

Estudio Geoquímico y Petrográfico de rocas subvolcánicas entre la quebrada Chirapotó y el río Arquia (Departamento de Antioquia y Caldas)

LUIS HERNAN SANCHEZ *

ROSA AMELIA PARRA C. *

FRANKLIN ORTIZ B. *

Geólogos, Universidad Nacional, Medellín

RESUMEN

Se presenta en este trabajo los resultados de un estudio geoquímico y petrográfico realizado en un área de 25 km² al norte de Marmato (Caldas) donde se presenta un ambiente geológico con características muy similares a las de esta importante zona aurífera.

Un total de 50 muestras de roca fueron analizadas por el método de absorción atómica para determinar el contenido de metales básicos, principalmente cobre y molibdeno. Simultáneamente se estudiaron petrográficamente 41 muestras de rocas porfídicas que permitieron definir en ellas una extensa alteración propilítica, secundariamente se encontró una alteración filica.

La mineralización metálica y la zona de alteración está estrechamente ligada con rocas de composición dacítica y andesítica, aunque también ha afectado a las varias rocas intruidas por los pórfidos.

En estas rocas se encontraron dos tipos de ocurrencias minerales, una de tipo filoniano y la otra de tipo diseminado. La mineralización consta esencialmente

* Universidad Nacional, Facultad de Ciencias, Apartado Aéreo 3840, Medellín, Colombia.

de pirita, calcopirita, molibdenita, esfalerita.

El estudio geoquímico realizado mostró los siguientes valores para los elementos analizados: cobre, contenido promedio de 61 ppm con un rango de variación de 1 ppm a 1830 ppm; molibdeno, 2 ppm de contenido promedio y valores menores de 4 ppm a 106 ppm; zinc, mostró 70 ppm promedio y variación de 11 ppm a 2800 ppm; plomo, 15 ppm promedio y variación de 5 ppm a 890 ppm; por último la plata en un promedio de 1 ppm y un rango de variación entre valores menores de 1 ppm y 22 ppm.

El análisis estadístico de los resultados encontrados se efectuó mediante los métodos de Lepeltier, promedio móvil, y el análisis factorial. El tratamiento indica una relación entre los metales analizados que permite establecer dos asociaciones muy importantes:

- Cobre · molibdeno · plata
- Zinc · plomo · plata

La distribución de estas asociaciones permitió establecer la concentración de la primera hacia la quebrada Chirapotó mientras que la segunda tiene preferencia por la quebrada La Guavita. Estas dos asociaciones representan áreas geoquímicamente anómalas y están correlacionadas con la presencia de mineralizaciones vetiformes.

INTRODUCCION

La región donde se llevó a cabo este estudio, se caracteriza por tener rocas subvolcánicas de composición dacítica y andesítica muy similares a las rocas portadoras de mineralización en el distrito minero de Marmato (Caldas). Estas unidades han sido consideradas como la fuente de las mineralizaciones auríferas y por lo tanto su distribución en áreas vecinas son un blanco muy importante para la búsqueda de nuevos yacimientos. Por otra parte en estudios recientes se menciona la posible existencia de un yacimiento del tipo pórfido cuprífero en Marmato.

En este trabajo se ha realizado la cartografía geológica y el estudio geoquímico a escala 1:10.000 del área entre el río Arquía y la quebrada Chirapotó (norte de Marmato), teniendo como objetivos establecer la distribución geoquímica de los elementos Cu, Mo, Zn, Pb y Ag, y las características petrográficas de las rocas porfídicas del área con miras a determinar la posible existencia de una mineralización del tipo pórfido cuprífero.

Localización

El área estudiada se encuentra en los límites de los departamentos de Antioquia-Caldas, cubriendo un área de 25 Km², dentro de la plancha 186-II-C a escala 1:25.000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (I.G.A.C.). De acuerdo con ella las coordenadas de sus vértices son:

X : 1101.000

Y : 1163.000

X : 1106.000

Y : 1168.000

Se llega al área por la carretera pavimentada que de Medellín conduce al sur del país (Troncal Occidental) pasando por las localidades de Caldas, Versalles, Santa Bárbara y La Pintada, hasta llegar al sitio de Chiropotó. La distancia aproximada entre Medellín y Chiropotó es de unos 140 Kilómetros (Véase Figura 1).

