuanto más poblaciones configuran la distribución empírica, tanto más compleja se torna la selección objetiva de los tenores de fondo y de los límites críticos. En general empleamos la selección de varios niveles críticos, ya sea en base a los parámetros de la distribución (media más un cierto número de veces la desviación estándar), o a partir de las inflexiones del diagrama de Henry. Los valores obtenidos los ajustamos mediante el trazado de mapas de anomalías geoquímicas. Una vez optimizados los límites críticos tomando en cuenta las evidencias geológicas, los mapas resultantes revelan agrupaciones de muestras anómalas de buena coherencia espacial y anomalías puntuales. La jerarquización y selección de las anomalías para la continuación de los trabajos de exploración minera surge indefectiblemente del examen simultáneo de los mapas de anomalías de todos los elementos prospectados y de los elementos indicadores del tipo de litología o de determinadas mineralizaciones, y de consideraciones lito- y pedogeoquímicas, metalogénicas, etc. Algunas anomalías puntuales se revelarán como fluctuaciones erráticas locales de la señal geoquímica, carentes de filiación con un cuerpo mineralizado.

2.6.2.2. *Determinación de la relación entre dos variables*

El análisis de la variación simultánea de las variables geoquímicas se lleva a cabo por medio de representaciones gráficas y cálculos de coeficientes, que miden la intensidad de la dependencia entre ambas.

—Coeficiente de correlación lineal.

El coeficiente de correlación lineal de Bravais-Pearson mide la covariación entre dos elementos. Es un parámetro que varía entre -1 y $+1$, valores que adopta cuando la intercorrelación entre las variables es perfectamente lineal.

Cuando el coeficiente es positivo se habla de una correlación lineal directa y los dos elementos covarían en el mismo sentido; y cuando es negativo la correlación se dice inversa. Un coeficiente igual a cero manifiesta que no existe una relación lineal entre ambos elementos, si bien puede existir otro tipo de dependencia. Entre los valores límite de -1 y $+1$ (relación funcional lineal) y 0 (independencia en lo referente a linealidad) este coeficiente puede tomar infinitos valores cuya interpretación requiere sumo cuidado.

En prospección multielemento los coeficientes de correlación entre los diferentes elementos se representan en una tabla de doble entrada, denominada matriz de intercorrelaciones (figura 7).

—Diagramas de repartición binaria

La representación de las muestras en una gráfica cartesiana, donde las coordenadas son las concentraciones de las variables en cuestión, permite el examen de la interdependencia de los elementos (figura 8). La distribución de las muestras en dicho plano puede ser al azar si las variables son independientes, o pueden repartirse formando una elipse más o menos alargada, que indica la existencia de una cierta correlación entre las dos variables estudiadas. En el caso extremo de un segmento rectilíneo, la dependencia funcional es lineal y es posible obtener una expresión analítica para esta relación, ajustando la ecuación de una recta a la nube de puntos por el método de los mínimos cuadrados.

Con frecuencia, el diagrama binario pone en evidencia la heterogeneidad de la distribución de los tenores, lo que se manifiesta como agrupaciones de muestras más o menos solapantes, de diferente comportamiento geoquímico respecto a los dos elementos considerados.

El examen de las representaciones gráficas es de gran ayuda en la evaluación de los coeficientes de correlación lineal. Un coeficiente débil puede ocultar una fuerte dependencia no lineal. Por consiguiente, un coeficiente bajo no debe ser interpretado como una ausencia de relación entre los dos elementos. El trazado del diagrama binario revela la naturaleza de la intercorrelación (lineal, cuadrática, exponencial, ...).

El uso de la transformación logarítmica realza las asociaciones a nivel de los fondos normales de los elementos, suprimiendo las que son representativas de mineralizaciones.

La realización del cálculo del coeficiente de correlación a partir de los tenores transformados logarítmicamente o directamente en base a los

• MATRIZ DE CORRELACION •

NÚMERO DE INDIVIDUOS = 733

• ANCPRES •	FEZK •	MY •	DA •	• P •	CU •	P3 •	ZN •	CR •	NI •	CC •	V •	BE •	Y •	RAC •
• FEZK •	1.00	0.22	-0.14	0.15	0.50	-0.06	0.49	0.39	0.43	0.58	0.64	-0.05	0.29	-0.19
• MY •	0.32	1.00	0.15	0.11	0.09	0.26	0.31	-0.12	-0.03	0.50	0.31	-0.04	0.02	-0.03
• DA •	-0.14	0.15	1.00	-0.04	-0.27	0.31	-0.11	-0.02	-0.01	0.37	-0.19	0.25	0.12	0.17
• P •	0.19	0.11	-0.04	1.00	0.13	0.01	0.31	-0.04	0.02	0.30	0.31	0.11	0.06	0.08
• CU •	0.50	0.09	-0.27	0.13	1.00	-0.05	0.45	0.36	0.39	0.34	0.62	-0.07	0.20	-0.16
• P3 •	-0.06	0.26	0.31	0.01	-0.05	1.00	-0.08	-0.29	-0.28	0.31	-0.15	0.56	0.33	0.27
• ZN •	0.49	0.31	-0.11	0.31	0.45	-0.08	1.00	0.29	0.39	0.37	0.23	0.03	0.19	-0.08
• CR •	0.39	-0.12	-0.02	-0.04	0.36	-0.29	0.29	1.00	0.96	0.45	0.38	-0.15	0.20	-0.18
• NI •	0.43	-0.03	-0.01	0.02	0.35	-0.28	0.39	0.96	1.00	0.51	0.37	-0.15	0.21	-0.23
• CC •	0.58	0.50	0.07	0.06	0.34	0.01	0.37	0.45	0.51	1.00	0.47	-0.13	0.12	-0.16
• V •	0.64	0.01	-0.19	0.01	0.62	-0.15	0.23	0.38	0.37	0.47	1.00	-0.13	0.22	-0.22
• BE •	-0.05	-0.04	0.25	0.11	-0.07	0.56	0.03	-0.15	-0.15	-0.13	-0.13	1.00	0.22	0.32
• Y •	0.29	0.02	0.12	0.06	0.20	0.03	0.19	0.20	0.21	0.12	0.22	0.22	1.00	-0.07
• RAC •	-0.19	-0.03	0.17	0.06	-0.16	0.27	-0.08	-0.18	-0.23	-0.16	-0.22	0.32	-0.07	1.00

FIG. 7

valores brutos dependerá, en primer lugar, de las características del diagrama binario y del objetivo del estudio de las relaciones entre las variables.

2.6.2.3. Análisis estadístico multivariable

Las técnicas estadísticas multivariadas toman en cuenta simultáneamente a varias variables, posibilitando una mejor aproximación a la realidad compleja de los fenómenos geoquímicos. El objetivo esencial de este tipo de tratamientos es reducir el gran volumen de datos numéricos contenido en la matriz de información espacial a una forma más sintética y simple de interpretar.

Una extensa variedad de métodos de análisis descriptivo multidimensional es potencialmente aplicable para la interpretación de los datos geoquímicos multielementos. Presentaremos rápidamente cuatro técnicas fundamentales del análisis multivariable, operacionales en la D.I.N.A.M.I.G.E.:

—la regresión múltiple, que busca relaciones explicativas entre varios elementos;

—el análisis factorial, cuyo objetivo es dar una imagen simplificada de la información disponible;

—los métodos de clasificación de muestras o variables según un criterio de distancia definido; y

—el análisis discriminante, que pone en evidencia, en base a caracteres explicativos cuantitativos, el criterio de clasificación cualitativo de un modelo impuesto.

* CORRELACION COBRE-ZINC *

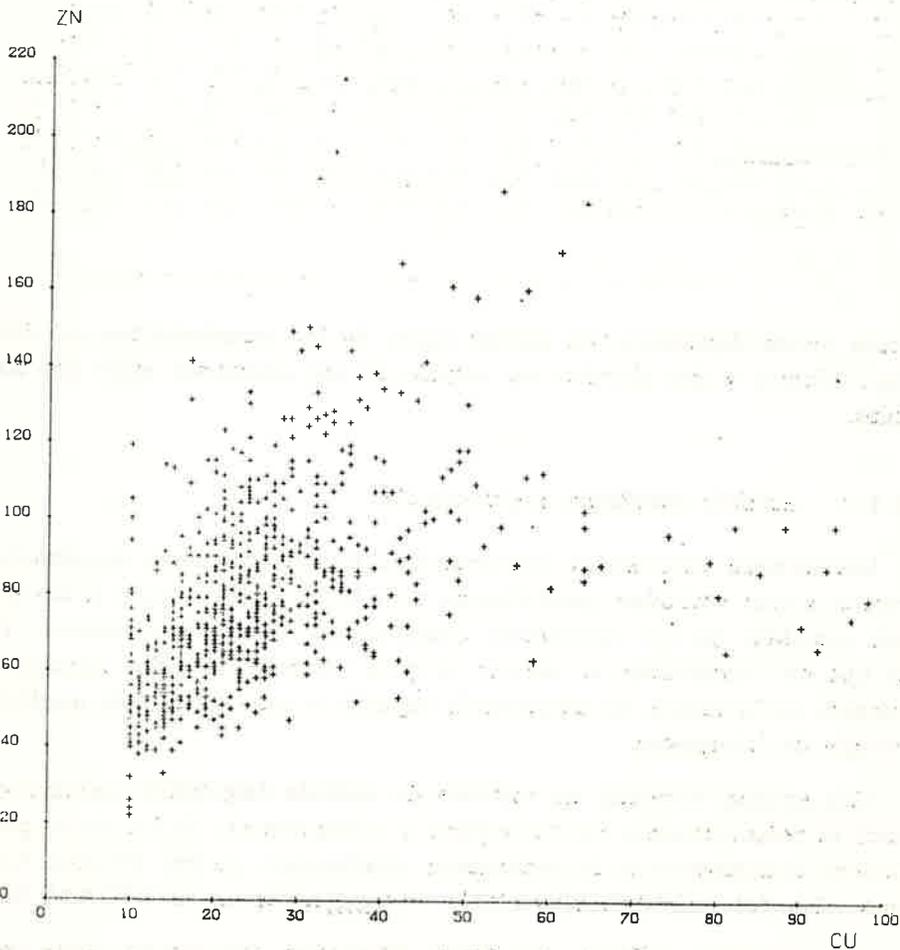


FIG 8

—Regresión múltiple

La regresión múltiple permite explicar la variabilidad de un carácter geoquímico, denominado variable explicada, según un modelo lineal en función de una o más variables, llamadas explicativas o regresoras.

En la práctica hay diferentes formas de proceder (regresión regresiva, regresión progresiva, regresión paso a paso, regresión condicionada; ...) para la obtención de un modelo lineal adecuado, una vez conocida la variable geoquímica a explicar y el conjunto de variables predictoras.