Método de trabajo

El trabajo de campo consistió en la realización de una cartografía geológica convencional y un muestreo sistemático de la unidad porfídica; para esto se utilizó la plancha topográfica 186- II-C a escala 1:25.000 del I.G.A.C. ampliada a escala 1:10.000.

AGRADECIMIENTOS

El estudio se pudo llevar a cabo, gracias a la estrecha colaboración del Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras (INGEOMINAS). El Instituto dio ayuda económica, realizó los análisis químicos y personal de la regional de Medellín apoyaron con su experiencia en el tratamiento estadístico de los resultados químicos. Por esta razón expresamos nuestros más sinceros agradecimientos a la Institución.

GEOLOGIA

Las principales unidades litológicas cartografiadas y diferenciadas en el área de estudio se agrupan de la siguiente manera: Rocas metamórficas que comprenden serpentinitas, anfibolitas y esquistos; rocas sedimentarias compuestas por areniscas y arcillas consolidadas; rocas ígneas volcánicas que incluyen pórfidos dacíticos y andesíticos y por último, aluviones y coluviones recientes. El mayor cuidado se dispensó a la descripción de las rocas porfídicas y dado que estas son el principal objetivo del estudio se discutirán con más detalle.

Rocas Metamórficas

Una secuencia de rocas metamórficas compuesta por anfibolitas granatíferas, esquistos verdes y esquistos silíceos grafitosos son descritas por TOUSSAINT y RESTREPO (1974), en el río Arquía. Estos autores con base en la presencia de granate en las anfibolitas y cloritoide en los esquistos silíceos grafitosos,

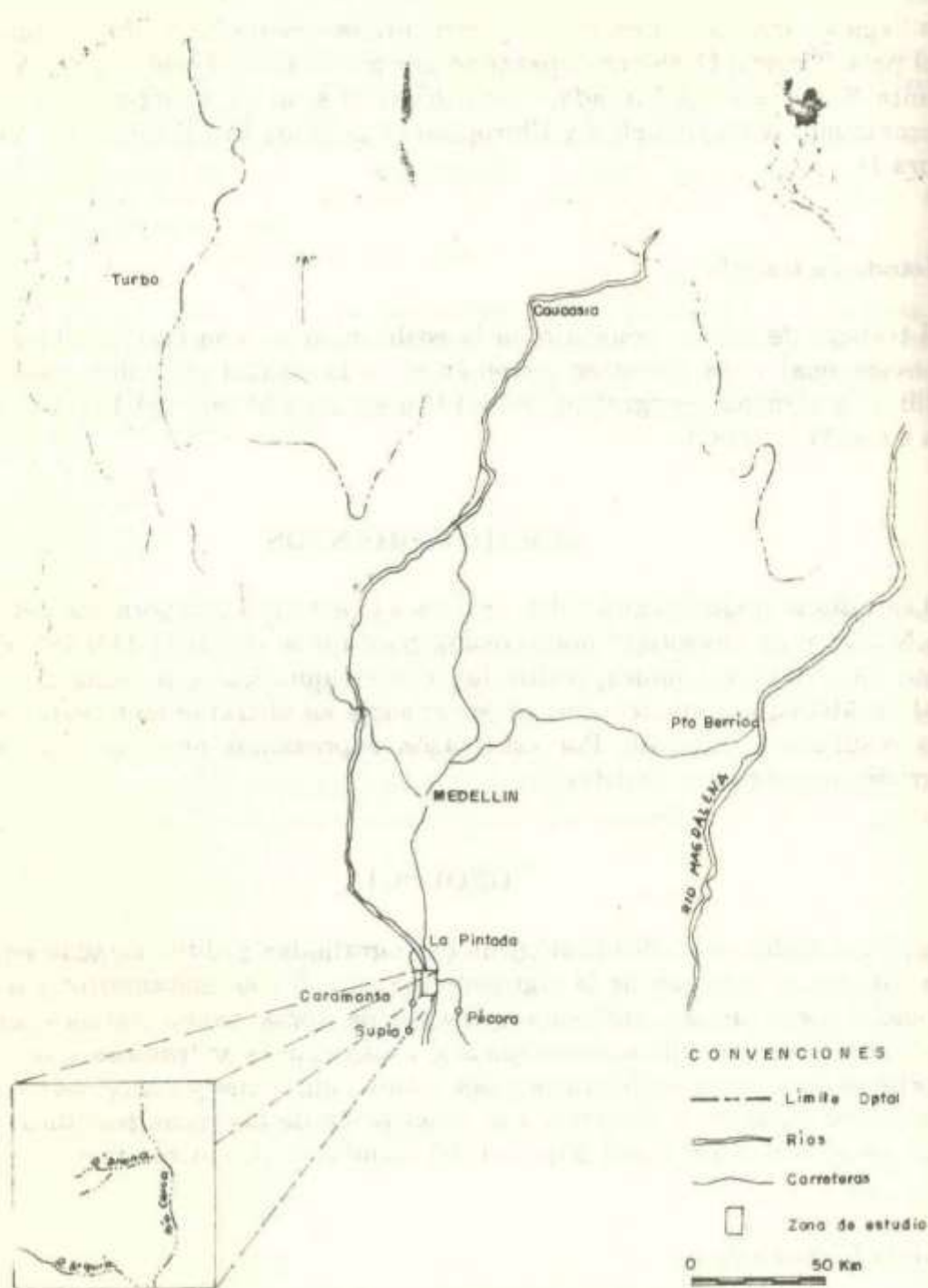


FIGURA 1. Localización general del área.

consideraron que las rocas han sufrido metamorfismo de media presión o sea Barroviano. Además, dado que la datación de las anfibolitas granatíferas del río Arquía, por el método K/Ar es de 110 ± 5 m.a., asumen un evento metamórfico del Cretáceo Inferior. Este evento fue causado por la obducción de una secuencia de peridotitas y serpentinitas asociadas a gabros y dioritas, al cual denominan Complejo Ofiolítico del Cauca.

ARIAS y CABALLERO (1978), estudian en detalle las características petrográficas del Grupo Arquía y lo consideran compuesto de las siguientes unidades: anfibolitas granatíferas, anfibolitas saussuríticas, esquistos verdes (incluyen esquistos cloríticos, esquistos actinolíticos y esquistos verdes masivos) y esquistos cuarzo moscovíticos con grafito.

GONZALEZ, H. (1980), menciona las rocas metamórficas que afloran en el área y las denomina esquistos anfibólicos del río Cauca.

Rocas sedimentarias

Constituye una franja irregular que va de norte a sur en el extremo occidental. La unidad está constituida por areniscas de color gris verdoso, de grano fino a medio (con cuarzo, micas y minerales máficos) y arcillas mal estratificadas de color violáceo. Estas rocas reposan discordantemente sobre las rocas metamórficas y a la vez son intruidas por la unidad de pórfidos.

Esta formación sedimentaria estudiada inicialmente por GROSSE (1926), entre La Pintada y Santa Fé de Antioquia y denominada Terciario Carbonífero de Antioquia. Más tarde fue datada palinológicamente por VAN DER HAMMEN (1958), quien asigna una edad que varía desde el Oligoceno Superior hasta el Mioceno Inferior.

GONZALEZ, H. (1976), estudia el conjunto sedimentario en un área de 700 Km² entre Amagá y Valparaiso y en otras cuencas menores cerca a Supía y Riosucio. Correlaciona estas rocas con el Terciario Carbonífero de Antioquia, designándolas con el nombre de Formación Amagá.

Rocas Hipoabisales Porfiríticas

Forman parte de una serie de cuerpos intrusivos de edad terciaria que afloran sobre ambos márgenes del río Cauca. Fueron descritas por GROSSE, E. (1926), sobre la margen oriental del mencionado río, quien consideró su consolidación a poca profundidad de la superficie, por tener una textura normal porfídica con una composición primordialmente andesítica.

GONZALEZ, H. (1980), diferencia dos facies dentro de estos pórfidos, una dacítica (como en Marmato) y otra andesítica (como en Cerro Bravo, etc.) relacionando las mineralizaciones del área de Marmato a este tipo de roca.

Las rocas hipoabisales porfiríticas cubren un área bastante extensa, constituyendo cuerpos sobresalientes en el área cartografiada, afloran hacia el oeste en un área aproximada de 11 Km² en forma continua de norte a sur y hacia el oeste en un área aproximada de 4 Km², hay además pequeñas ventanas dentro de las otras unidades.