Las diferentes técnicas de regresión múltiple son utilizadas en geoquímica conjuntamente con la matriz de intercorrelaciones para estudiar la dependencia de los elementos trazas respecto a los macrocomponentes, la materia orgánica, óxidos de hierro y manganeso, algún carácter geoquímico fundamental como el pH, o asimismo otros elementos trazas.

En prospección geoquímica se suele apreciar las técnicas de regresión en la etapa de selección de anomalías. Mediante un tratamiento de este tipo es posible diferenciar los tenores anómalos del metal de base prospectado, relacionados a la presencia de una mineralización, de los valores elevados parásitos, originados por fenómenos de diferenciación geoquímica tanto litológicos como pedogenéticos. Los tenores residuales se obtienen por diferencia de los valores estimados a partir de las variables geoquímicas, que describen el ambiente normal del sector, y los tenores medidos. Estos valores residuales van a representar la concentración del metal no asociada a las variaciones del fondo geoquímico y, por consiguiente, significativa desde un punto de vista metalogénico.

Para una discusión completa y ejemplos remitimos a la bibliografía (Spangenberg J., 1984 y sus referencias).

—Análisis factorial

Este método tiene como finalidad la descripción sintética de vastas tablas de datos complejos, redundantes y difícilmente interpretables. Las matrices de correlación son en algunas ocasiones de grandes dimensiones, y no pueden analizarse directamente. Una forma de resumirlas es mediante la creación de nuevas variables, menos numerosas que el conjunto inicial, cuyas fluctuaciones van a describir lo esencial de la variación de los caracteres originales. En prospección geoquímica multielemento existen generalmente una serie de correlaciones, que reflejan el

efecto de determinados fenómenos geoquímicos o simplemente la covariación con un carácter pedogeoquímico directriz (pH, contenido en arcillas, en óxidos de hierro y manganeso, proporción de materia orgánica, ...). El objetivo del estudio del análisis factorial es reducir la complejidad del conjunto de datos interdependientes contenidos en la matriz de información geoquímica inicial por medio de un número inferior de variables que combinan a aquellos elementos fuertemente correlacionados.

Existe una amplia bibliografía sobre la teoría y aplicaciones de este método estadístico multidimensional. Aquí citamos los dos artículos introductorios de Cattell R. E. (1965) y el texto fundamental de Harman H. (1976).

En la DINAMIGE. aplicamos para la interpretación de los datos de prospección geoquímica una técnica particular del análisis factorial, conocida como análisis en componentes principales (ACP), cuya modalidad R es sumamente útil en la descripción de la matriz de las intercorrelaciones entre los elementos. Varias discusiones detalladas de la teoría de este método se encuentran en la bibliografía (Klován J. E., 1975; Lebart L. et al, 1977; Lefebvre J., 1980).

Dada la matriz de información, X_n, P' el problema del ACP es determinar las m combinaciones lineales de las p variables geoquímicas, con m mucho menor que p , que describan a las muestras con una pérdida de información mínima. Estas combinaciones lineales, llamadas factores o componentes principales no se definen directamente de la tabla de datos brutos, sino que a partir de la matriz de dispersión.

Los factores que van a resumir mejor la tabla original de datos son los vectores propios de la matriz de correlación, y los valores propios correspondientes dan el porcentaje de varianza explicada por cada uno de ellos. En la práctica elegimos de antemano un número determinado de componentes principales, en base a las asociaciones observadas en la matriz de correlación y el conocimiento previo de los fenómenos geológicos preponderantes en el sector estudiado. El ACP reemplaza entonces los p caracteres geoquímicos iniciales por un número inferior, m , de variables hipotéticas, que corresponden a los m primeros ejes principales de la nube hiperelipsoidal de las muestras en el espacio RP de los caracteres geoquímicos.

Los vectores propios, ponderados por sus valores propios, conducen a las saturaciones o coeficientes de ponderación de las variables originales. Sus valores varían entre $+1$ y -1 , que son los casos extremos de co-

relación directa e inversa con los factores, y o corresponde al caso de independencia. Las coordenadas de las muestras sobre los ejes factoriales permiten estudiar la significación de los factores, y dan la posición de las muestras en el nuevo espacio Rm.

Con el fin de facilitar la interpretación de los componentes principales, el programa de ACP rota a los ejes factoriales según un criterio predeterminado, para obtener una estructura simple (ver una discusión de los distintos métodos de rotación de Harman H. H., 1976).

La interpretación de los resultados del ACP se lleva a cabo examinando la correlación de las variables geoquímicas con cada factor. Para esto se estudia tanto la tabla de saturación como las representaciones de los puntos-variables en el plano de los ejes factoriales tomados de dos en dos (figuras 9 y 10).

En prospección geoquímica multielemento, el ACP en modo R es empleado para estudiar las asociaciones de los elementos trazas en el material muestreado. Las asociaciones de elementos, que manifiestan los factores, representan a determinados facies litológicos y asimismo mineralizaciones, y a los fenómenos superficiales de dispersión geoquímica.

La simplificación considerable de los datos permite inferir más fácilmente los factores causales de su variabilidad. Así por ejemplo, el uso del análisis factorial asociado a la representación cartográfica de las coordenadas factoriales es de gran ayuda en la interpretación de la distribución de metales asociados a una mineralización y a un determinado tipo de litología. ACP es capaz de diferenciar, por medio de asociaciones de elementos particulares, los tenores anómalos directamente relacionados a un cuerpo mineralizado de las anomalías formacionales.

—Métodos de clasificación automática

Una vez que la información geoquímica ha sido examinada por los métodos de análisis de datos anteriormente descritos, puede ser muy útil llevar a cabo una agregación de las variables (modo R) y también de los individuos (modo Q) que presentan una cierta semejanza. Se busca estudiar la tabla original de datos por reducción de los caracteres o muestras a un número inferior de clases homogéneas. Las agregaciones no se obtienen por inspección de las representaciones gráficas del ACP, sino que a partir de una clasificación automática objetiva, basada en un formalismo determinado.

PORCENTAJE	29.792	12.145	13.470	10.068	9.387	8.255
VALOR PROPIO	3.873	1.579	1.751	1.309	1.220	1.073

TABLA DE SATURACION

F (FE2X)	0.632	0.057	0.439	0.172	0.198	0.196
F (MN)	0.033	0.004	0.929	0.142	0.018	0.046
F (BA)	0.038	0.238	0.065	0.065	0.890	0.111
F (P)	0.008	0.029	0.052	0.912	0.033	0.022
F (V)	0.784	0.049	0.126	0.103	0.306	0.131
F (PB)	0.253	0.822	0.263	0.106	0.110	0.061
F (ZN)	0.478	0.030	0.332	0.553	0.142	0.133
F (CU)	0.664	0.055	0.146	0.216	0.421	0.185
F (CR)	0.910	0.252	0.097	0.022	0.153	0.066
F (NI)	0.902	0.237	0.042	0.151	0.148	0.084
F (CO)	0.605	0.026	0.633	0.011	0.099	0.031
F (BE)	0.015	0.844	0.238	0.158	0.148	0.148
F (Y)	0.220	0.068	0.046	0.015	0.082	0.956

FIG. 9

* ACP CON 6 FACTORES (TRANSF. LOG) *

1 CM = 0.20 0.20

VAL. PROPIOS = 3.87 1.58
 INERCIAS = 29.79 12.14

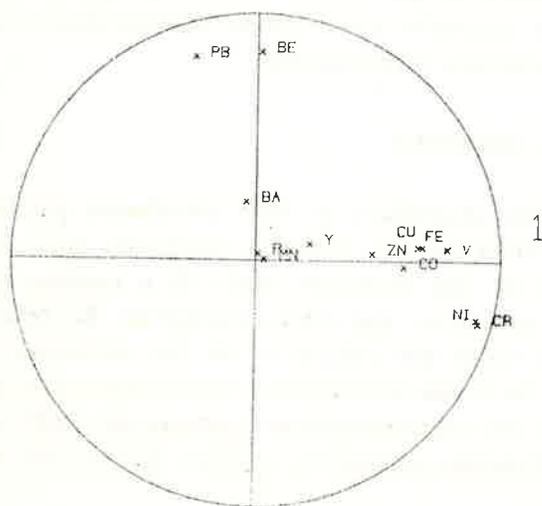


FIG. 10

En prospección geoquímica, los métodos de clasificación automática en modo Q son aplicados para la identificación de subgrupos de muestras homogéneas, representativas de determinadas poblaciones geoquímicas. El objetivo de este tipo de tratamiento es intentar obtener agrupaciones de muestras, que correspondan a las poblaciones de fondo geoquímico normal de las diferentes unidades petrológicas o litológicas; y conjuntos de muestras asociados a las ocurrencias minerales del sector estudiado. Las técnicas en modo R se emplean esencialmente como un procedimiento de descripción de la matriz de correlaciones o similitudes entre los elementos analizados.

Podemos dividir los métodos de clasificación en dos tipos:

—métodos no jerárquicos, que particionan a las unidades en un número determinado de clases, según un criterio de distancia definido; y

—métodos jerárquicos, que al realizar una partición sucesiva en clases cada vez más vastas, conducen a un escalograma o árbol de clasificación.

Como ejemplo de los métodos del primer tipo podemos citar al procedimiento de centros móviles de Forgy E. W. (1965) y al método de nubes dinámicas desarrollado por Diday E. (1971), mientras que entre los algoritmos de clasificación jerárquica destacamos al conocido por clasificación ascendente jerárquica (SAJ). En la figura 11 presentamos el dendrograma de una CAJ en modo R.

—Análisis factorial discriminante

Esta técnica de análisis de datos multidimensionales tiene como objetivo clasificar las muestras explicadas por una serie de caracteres geoquímicos en ciertas clases establecidas de antemano. Se trata de un problema de repartición de individuos no afectados en clases ya identificadas, y no de clasificación automática, presentada anteriormente.

Esquemáticamente el análisis factorial discriminante busca nuevas variables, de la forma de combinaciones lineales ortogonales de los caracteres iniciales, cuyos valores sean lo más próximos posible para las muestras pertenecientes a una misma clase, y lo más disímiles posibles para los especímenes de clases diferentes. Es así, que se van a extraer nuevos ejes de coordenadas en un subespacio de dimensión igual al número de clases menos uno, $k-1$. Las combinaciones lineales mencionadas se denominan funciones discriminantes; y son operadores de proyección de la nube de puntos en RP al espacio factorial R_{k-1} .