Del análisis petrográfico de las 41 muestras tomadas en los diferentes afloramientos de esta unidad, 31 fueron clasificadas como pórfidos andesíticos, 8 como pórfidos dacíticos y se encontraron 1 tonalita y 1 microdiorita.

Los pórfidos andesíticos cubren un 90% de área cartografiada y se encuentran principalmente conformando la vertiente izquierda del río Cauca; por el contrario los pórfidos dacíticos cubren áreas menos extensas a manera de ventanas dentro de la unidad metamórfica.

En muestras de mano en general son rocas de composición intermedia, diferenciándose dos facies; una andesítica y otra dacítica. Cuando la roca está fresca es de color gris medio a clara y cuando se altera toma un color pardo amarillento debido a la oxidación de los sulfuros contenidos en la roca.

Los pórfidos dacíticos se diferencian de los pórfidos andesíticos por la presencia de fenocristales de cuarzo bipiramidal y redondeados, además la biotita se observa con más frecuencia en este tipo de roca. Cuando han sido meteorizados el cuarzo persiste y resalta en el material descompuesto. Por otra parte en esta unidad hay un porcentaje más alto de sulfuros.

El cambio de pórfidos dacíticos a andesíticos es transicional, existiendo algunas variaciones en ambas rocas. En cuanto al tamaño del grano se encuentran variaciones a microdioritas y tonalita (muestra UN-7228 y UN-7373).

Los pórfidos andesíticos presentan fenocristales de plagioclasa de tamaño variable, los cuales alcanzan dimensiones hasta de 2 cm en su longitud mayor; agujas negras y brillantes de hornblenda y ocasionalmente finas láminas de biotita; éstos minerales están rodeados por una matriz microcristalina de color gris-azuloso.

Al microscopio se observa una textura hipidiomórfica definida por fenocristales de hornblenda, plagioclasa y biotita, la matriz es holocristalina con plagioclase anhedral de composición intermedia, no maclada, hornblenda, clorita y opacos.

los fenocristales de plagioclasa son euhedrales, maclados según la ley de albita, carlsbad y periclina, comúnmente con zonamiento inverso, aunque ocasionalmente se presenta zonamiento normal u oscilatorio, su composición fue determinada utilizando el método de Michel-Levy sobre las maclas de albita obteniéndose una composición de tipo intermedio andesina-labradorita.

La hornblenda de forma subhedral, con pleocrismo según:

X : amarillo verdoso, verde amarillento

Y : verde, verde amarillento oscuro

Z : verde, verde amarillento

Comúnmente se encuentran en secciones longitudinales, con clivaje en una dirección paralela a (010), mostrando raramente la sección transversal con el desarrollo de dos clivajes.

Estos cristales por alteración pasan casi en su totalidad a clorita y carbonato; cuando algunos cristales presentan coronas de reacción éstas son de magnetita y augita, este último mineral se pudo haber formado por contaminación del magma o por refusión.

Biotita: se encuentra como accesorio en fenocristales de forma subhedral, con pleocroismo según:

X : amarillo

Y : marrón rojizo

Z : marrón rojizo

En la Tabla 1, se presentan los análisis modales para cinco muestras de pórfidos.

Cuarzo: de forma anhedral, redondeado, bipiramidal generalmente se encuentra como accesorio de los pórfidos andesíticos, y alcanza porcentajes máximos de 10% en los pórfidos dacíticos.

Sulfuros: la pirita es el sulfuro más abundante por lo general en forma diseminada en la mayoría de las muestras, es de forma anhedral. La calcopirita es el sulfuro que se encuentra en orden de abundancia siguiendo la pirita, diferenciándose de ésta por su color amarillo latón. Ambos minerales se encuentran además rellenando microfracturas la cual sugiere la posibilidad de dos eventos de mineralización. El porcentaje de sulfuros puede llegar hasta el 7%.

Accesorios comunes: En la mayoría de las muestras es común encontrar apatito, circón y rutilo.

Con miras a definir las características litogeoquímicas de esta unidad se enviaron a análisis de roca total cinco muestras de pórfido dacítico y andesítico, cuyos resultados se observan en la Tabla 2.