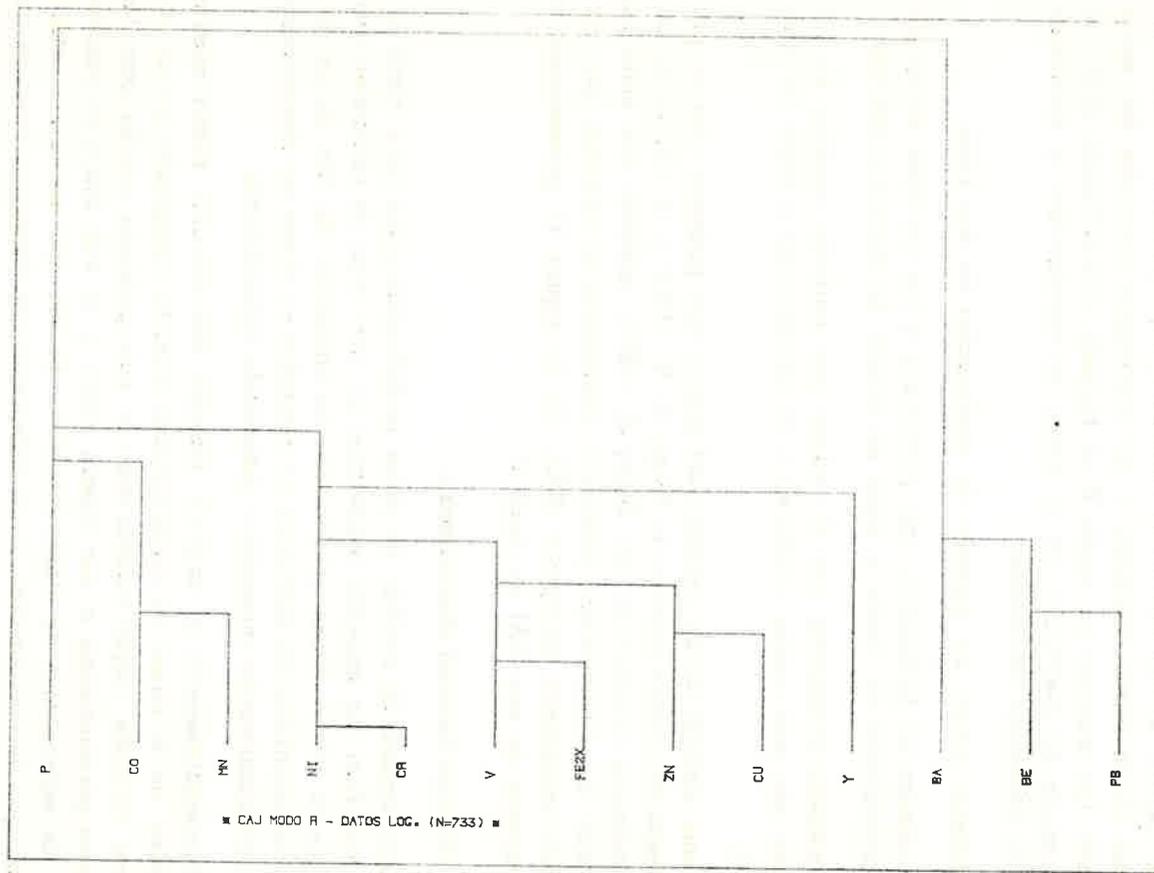


FIG. 11

En prospección geoquímica, el análisis discriminante suele aplicarse sobre un conjunto de muestras representativas de las distintas poblaciones, definidas según un criterio litológico, metalogénico, etc. Sobre dicho grupo, conocido como conjunto de instrucción, se determinan las funciones discriminantes. Generalmente el porcentaje de especímenes bien clasificados es superior al 70%. Una vez consideradas aceptables las funciones discriminantes, éstas son utilizadas para la afectación de muestras de origen incierto, ahora sí, sólo a partir de su espectro geoquímico.

Hemos aplicado este método factorial para la interpretación de los datos de una campaña de prospección estratégica.

Elegimos los grupos de instrucción a partir de la representación de las muestras en los planos factoriales de un ACP; obteniendo luego de la afectación, cinco unidades geoquímicas homogéneas, que fueron examinadas en función de las unidades litológicas del sector estudiado, (Gellós G., Rolet Ph. y Spangenberg J., 1981).

En otro estudio empleamos diferentes modelos discriminantes para la obtención de mapas litogeoquímicos a partir de un conjunto de instrucción establecido según un criterio litológico (Spangenberg J., 1984).

2.6.3. Cartografía geoquímica

La representación de los datos geoquímicos bajo la forma de mapas permite confrontar la información intrínseca disponible con la extrínseca (cuadro geológico y pedológico del sector), completando así la imagen apprehendida durante la descripción puramente estadística de los mismos. El objetivo de estos documentos gráficos es el examen de la variabilidad de la información esencialmente química, en relación a la organización espacial de su soporte geométrico; es decir, la distribución areal de las muestras en el sector estudiado. Es así, que diferentes representaciones cartográficas van a acompañar a los tratamientos estadísticos durante la interpretación de los datos geoquímicos de una campaña de prospección.

La cartografía de los datos geoquímicos se plantea tanto a nivel de registro y transmisión fiel de los mismos, como en su comunicación, de forma tal que el máximo de información sea rápida y fácilmente accesible.

Se distinguen dos tipos de mapas geoquímicos:

- los mapas de imposición puntual
- los mapas de imposición zonal

Howarth R. J. (1977) agrega a estas dos clases de representaciones, un tercer tipo: los mapas multicomponentes, que pueden presentar un carácter puntual o zonal; y son aquellos que representan simultáneamente a más de una variable geoquímica.

La elección de una técnica cartográfica en particular depende de la naturaleza de los datos y del objetivo de la representación, v. gr.: registro o transmisión, comunicación y asistencia en el trabajo de interpretación. Si los datos a cartografiar son complejos, se deberá llegar a un compromiso entre la fidelidad y expresividad de los mapas, intentando obtener representaciones, que posibiliten la extracción rápida de lo esencial de la información por parte del sistema de percepción visual humano.

2.6.3.1. *Mapas de imposición puntual*

Los mapas de implantación puntual registran el máximo de información lo más fielmente posible. En efecto, estos métodos cartográficos evitan la distorsión de los datos originales, recurriendo a variables gráficas potentes. Los datos se señalan directamente por el valor del carácter escrito al lado de cada punto representativo de la localidad de muestreo; o sino por la variación del tamaño (parámetro gráfico esencialmente cuantitativo) de una figura de forma determinada, en general un círculo.

En el caso de los programas de representación por cifras, la inscripción de los valores puede realizarse en una de varias eposiciones estándares alrededor del punto de observación. De esta forma se logra minimizar la sobreposición de los rótulos, que afecta la claridad y estética de los mapas. En prospección geoquímica empleamos esta técnica para la representación del posicionamiento de las localidades de muestreo con su identificación (figura 12) al igual que para el trazado de los resultados analíticos brutos (figura 13). Constituyen esencialmente mapas de registro de la información, pero también resultan de gran utilidad cuando durante la interpretación se desea consultar la información bruta puntual.

La representación con figuras de tamaño variable son más expresivas que las de los valores numéricos, ya que permiten una rápida visualización de las variaciones de los tenores.

El tamaño de la figura es proporcional a la concentración del elemento, y la pérdida de información es mínima. En la práctica, dividimos al intervalo de variación del carácter a cartografiar en un cierto número de clases, a las que se le adjudica un símbolo de determinado tamaño (figura 14).

DNMG

NIE-DINAHIGE-DAPS

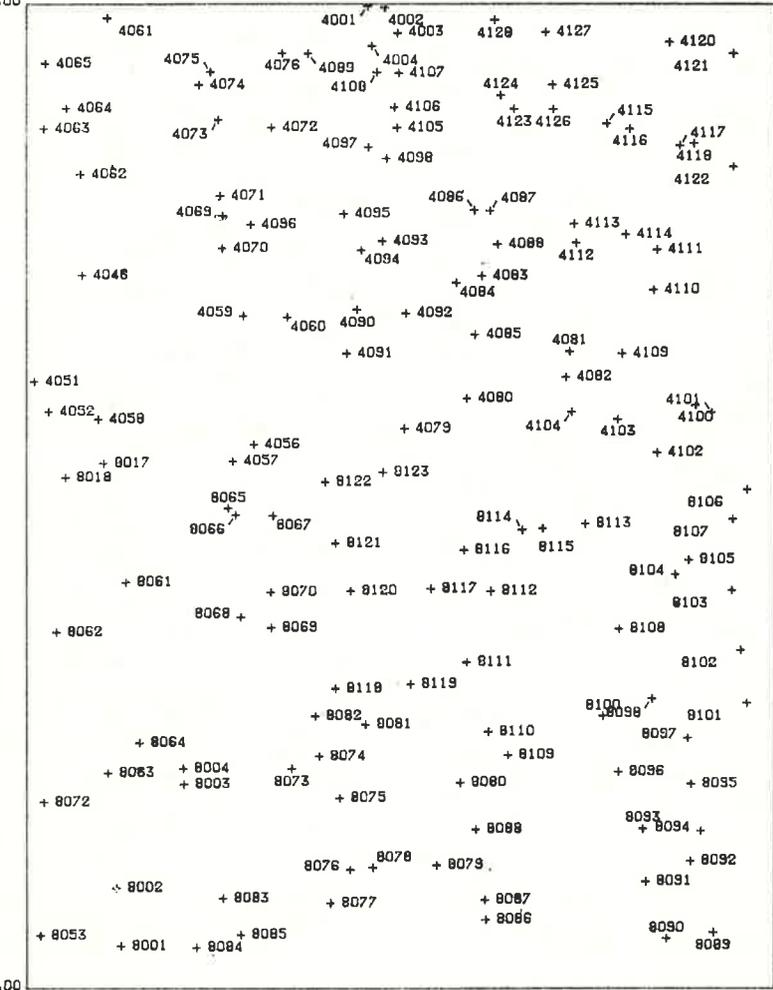
PROSPECCION GEOQUIMICA ESTRATEGICA

PLANO DE UBICACION DE MUESTRAS

ESC. 1/100000

368.00

355.00



625.00

635.00

FIG. 12

DNMG

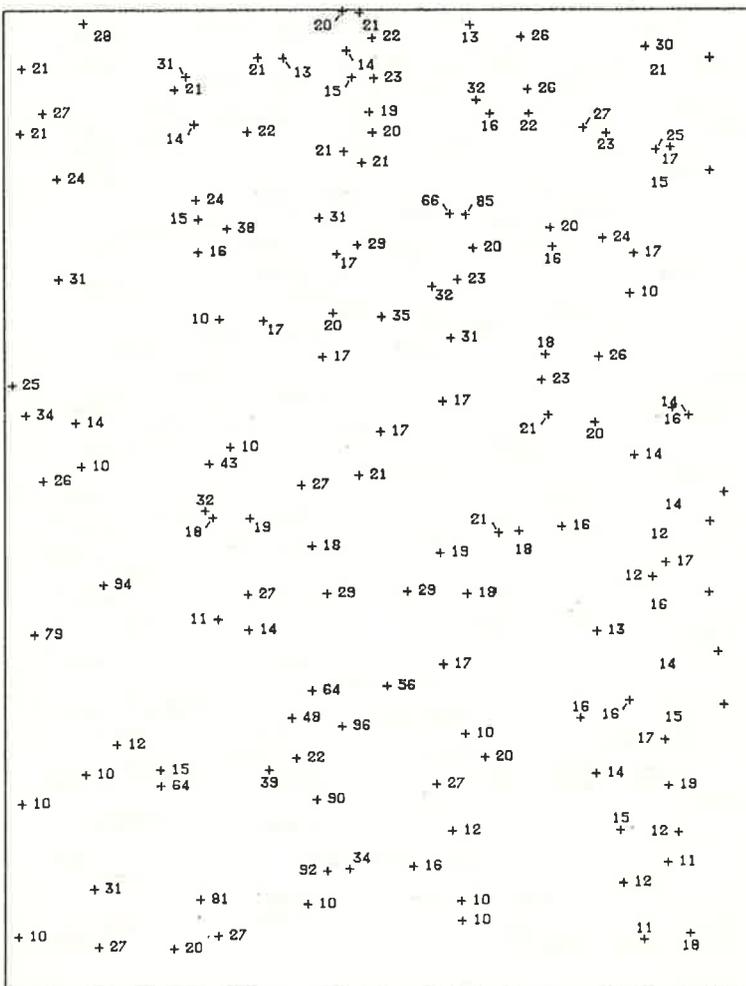
PROSPECCION GEOQUIMICA ESTRATEGICA

TENORES DE CU

NIE-DINAMIGE-DAPS

ESC. 1/100000

368.00



355.00

625.00

635.00

FIG. 13

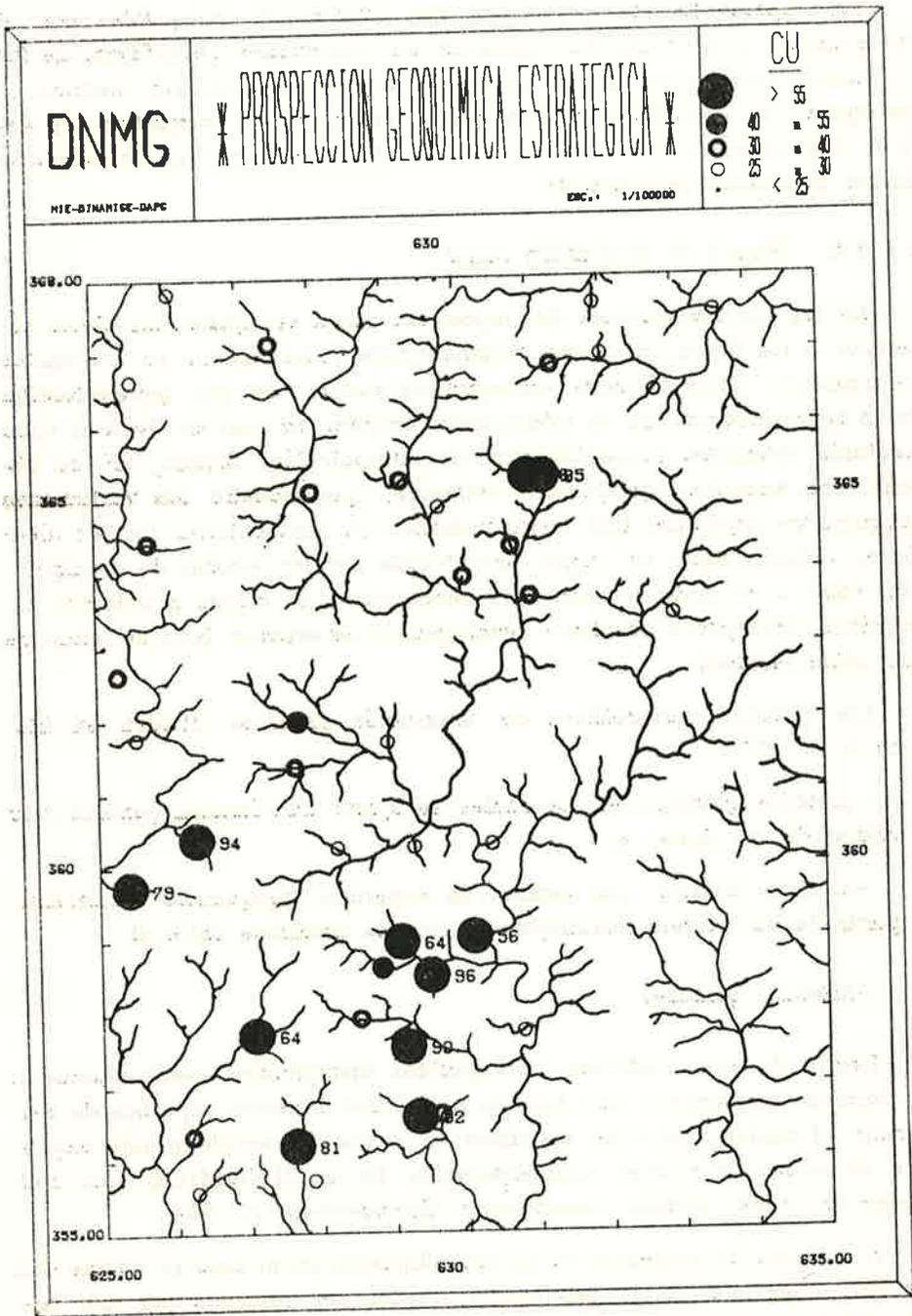


FIG. 14

Las representaciones puntuales son difícilmente integrables por el ojo humano, y, es preferible examinar las variaciones geográficas de los caracteres geoquímicos en los mapas de imposición zonal. No obstante, la cartografía de imposición puntual pone fácilmente de manifiesto los valores aberrantes; y, por consiguiente, es sumamente útil en la selección de las anomalías geoquímicas.

2.6.3.2. Mapas de imposición zonal

En las representaciones de imposición zonal se ajusta una cierta superficie a los datos originales, fragmentarios y localizados en los puntos de muestreo. Estas técnicas cartográficas surgen de una generalización de la representación de la información original, la que se lleva a cabo mediante diferentes procedimientos de interpolación. Siendo, así, se obtiene una superficie geoquímica atenuada, que muestra las variaciones geoquímicas regionales bien estructuradas. Las fluctuaciones locales aleatorias; debidas tanto al "ruido" introducido por los errores de manipulación como a verdaderas anomalías geoquímicas de origen pedológico, topográfico, litológico o asimismo metalogénico, se separan bajo la forma de una señal residual.

Los métodos cartográficos de imposición zonal se dividen en (Howart R. J., 1977):

—métodos globales en los cuales se ajusta una función general a la totalidad de los datos; y

—métodos locales, que estiman la superficie geoquímica localmente, a partir de un número restringido de puntos próximos entre sí.

—Métodos globales

Dentro de estos métodos cartográficos distinguimos esencialmente a las técnicas que ajustan una función polinomial llamada superficie de tendencia, al conjunto total de los datos; y, a las que emplean una expansión en series de Fourier bidimensionales. En la D.I.N.A.M.I.G.E. solo aplicamos la primer técnica mencionada (Spangenberg J., 1984).

El análisis de tendencia es un procedimiento en el cual se asume que las variaciones del fondo geoquímico pueden ser descritas por una función analítica polinomial de las coordenadas geográficas. La forma precisa de la superficie calculada es la determinada por el método de los mínimos cuadrados, en forma análoga a un análisis de regresión múltiple.

En algunas ocasiones se calculan superficies hasta de grado seis (séc-ticas) o siete (sépticas), si bien las más frecuentes son las lineales, las cuadráticas y las cúbicas.

Observamos que el análisis de tendencia da buenos resultados en estudios locales, que abarcan un sector reducido; pero da lugar a ajustes pobres al aumentar el área y el número de puntos. Los porcentajes de ajuste son en general bajos, especialmente en reconocimientos regionales, donde la autocorrelación entre las muestras es mínima y las tendencias geoquímicas pueden ser más pequeñas que la separación entre las localidades de muestreo. En estos casos no es posible hablar de continuidad media, en el sentido de la teoría de las variables regionalizadas de Matheron G. (1962).

La técnica de análisis de tendencia encuentra un excelente campo de aplicación en estudios de detalle a gran escala, en los cuales se lleva a cabo el muestreo según una malla regular densa.

Idealmente la superficie ajustada describe las tendencias regionales, debidas a procesos geológicos primarios; y traduce las variaciones mayores en la composición geoquímica de la roca madre. Los residuales, o desviaciones de los valores observados respecto a la superficie polinomial, engloban a dos componentes: (1) desviaciones locales respecto a la tendencia, correspondientes a fluctuaciones en el contexto geológico tanto de origen litológico, petrológico como pedológico, o asimismo metalogénico; y (2) variaciones aleatorias debidas a los errores de manipulación. Los tenores residuales significativos para la prospección minera son entonces aquellos que sobrepasan un cierto límite crítico, que determinamos a partir de la varianza de muestreo y análisis químico. Los residuos positivos autocorrelacionados señalan zonas geoquímicas anómalas.

Un análisis crítico de esta técnica cartográfica se encuentra en la bibliografía (Spangenberg J., 1984) y sus referencias.

—Métodos locales

Estos métodos de representación son sensibles a las fluctuaciones rápidas del relieve de la superficie geoquímica.

El procedimiento cartográfico implica las operaciones de interpolación de los datos brutos, con creación de una malla regular; y el trazado de la superficie en base a estos nuevos valores.

Para una distribución determinada de las muestras, los mapas van a depender del tamaño de las celdas de la malla empleada para la in-

terpolación, del método de selección de los puntos de muestreo que intervienen en la evaluación de los nodos de la malla, del tipo de ponderación de los datos originales, del algoritmo de cálculo de los valores nodales de la grilla, y finalmente del procedimiento gráfico de trazado de los valores interpolados.

Un método clásico de representación de la superficie geoquímica sería el trazado de curvas isovalores o isotenores, en nuestro caso particular. Dicha técnica es muy expresiva y origina una imagen fácilmente aprehensible de la topografía de la superficie geoquímica.

Mediante la operación de interpolación previa al trazado de las curvas isovalores se logra una generalización en extensión de la variable a cartografiar, suprimiendo las fluctuaciones locales aleatorias de forma tal, que en el mapa definitivo sólo son legibles las variaciones espaciales de cierta continuidad. El empleo masivo de curvas isovalores puede conducir entonces a desprestigiar las discontinuidades locales de los fenómenos geoquímicos examinados, al igual que detalles importantes de su estructuración. Cuanto más fragmentaria sea la información, debido a una configuración del plan de muestreo inadecuada para la correcta descripción de la configuración geográfica de la señal geoquímica, tanto menor será la utilidad de esta modalidad de visualización cartográfica. En el caso de muestras de sedimentos de lechos vivos e incluso aluviones, se necesita tomar en cuenta que el soporte efectivo de los elementos no corresponde al soporte real de los mismos, sino que es representativo de toda el área de la cuenca de drenaje ubicada encima de la estación de muestreo; dependiendo de la topografía, la hidrografía y de los procesos pedogenéticos.