Nótese que estas rocas se caracterizan por tener contenidos de SiO_2 que varían entre 56.38% y 62.08% y contenidos de FeO/MgO entre 1.44% y 2.73% que representados en un diagrama de Miyashiro; tal como lo presenta JARAMILLO, J.M. (1976). (Figuras 27, 28) para las rocas del Nevado del Ruiz y la depresión del Cauca, indican tendencias calcoalcalinas. Salvo la muestra UN-7382 con 62.30% SiO_2 y 6.45% de FeO/MgO que indica tendencias toleíticas.

Coluviones:

Hacen parte del material de vertiente de las laderas, compuestas por bloques de tamaño variable de rocas meteorizadas de diferentes tipo de matriz terrosa. Se localizan a lo largo de la carretera troncal occidental, el ferrocarril del Pacífico y las partes altas de las quebradas La Guavita, Diana y San Pedro.

Aluviones

Remanentes de aluviones se encuentran en el río Cauca y en las partes bajas de las quebradas principalmente en Chirapotó, Arquía y Pácora.

Predominan bancos de gravas con intercalaciones de arena y limo. Los aluviones del río Arquía y Pácora son auríferos y están siendo trabajados en forma rudimentaria.

MANIFESTACIONES MINERALES Y TIPOS DE ALTERACION HIDROTERMAL

Uno de los yacimientos de oro y plata de mayor importancia en el país es el de Marmato, Departamento de Caldas.

Este depósito está relacionado con las intrusiones de los pórfidos dacíticos y andesíticos; y se caracteriza por tener varios filones subparalelos y ramifica-

TABLA 1.— Análisis modales, basados en el conteo de 1000 puntos sobre cinco secciones delgadas correspondientes a pórfidos.

Muestras	Localización	Matriz	FENOCRISTALES				
			Plagio-clasa	Horn-blenda	Biotita	Cuarzo	Accesorios
7227	Pórfido Dactílico quebrada Chirapotó	37.6	30.8	--	10.8	9.7	3.4
7247	Andesita porfídica. Río Arquía	63.2	32.8	--	--	1.0	2.4
7231	Pórfido andesítico. Quebrada La Guavita	53.8	16.1	19.4	--	6.4	4.3
7232	Dactílico porfídica Quebrada La Guavita	69.8	17.2	--	--	9.3	4.6
7237	Pórfido dactílico, Quebrada Chirapotó	34.0	25.8	15.3	--	14.4	11.3

TABLA 2.— Resultados de los análisis químicos en roca total de cinco muestras de roca porfírica del área Arquia-Chirapotó (Antioquia-Caldas). Realizados por el INGEOMINAS, Bogotá.

%	7368	7371	7373	7376	7382
SiO ₂	61.00	62.04	62.08	56.38	62.30
Al ₂ O ₃	17.57	14.62	16.74	15.98	16.39
FeO	2.78	3.80	2.88	3.84	5.36
F ₂ O ₃	3.35	4.21	1.80	3.77	0.76
TiO ₂	0.84	0.90	0.56	0.95	0.90
P ₂ O ₅	0.45	0.85	0.80	0.63	0.59
MnO	0.08	0.08	0.08	0.13	0.04
CaO	4.63	4.49	4.77	5.60	5.05
MgO	1.36	1.39	1.99	2.41	0.83
Na ₂ O	3.91	3.64	3.91	3.34	2.12
K ₂ O	2.07	2.01	1.81	2.28	0.82
F ₂ O ₃	6.44	8.43	5.00	8.04	6.72
FeO/MgO	2.04	2.73	1.44	1.59	6.45
Na ₂ +K ₂ O	5.98	5.65	5.72	5.62	2.94
Nombre de la roca	Andesita Porfídica	Andesita Porfídica	Tonalita	Andesita Porfídica	Dacita Porfídica

dos. Una segunda presentación de la mineralización se encuentra en forma de diseminación, al parecer de mayor significación en los pórfidos dacíticos.

Los estudios realizados por MORA y CUELLAR (1982), sobre el Stock de Marmato indican que el cuerpo mineralizado tiene forma elongada y ovalada en dirección norte-sur, siendo éste el portador del 95% de la mineralización encontrada en esta área.

Según estos mismos autores la mineralización a profundidad parece corresponder a un yacimiento de tipo pórfido cuprífero de Cu-Au. Aunque para GONZALEZ, H. (1980), estas mineralizaciones no corresponden estrictamente a los mundialmente conocidos depósitos de pórfido cuprífero.

Tipos y características de la Mineralización

Los principales sistemas de mineralización presentes en el área Arquía-Chirapotá corresponden a sulfuros diseminados y sistemas filonianos.

Los sulfuros primarios presentes en el área son pirita-calcopirita, pirrotina y molibdenita. Hay algo de esfalerita y galena.

Dentro de estos sulfuros la pirita es el mineral más abundante; pudiendo alcanzar, en apreciación visual, hasta un 7% de la roca. La calcopirita es el segundo mineral de abundancia y se encuentra en proporción de 1/6 con relación a la pirita. Estos sulfuros aparecen en los cuerpos porfídicos diseminados y rellenando fracturas. Por otra parte, hay una estrecha relación pórfido-mineralización vetiforme ya que los filones se observan afectando los pórfidos, donde también es frecuente la alteración hidrotermal.

Las principales mineralizaciones filonianas se encuentran registradas en la Tabla 3.

En la zona de estudio se pueden reconocer dos tipos de filones:

- Venas de cuarzo (puede presentarse con cristales euhedrales) con espesores máximos de 50 cm y con porcentaje de mineralización de sulfuros del 20%, con pirita y pirrotina como dominantes y molibdenita como accesorio afectan principalmente la unidad de esquistos biotíticos.
- Venillas de cuarzo (cristales de forma anhedral) mineralizadas con pirita, afectando principalmente a la unidad porfídica y alcanzando espesores máximos de 10 cm.

Donde los pórfidos tienen mineralizaciones de sulfuros diseminados, el sulfuro más abundante es la pirita, ocasionalmente hay calcopirita. La roca expuesta a la interperie se presentan superficialmente cubierta por óxidos de hierro y ocasionalmente costras de malaquita de poco significado.

De acuerdo con los análisis petrográficos y las relaciones de campo se determinaron dos etapas de mineralización, la primera etapa pudo haberse formado contemporáneamente con la intrusión de los pórfidos. A ella correspondería la mineralización diseminada de sulfuros; hay evidencia de cristales subhedrales de pirita rotos, con textura cemento envueltos por minerales posteriores. Luego se originaron zonas de fracturamiento que fueron ocupadas por venas cuarzosas mineralizadas, que representarían el sistema filoniano imperante en la zona de Marmato y de menor significado en nuestra área.

Alteraciones

Los diferentes tipos de alteración se determinaron teniendo en cuenta el estudio de las secciones delgadas de las muestras de pórfidos. Hay dos tipos de alteración hidrotermal de acuerdo con la clasificación hecha por LOWELL y GILBERT (1970), éstas fueron: alteración propilitica y alteración filica, también se determinó alteración argílica, pero probablemente ella esté relacionada a la acción de aguas meteóricas.

Alteración Propilitica: Es el tipo de alteración que caracteriza la zona. La plagioclasa pasa a carbonato y saussurita, dando lugar a la formación de minerales del grupo de la epidota, en muy bajo porcentaje se observa la alteración a sericita. La hornblenda se transforma casi en su totalidad a clorita y carbonato, menos frecuente se desarrollan en los fenocristales bordes de reacción, con formación de opacos y pitoxeno (augita).

La mineralogía típica de esta alteración es clorita carbonato y epidota. La clorita es el mineral secundario más extendido el cual es típico de alteración de depósitos epitermales (Park, 1978). También la presencia de abundante calcita como mineral de alteración hace pensar que el medio es deficiente en alumina permitiendo que el calcio se combine con anhídrido carbónico.

Alteración Filica: Se caracteriza por la presencia de sericita y clorita como producto de alteración de la plagioclasa y la hornblenda respectivamente. Este tipo de alteración es bastante pobre en el área estudiada, detectándose solo en las muestras UN-7236 y UN-7374.