Los cálculos de interpolación deberían en teoría considerar las propiedades vectoriales de las variables geoquímicas, es decir la dirección y el sentido de la lixiviación. Es así que la aplicación de la representación por isovalores en estudios de reconocimiento regional de baja densidad de muestreo, requiere interpolaciones drásticas entre valores vectoriales puntuales heterogéneos, que pueden corresponder a diferentes unidades geoquímicas, dando origen a mapas sobrealizados, donde la estructuración de la señal geoquímica es difícilmente distinguible.

En estudios tácticos a malla cerrada la autocorrelación de las muestras de suelos y su filiación con el substrato es mucho mayor que en un estudio estratégico y asimismo el contexto geológico suele ser más homogéneo. En consecuencia los cálculos de interpolación y alisado resultan perfectamente lícitos y pueden llevarse a cabo matemáticamente. El

trazado de curvas isoconcentraciones, en este tipo de trabajos posibilita la apreciación directa del contraste y relieve de las anomalías geoquímicas (figura 15).

Otro tipo de mapas se basa en la representación por *densidad variable* o *sombreado variable*. En la D.I.N.A.M.I.G.E. empleamos esta técnica de visualización en conjunción con un procedimiento de interpolación basado en el *método de medias móviles*. El sector estudiado se particiona según una malla regular en celdas cuadradas. Los nodos de la malla se valorizan promediando los valores de las muestras dentro de cada celda, conjuntamente con los de las celdas inmediatamente adyacentes. Esta modalidad de cartografía automática es sumamente útil en prospección regional, ya que da una imagen muy expresiva de las variaciones a gran escala del relieve geoquímico, delineando las unidades estructurales bien diferenciadas (figura 16).

2.6.3.3. Mapas de anomalías geoquímicas

El objetivo del trazado de los mapas de anomalías geoquímicas es la puesta en evidencia de zonas de comportamiento atípico, que pueden estar manifestando la presencia de una mineralización.

Uno de los mapas más simples corresponde, como ya vimos, a la representación del carácter mediante símbolos de tamaño variable, según la clase a la que pertenecen los valores (ver figura 14). La selección de los límites de las clases puede realizarse de diferentes formas: tomando intervalos aritméticos o logarítmicos iguales, empleando los parámetros de tendencia central y de dispersión de la distribución de fondo normal del sector, dividiendo el intervalo de variación según determinados percentiles (p. ej.: 10, 20, 40, 60, 80, 90, 95, 99 y 99.9%) siguiendo las inflexiones naturales de la curva de repartición de frecuencias,...

Para la comparación directa de los mapas de anomalías de diferentes elementos resulta práctico aplicar técnicas de cartografía de datos normalizados. Todos los procedimientos comienzan por particionar el conjunto de muestras en unidades homogéneas según los facies litológicos, pedológicos o metalogénicos; y calculan en cada uno de ellas los límites críticos, L_j , ya sea a partir de los parámetros estadísticos o de representaciones gráficas de las distribuciones. Las variables graficadas son de la forma:

$$Y_j = \frac{X_j - L_j}{L_j} \quad \text{o directamente por estandarización:} \quad Z_j = \frac{X_j - X_j}{S_j}$$

* ISOTENORES DE COBRE *

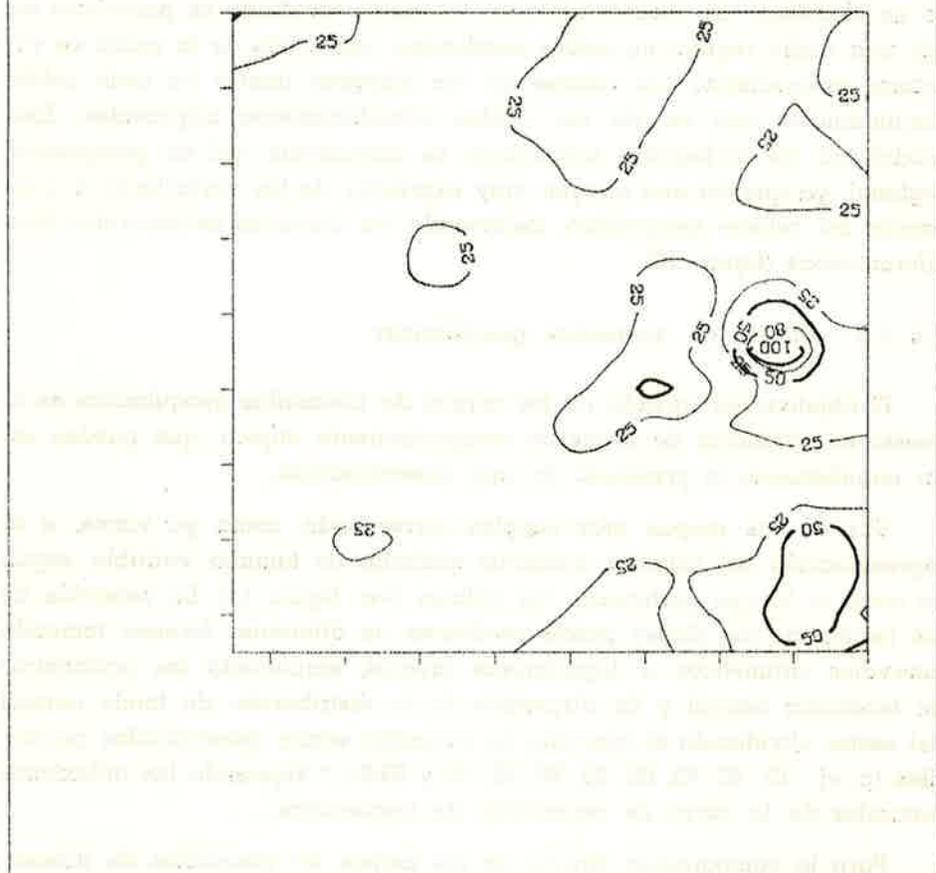
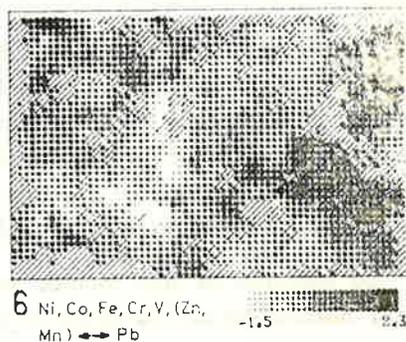
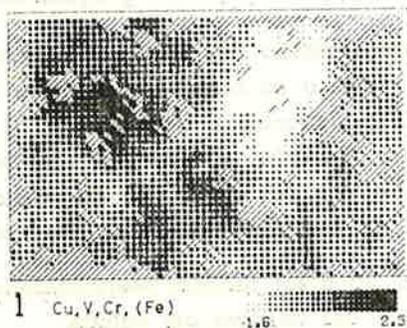
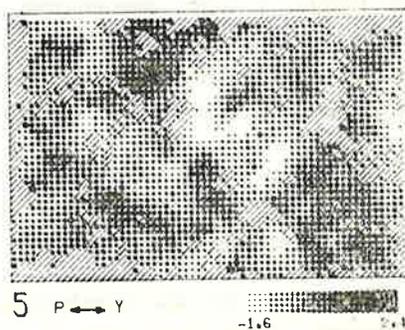
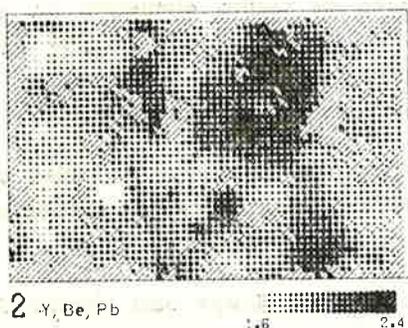
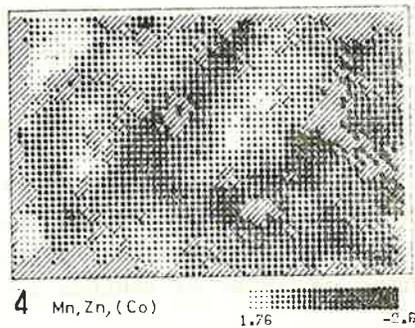
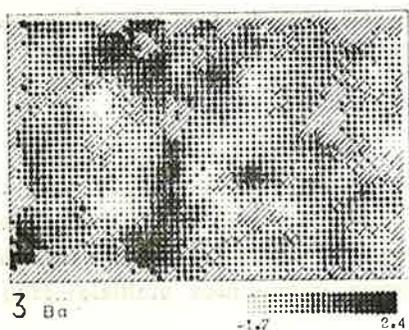


FIG. 15

* ACP CON 6 FACTORES (TRANSF. LOG) *



5 KMS

ESCALA

FIGURA - 16

Estos métodos originan representaciones cartográficas muy expresivas, dado que los valores cartografiados miden directamente la anomalía de las muestras. La elección de los intervalos de las clases es inmediata, por ej.: 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 y 3.

Otras técnicas que originan mapas de anomalías geoquímicas son las que se basan en la representación de los tenores residuales obtenidos en análisis de tendencia o cálculos de regresión múltiple (figura 17).

2.6.3.4. *Mapas multicomponentes.*

Los mapas multicomponentes combinan las variaciones de más de un carácter en una representación gráfica. Es así, que facilitan en forma importante la comparación de la distribución areal de los tenores de diferentes elementos en estudios de prospección geoquímica multielemento.

Un procedimiento gráfico emplea flechas de longitud variable en una roseta, y logra representar un máximo de cuatro elementos en un mismo mapa (figura 18). El examen de este tipo de mapas permite delinear diferentes facies litogeoquímicas, áreas de interés metalogénico, o simplemente zonas de un comportamiento geoquímico particular.

En otra dirección se encuentra la cartografía de nuevas variables, de la forma de combinaciones aditivas o multiplicativas de ciertos elementos, que puede considerarse como un análisis factorial empírico.

El mapeo de las coordenadas factoriales constituye otra técnica de cartografía multicomponente muy útil para la interpretación de los resultados del análisis factorial en término de diferentes procesos geoquímicos.

Finalmente, debemos decir que ningún método de cartografía automática es de aplicación universal. Cada técnica es capaz de describir o revelar determinado tipo de fenómenos o estructuras geoquímicas. La mejor explotación de la información disponible sobre un sector dado, requiere, entonces, el uso de diferentes métodos de representación cartográfica, simultáneamente a la aplicación de los tratamientos estadísticos.

La elección de una técnica particular va a ser función esencialmente de la naturaleza de los datos a procesar y del objetivo del estudio.

2.6.4 *Interpretación de los datos*

La interpretación de los resultados geoquímicos multielementos por medio de las técnicas de cálculo estadístico y cartografía automática des-

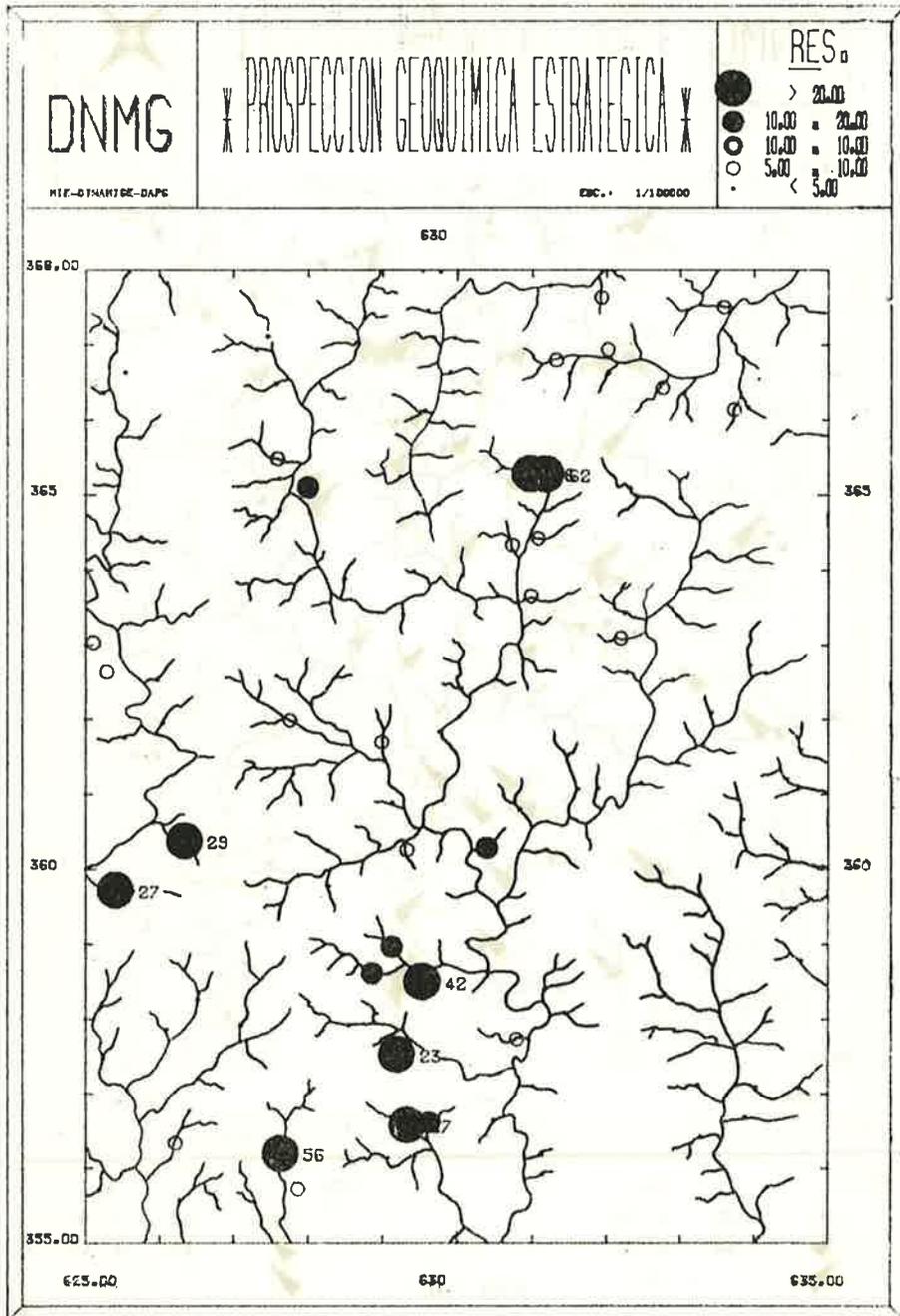


FIG. 17: Residuales de la regresión:

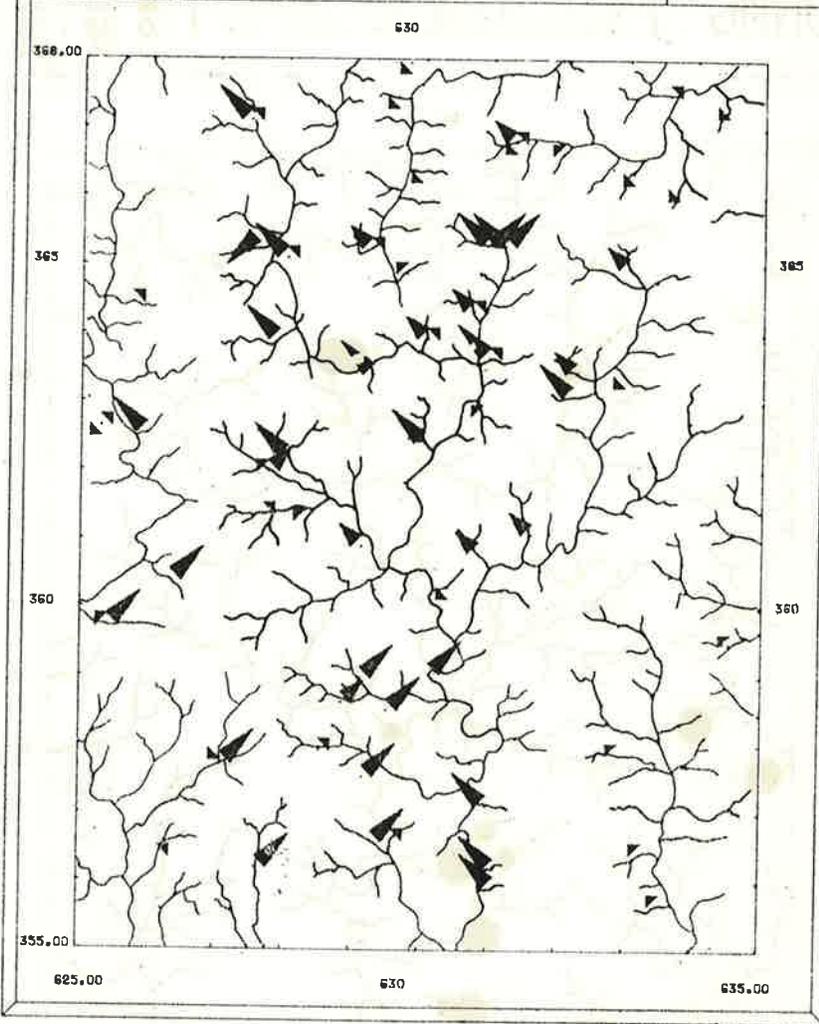
$$Cu_{calc} = 0.855 Fe + 0.074 Ni + 0.165 V$$

DNMG

NTE-DIHARIEK-DAPC

PROSPECCION GEOQUIMICA ESTRATEGICA

ESC. 1/100000



PB	< 25	CU	< 30
	25 a 30		30 a 40
	30 a 35		40 a 55
	> 35		> 55
<i>FIG. 18</i>			
ZN	< 100	NI	< 75
	100 a 115		75 a 90
	115 a 130		90 a 110
	> 130		> 110

critas anteriormente conduce al establecimiento de mapas de síntesis. Este tipo de documentos cumplen un doble objetivo:

- precisar las unidades litogeoquímicas puestas en evidencia; y
- fijar las anomalías o zonas anómalas seleccionadas.

Los mapas de visualización de medias móviles de los tenores brutos, conjuntamente con la representación de los resultados del análisis factorial y también del análisis discriminante permiten determinar unidades geoquímicas homogéneas, que son esencialmente examinadas en función de la repartición de las facies litológicas. En el caso de que el soporte de la información geoquímica no padezca de una aloctonía importante en los vectores horizontales puede resultar una imagen litogeoquímica bastante precisa del sector estudiado. Esto permite definir el espectro geoquímico de los diferentes litofacies y en algunos casos, v. gr. en ausencia de una densidad de afloramientos adecuada, resulta de gran utilidad en el mapeo geológico.

Los mismos criterios son empleados para determinar el ambiente geoquímico de cada estación de muestreo, y particularmente el de las localidades anómalas.

La selección de las anomalías se lleva a cabo en función del contraste de los tenores, la asociación de elementos que la caracteriza, y por su coherencia espacial. La anomalicidad de los tenores es referida al contexto geológico y geoquímico local y la coherencia espacial de los mismos se examina en relación con las características oro-hidrografías y pedológicas zonales. De esta forma se busca discriminar las anomalías significativas desde un punto de vista metalogénico de aquellas parásitas, ligadas a una litología particular (formacionales) o a procesos pedogénicos.

La interpretación eficaz de los resultados de una prospección geoquímica multielemento requiere entonces la confrontación de la información química con la geológica, topográfica y pedológica y es una tarea delicada a la cual no podemos asimilar un procedimiento predeterminado. El examen de las anomalías geoquímicas, tanto en la fase de su selección en el reconocimiento regional, o a nivel de su estudio detallado por medio de prospecciones tácticas es un proceso complejo y ciertamente subjetivo que se basa en la experiencia personal del geoquímico.

Finalmente diremos que la fase de tratamiento e interpretación de la información geoquímica de un estudio estratégico tipo (una hoja geo-

gráfica al 1/50.000 cubierta con una densidad media de 1-2 muestras por Km²) desde el registro de los resultados, en la base de datos hasta la obtención de un documento de síntesis implica el trabajo de 15 a 20 días (dependiendo en parte de la disponibilidad de las facilidades computacionales) de un técnico especializado.

3. Resultados obtenidos

En este capítulo realizamos algunas consideraciones generales sobre los resultados obtenidos por la prospección geoquímica en el marco del Inventario Minero.

Una discusión completa de los resultados se encuentra en una serie de informes en los cuales se presentan los resultados analíticos brutos, con el detalle del tratamiento e interpretación de los mismos y los diferentes documentos cartográficos. Asimismo los resultados de los trabajos realizados hasta enero de 1982 fueron expuestos en forma sintética en el informe final de la misión B.R.G.M. (1982).

3.1. Resultados de la prospección estratégica

Hasta el momento poseemos los resultados completos del reconocimiento estratégico de 18 hojas al 1/50.000, de las cuales 13 ya habían sido estudiadas al finalizar la misión B.R.G.M.

En la figura 19 se indican los fotoplanos que fueron cubiertos por la prospección regional, habiéndose analizado las muestras correspondientes y procesado los resultados obtenidos.

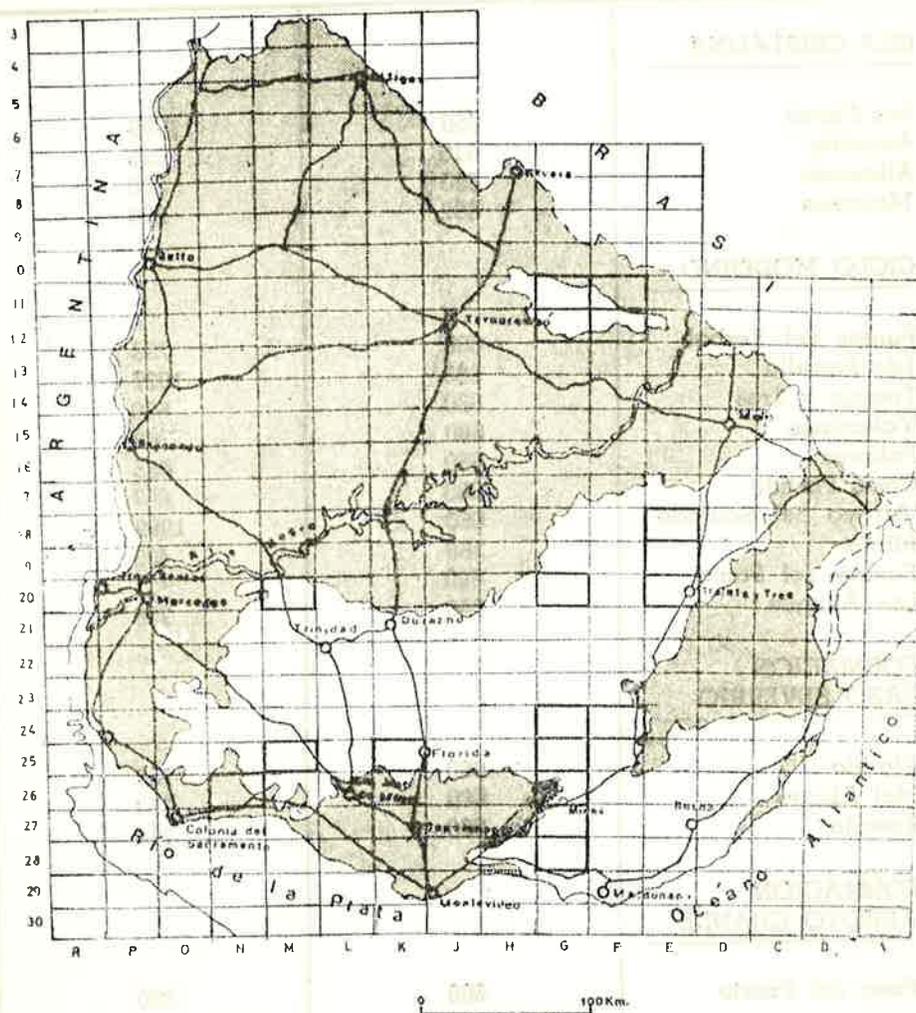
En la tabla 4 se detallan las superficies prospectadas y el número de muestras extraídas.

Fueron tomadas y analizadas para 22 elementos 13.357 muestras repartidas sobre 11.356 km².

Durante la fase de interpretación se seleccionaron más de 150 anomalías geoquímicas estratégicas, de las cuales un alto porcentaje presenta una paragénesis polimetálica: cobre-plomo-zinc, con frecuencias acompañados de tenores en As, Ag y/o Mo. La mayoría de estas anomalías se encuentran dentro de la serie volcano-sedimentaria de Minas (fotoplano Puntas del Yerbal, Isla Patrulla, Polanco, Fuente del Puma, Las Animas, ...) y en la faja epimetamórfica de Paso Severino (Mal Abrigo).

Dado el carácter esencialmente introductorio de este artículo no corresponde entrar en un examen de las anomalías por fotoplano, lo cual ya fue realizado en los informes correspondientes a cada estudio.

SITUACION DE LAS ZONAS PROSPECTADAS



 *Prospección con toma y análisis de muestras e interpretación de resultados.*

FIG. 19

Zonas de prospección	Superficie cubierta Km ²	Número de muestras
ISLA CRISTALINA		
Las Flores	550	1042
Amarillo	510	925
Alborada	880	530
Moirones	396	220
CICLO MODERNO		
Puntas del Yerbal	680	733
Isla Patrulla	680	1027
Treinta y Tres	680	660
Valentines	680	769
Polanco	660	685
Cerro Partido	660	667
Arroyo del Soldado	660	1282
Minas	360	433
Fuente del Puma	660	737
Las Animas	660	738
FORMACION PASO SEVERINO		
Florida	660	752
Mal Abrigo	660	753
Rosario	660	714
FORMACION ARROYO GRANDE		
Paso del Puerto	660	690
T O T A L	11.356	13.357

Tabla 4: Zonas reconocidas por prospección geoquímica estratégica: superficie cubierta y número de muestras extraídas y analizadas.

3.2. Resultados de controles tácticos

El primer estudio táctico, de carácter metodológico fue realizado por la misión B.R.G.M. sobre una anomalía polimetálica (Cu-Pb-Zn-As) del fotoplano Las Animas. Este trabajo permitió analizar la malla de muestreo en función de la respuesta geoquímica. Se concluyó que dadas las condiciones de dispersión geoquímica reinantes en la región estudiada el paso de muestreo a lo largo de los perfiles no puede superar los 100 m.

En la práctica observamos que al cerrar la malla, se confirma, en los casos positivos, la anomalía estratégica obteniéndose un considerable aumento del contraste de la anomalía. Sin embargo, dicha malla no permite definir con precisión el relieve de las anomalías ni las dimensiones de las mismas, para lo cual se necesitarían tomas cada no más de 50 m.

El procedimiento más eficiente consiste en llevar a cabo un estudio metodológico previo a la realización del trabajo de prospección definitivo, con el propósito de determinar el paso óptimo de muestreo al igual que el horizonte pedológico representativo. En esta primera fase se logra una mejor adaptación de la metodología de prospección geoquímica al objetivo y naturaleza del estudio de detalle a realizar (Spangenberg J., 1983c).

Es así que un estudio metodológico realizado en los alrededores de la mineralización a pirrotina-calcopirita-blenda conocida como Mina Oriental señaló que un paso de muestreo de 25 m. con toma de suelos a 40-50 cm. de profundidad se adapta bien a la prospección de dicho cuerpo mineralizado, evitando la contaminación superficial provocada por los antiguos trabajos mineros.

3.3. Consideraciones generales sobre la metodología empleada

Mencionamos anteriormente que los resultados de estudios tácticos realizados sobre anomalías estratégicas pusieron en evidencia que la dispersión geoquímica en las zonas del zócalo prospectadas es relativamente reducida.

Esto ya fue examinado en el informe final de la misión B.R.G.M. (1982), donde se explican las características de la respuesta geoquímica en función de diferentes factores, (climáticos, morfológicos y pedológicos):

—clima templado

—morfología generalmente poco acentuada

- red hidrográfica regular pero poco densa
- suelos poco profundos y poco evolucionados
- cobertura vegetal uniforme, que limita los procesos erosivos.

Diferentes estudios de optimización de la metodología de prospección geoquímica han podido establecer que en climas templados el componente detrítico es el determinante de la dispersión geoquímica (Wilhelm et al, 1978; Laville-Timsit et al, 1979; etc.). Pero dadas las condiciones oro-hidrográficas de las regiones del Uruguay estudiadas y considerando la cobertura vegetal uniforme —esencialmente pasturas naturales y montes—, es de esperar que la dispersión mecánica en los alrededores de los cuerpos mineralizados investigados sea reducida. Los resultados de varios trabajos de prospección de detalle están de acuerdo con una dispersión geoquímica de este tipo.

Las condiciones de dispersión geoquímica explicarán el bajo contraste de las anomalías geoquímicas. Es así, que en la fase interpretativa examinamos en forma detallada a la señal geoquímica aún a bajos tenores, intentando revelar mismo aquellas desviaciones débiles respecto a los niveles de fondo establecidos.

En ocasiones, la selección de las anomalías tenues es facilitada por la información multielemento, que indica una paragénesis geoquímica típica de mineralizaciones sulfuradas.

Conjuntamente con el estudio del espectro geoquímico el análisis de la coherencia espacial de las variaciones de los tenores asiste en la correcta selección de las anomalías.

No obstante, en algunos casos se seleccionan anomalías parásitas debidas tanto a fenómenos pedogenéticos locales o a fluctuaciones erráticas introducidas en la señal geoquímica por los errores de manipulación. Se trata generalmente de anomalías puntuales, con un elemento dominante, y a veces con tenores cercanos al límite de dosificación analítica (Au, Ag, Mo, Sb, W, Sn y Cd).

Sin embargo, estas anomalías puntuales poco contrastadas no pueden ser despreciados, y en el cuadro de un reconocimiento sistemático deben ser controladas. Dadas las condiciones de dispersión geoquímica debemos considerar que dichas anomalías, a priori poco prometedoras, pueden estar revelando la presencia de una mineralización significativa. A

título de ejemplo citamos el descubrimiento de un sombrero de hierro a Cu-Mo-As-Ag a raíz de una anomalía puntual a 10ppm en Mo y un tenor en cobre poco contrastado (80ppm).

Otro punto importante es la ausencia de recubrimientos —prácticamente general— pedológicos alóctonos. En general los suelos son residuales y la filiación de los materiales de alteración superficial con la roca madre es muy elevada. Por consiguiente, las imágenes geoquímicas provenientes de estudios, tanto regionales como de detalle, concuerdan muy bien con la cartografía geológica y constituyen asimismo un excelente complemento y apoyo a la misma. Un ejemplo de aplicación de la cartografía geoquímica al mapeo de intrusiones graníticas fue descrito anteriormente (Spangenberg J., 1984).

Finalmente recordemos que es necesario tomar en cuenta que la prospección estratégica llevada a cabo con una densidad de muestreo de 1 a 2 muestras por km² no puede ser considerada un método de exploración exhaustivo. En efecto, se trata más bien de un método indirecto de prospección, apto para caracterizar rápidamente la vocación metalogénica de las regiones estudiadas y para señalar las zonas menos extensas que serán el objeto de estudios más avanzados y costosos.

Podemos afirmar que los métodos de prospección geoquímica empleados han cumplido exitosamente su objetivo, al poner en evidencia un importante número de anomalías de diversa paragénesis.

El control de estas anomalías estratégicas con una metodología geoquímica bien adaptada a las condiciones locales permitirá establecer conjuntamente con los estudios geofísicos y geológicos, el valor real de las zonas seleccionadas.

Un programa de trabajos tácticos (geoquímicos, geofísicos y geológicos) sobre los antiguos indicios mineros y las anomalías geoquímicas regionales hará posible el descubrimiento y evaluación de los yacimientos subaflorescentes presentes. La interpretación dinámica y bien integrada de los diferentes resultados obtenidos, aportará gran información sobre la aplicabilidad de las técnicas prospectivas empleadas, conduciendo de esta forma al establecimiento de una metodología de exploración minera perfectamente operacional en el contexto uruguayo.

Referencias Bibliográficas

- AGTERBERG F. P. (1974) — "Geomathematics .Mathematical buck-ground and geoscience applications."
Elsevier Pub. Com., Amsterdam, 596 pp.
- AHRENS L. H. (1954) — "The lognormal distribution of the elements."
Geochim. et Cosmochim. Acta 5, 49-73.
- ATAMAN G. (1963) — "Utilisation du spectromètre a lecture directe pour le dosage des éléments majeurs des roches sédimentaires et des silicates dans une grande gamme de concentrations."
Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr. (4), 233-240.
- BEGUINOT J., SAKOWITSCH W., BARBIER J., WHILHELM E. (1979) — "Un quart de siècle de prospection géochimique au B.R.G.M."
Bull. B.R.G.M. II, 2-3, 53-64.
- BERTRANEAU J., GOŇI J., WILHELM E. (1979) — "The present state of the development of multielement geochemical prospection." En: "Methods of Geochemical Prospecting."
I.A.G.C. Geol. Surv. Prague, 27 pp.
- BEUS A. A., GRIGORIAN S. V. (1977) — "Geochemical exploration methods for mineral deposits."
Applied Publishing Ltd., Wilmette, 287 pp.
- BOLVIKEN B., SINDING-LARSEN R. (1972) — "Total error and other criteria in the interpretation of stream sediment data." En: Jones J. M. Ed. "Geochemical Exploration." I.M.M., London, 283-295.
- BOUCETTA M., FRITSCHÉ J. (1979) — "Utilisation d'un plasma conducteur associé a un spectromètre a echelle pour l'analyse multi-élémentaire des échantillons géochimiques."
Bull. B.R.G.M., Sect. II, 2-3, 65-74.
- CAMERON E. M., HORTON R. E. (1967) — "Analysis of rocks using a multichannel emission spectrometer."
Chem. Geol. 2, 135-145.
- CATTELL R. B. (1965) — "Factor analysis: an introduction to essentials.
I. The purpose and underlying models.
II. The role of factor analysis in research."
Biometrics 21, 190-215, 405-435.

- CHAPMAN R. P. (1976a) — "Some consequences of applying log-normal theory to pseudolognormal distributions. Discussion." *Mathematical Geology* 8(2), 209-214.
- CHAPMAN R. P. (1976b) — "Limitations of correlation and regression analysis in geochemical exploration." *Trans. Inst. Min. Metall.* 85, B279-B283.
- CHAPMAN R. P. (1977) — "Reply to log — transformation in exploration geochemistry." *Mathematical Geology* 9(2) 194-198.
- CHAPMAN R. P. (1978) — "Evaluation of some statistical methods of interpreting multi-element geochemical drainage data from New Brunswick." *Mathematical Geology* 10(2), 195-224.
- CRAFT E. F. (1964) — "Trace determinations in soils and stream sediments by an internal standard spectrographic procedure." *Econ. Geol.* 59, 458-464.
- DANIELSON A., LUNDGREN F., SUNDQVIST G. (1959) — "The tape machine I." *Spectrochim. Acta* 15, 122-125.
- DAVIS J. C. (1973) — "Statistics and data analysis in geology." John Wiley, Inc. New York, 550 pp.
- DIDAY E. (1971) — "Une nouvelle méthode en classification automatique et reconnaissance des formes. La méthode des nuées dynamiques." *Rev. Stat. Appl.* 19(2), 19-33.
- ERHART H. (1967) — "La genèse des sols en tant que phénomène géologique." Masson Ed., Paris, 177 pp.
- FOGY E. W. — (1965) — "Cluster analysis of multivariate data: efficiency versus interpretability of classification." *Biometrics* 21, 768-769.
- GARRET R. G., GOSS T. I. (1978) — "The evaluation of sampling and analytical variation in regional geochemical surveys," En: Watterson J. R., Theobald P. K. Eds. "Geochemical Exploration." *Assoc. Explor. Geochemists, Toronto*, 371-383.

- GARRET R. G., GOSS T. I. (1980) — "UANOVA: a Fortran IV program for unbalanced nested analysis of variance." *Computer & Geosciences* 6, 35-60.
- GELOS G., ROLET Ph., SPANGENBERG J. (1981) — "Application des méthodes statistiques multivariées à des prélèvements géochimiques d'Alborada (Uruguay)." *Informe B.R.G.M. 81 SGT 002 DI*, 20 pp.
- GOSO H., UMPIERRE M. (1969) — "Trabajos realizados en Isla Patrulla." *Informe interno. Instituto Geológico del Uruguay — Facultad de Química. Marzo 1969.*
- GOSO H., UMPIERRE M. (1974) — "La localización de un depósito aurífero a través de una prospección geoquímica de cobre." *XXVIII Cong. Bras. Geol., P. Alegre, Sec. Técnica 7.*
- GOSS T. I., GARRET R. G. (1978) — "A new unbalanced nested ANOVA model in geology — a down to earth design—." *En: Amer. Stat. Assoc. Statistical Computing Proceeding*, 360-365.
- GRANIER C. (1973) — "Introduction à la prospection géochimique des gites métallifères." *Masson Ed., Paris*, 143 pp.
- GUILLAUME A. (1977) — "Introduction à la géologie quantitative." *Masson Ed., Paris, Collection Sciences de la Terre*, 200 pp.
- HARMAN H. H. (1976) — "Modern factor analysis." *The University of Chicago Press, Chicago*, 487 pp.
- HAWKES H. E., WEBB J. S. (1962) — "Geochemistry in mineral exploration." *Harper and Rows, New York*, 415 pp.
- HOWARTH R. J. (1977) — "Cartography in geochemical exploration." *Sci. Terr. Serv. Inf. Geol.* 9, 105-128.
- KLOVAN J. E. (1975) — "R-and-Q-mode factor analysis." *En: Mc. Cammon R. B. "Concepts in geostatistics."* *Springer-Verlag, New York*, 21-69.
- KOCH G. S., LINK R. F. (1971) — "Statistical analysis of geological data." *John Wiley, Inc., New York*, 438 pp.
- KRAUSKOPF K. B. (1967) — "Introduction to geochemistry." *Mc. Graw-Hill, New York*, 725 pp.

- KRUMBEIN W. C., GRAYBILL F. A. (1965) — "An introduction to statistical models in geology."
Mc. Graw-Hill, Inc., New York, 475 pp.
- LAFFITTE P. (1972) — "Traité d'informatique géologique."
Masson Ed., Paris, 624 pp.
- LAVILLE-TIMSIT L., WILHELM E. (1979) — "Comportement supergene des metaux autour du gite sulfuré de Porte-aux-Moines (Cote du Nord.) Application a la prospection géochimique."
Bull. B.R.G.M. II, 2-3, 195-228.
- LEBART L., MORINEAU A., TABARD N. (1977) — "Techniques de la description statistique." DUNOD. Ed., Paris, 351 pp.
- LEFEBVRE J. (1980) — "Introduction aux analyse statistique multidimensionnelle."
Masson Ed., Paris, 259 pp.
- LEVINSON A. A. (1974) — "Introduction to exploration geochemistry."
Applied Publishing Ltd., Calgary, 612 pp.
- LEYMARIE P. (1970) — "Contribution aux méthodes d'acquisition, de representation et de traitement de l'information en géologie." (Thesis, Nancy, 1969). Sciences de la Terre.
Mam. N° 18, Nancy, 170 pp.
- LEYMARIE P. (1972) — "Structure de l'information géologique."
En: Laffitte P. "Traité d'informatique géologique."
Masson Ed., Paris, 624 pp., 15-22.
- MATHERON G. (1962) — "Traité de géostatistique appliquée."
Tomo I, Mem. B.R.G.M., N° 14, Paris, 333 pp.
- MIESCH A. T. (1977) — "Geochemical survey of Missouri. Methods of sampling, laboratory analysis, and statistical reduction of data."
Geol. Surv. Prof. Paper 954 A, 39 pp.
- MIESCH A. T. (1977) — "Log transformation." Mathematical Geology 9,
191-198.
- MISION B.R.G.M. (1982) — "Inventario Minero del Uruguay. Primera fase." Informe final. Marzo 1982.

- MOAL J. Y., BEGUINOT J., RUEL G., VANNIER M. (1970) — "Le quantomètre pour le dosage des éléments en traces dans les matériaux naturels." Colloque national du C.N.R.S. N° 923, Nancy 4-6 Dic. 1968 Ed. C.N.R.S., 107-132.
- MOAL J. Y., PINAULT J. L. (1979) — "Utilisation de la spectrométrie d'émission sur poudres pour l'analyse multiélémentaire des échantillons géochimiques." Bull. B.R.G.M. II, 2-3, 75-84.
- ROCHE H. de la, GRANDCLAUDE Ph. (1972) — "La collecte des données géologiques." En: Laffitte P. "Traité d'informatique." Masson Ed., Paris, 614 pp. 23-52
- ROSE A. W., HAWKES H. E., WEBB J. S. (1979) — "Geochemistry in mineral exploration." Academic Press, Inc., London 657 pp.
- SINCLAIR A. J. (1974) — "Selection of thresholds in geochemical data using probability graphs." J. Geochem. Explor. 3, 129-149.
- SPANGENBERG J. (1983a) — "Estudio de la precisión de los datos geoquímicos multielementos del Inventario Minero del Uruguay. (Período Junio 1980 - Junio 1983)." Informe D.A.P.G. — G.Q.A., 83/002, 121 pp.
- SPANGENBERG J. (1983b) — "Sistema de control estadístico de la información geoquímica del Inventario Minero" Nota Técnica D.A.P.G. - G.Q.A., 3 pp.
- SPANGENBERG J. (1983c) — "Consideraciones previas a los trabajos de prospección geoquímica en la zona de la Mina Oriental." Nota técnica D.A.P.G. — G.Q.A. 83/008, 9 pp.
- SPANGENBERG J. (1984) — "Métodos de Tratamiento e interpretación de datos geoquímicos multielementos en exploración minera. Un estudio "Trabajo de diploma Facultad de Química. Montevideo - Uruguay, 409 pp.
- TENNANT C. B., WHITE M. L. (1959) — "Study of the distribution of some geochemical data." Econ. Geol. 54, 1281-1290.

—VISTELIUS A. E. (1967) — "Geochemical problems and measures of information." En: "Studies in mathematical geology." Consultants Bureau, New York, 157-174.

—WILHELM E., LAVILLE-TIMSIT L., LELEU M., CACHAU-HERREILLAT R., CAPDECOMME H. (1978) — "Behaviours of base metals around ore deposits; application to geochemical prospecting in temperate climates." Geoch. Expl., Proc 7th Inter. Geoch. Expl. Symp., Golden, Colorado, 185-199.