Alteración Argílica: Igualmente que la alteración filica es bastante escasa en la zona, sólo se detectó en la muestra UN-7378 localizada en la quebrada La Campaña. Este tipo de alteración se caracteriza por la presencia de arcillas

TABLA 3.— Manifestaciones filonianas en el área Arquía-Chirapotó (Antioquia-Caldas)

Localidad	Rumbo y Buzamiento	Minerales	Espesor
Q. Chirapotó	N35W/30W	Q. Py, Cp, Prr, Mo	50 cms
Q. Chirapotó	N40E/50E	Py, Cp.	15 cms
Q. Chirapotó	N50W/60E	Q. Py, Cp.	20 cms
Q. Chirapotó	N65E/vertical	Q. Py.	4 cms
Q. Chirapotó	N24W/10W	Q. Py, Cp (?)	10 cms
Q. Chirapotó	N30W/20W	Q. Py.	10 cms
Q. Chirapotó	N70E/20E	Q. Py.	10 cms
Q. Diana	B78E/70E	Q. Py, Gal, Cp	12 cr.
Q. Diana	N20W/70W	Q. Py.	1 cm
Q. Diana	N20W/70W	Q. Py.	1 cm
Q. Diana	N24W/vertical	Q. Py	1 cm
Q. Diana	N40W/70W	Q. Py.	1 cm
Q. Diana	N25W/70W	Q. Py.	1 cm
Q. Diana	N45W/vertical	Q. Py, Cp.	10 cms
Río Arquía	N15W/10E	Q. Py.	1 cm
Río Arquía	N45E/20W	Q. Py.	1 cm
Río Arquía	N85W/5E	Q. Py	1 cm
Río Arquía	N10W/80E	Q. Py	1 cm
Río Arquía	N8W/vertical	Q. Py.	1 cm
Río Arquía	N10W/80E	Q. Py.	1 cm
Q. La Guavita	N5W/74W	Q. Esf, Py.	150 cms

Q = Cuarzo; Py = Piritita; Cp = Calcopirita; Prr = Pirrotina; Esf. = Estalerita; Gal = Galena.

TABLA 4.— Rango de valores obtenidos en los análisis químicos, valores promedios y umbrales para los elementos cobre, molibdeno, zinc, plomo y plata.

Elemento	Rango de valores		Valor promedio Matem.	Valor umbral Matem.	Valor promedio Gráfico	Valor umbral Gráfico
	Máximo	Mínimo				
Cu	1.830	1	61	2.861	60	100
Mo	106	4	3	30	2	12
Zn	2.800	11	85	618	70	150
Pb	890	5	15	65	15	40
Ag	22	1	1	4	1	4

(caolinita) como producto de alteración de la plagioclasa. Por las relaciones observadas entre la roca de caja-filón mineralizado, las paredes de la roca de caja muestra alteración a minerales arcillosos por lo tanto este tipo de alteración parece corresponder a la acción de aguas meteóricas y no a alteración hidrotermal.

GEOQUIMICA

Como ha sido mencionado el sistema de muestreo realizado fue en canal del cual se recuperaron las muestras usadas en el análisis químico por absorción atómica para Cu, Mo, Zn, Pb y Ag. Es de anotar que la solución requerida en tal análisis se obtuvo a partir del ataque con ácido nítrico-ácido perclórico y en muestra previamente pulverizadas y tamizadas a malla menos 80. La solución resultante del ataque con ácido nítrico se prefirió, ya que el anión (NO_3) causa según WARD, D. *et al* (1969) menos problemas de interferencia.

Una vez obtenidos los contenidos de los elementos citados se procedió a su estudio estadístico. El procedimiento seguido en el tratamiento estadístico de los resultados se efectuó mediante el método sugerido por LEPELTIER, C. (1969) y el denominado análisis factorial según DAVIS (1973). De esta manera se buscaba establecer parámetros estadísticos que den una mejor visualización de la distribución de los elementos en la zona de estudio.

A continuación se muestran los resultados de este estudio para luego proceder a la discusión general y la determinación de las áreas más significativas de acuerdo con los elementos analizados, el trabajo petrográfico y el trabajo de campo.

Método de Lepeltier

En la Tabla 4, se encuentra para cada elemento analizado el rango de valores resultantes, valores promedios y umbrales siguiendo el método de LEPELTIER, C. En la Figura 2, se aprecian las curvas de frecuencia acumulativas, un análisis más detallado de ellas se da a continuación.

Cobre.- Al analizar la curva de frecuencia acumulativa para este elemento, se observa la existencia de dos poblaciones distintas en los datos considerados. La línea A, representa una población y la línea B representa la otra. A + B será la mezcla de ambas. El valor medio es leído en la rama A + B donde la abscisa del 50% corta a la recta, en este caso da un valor aproximado de 60 ppm y el valor umbral es leído en la abscisa del punto de quiebre de la línea A + B obteniéndose un valor aproximado de 100 ppm. Se podría tomar

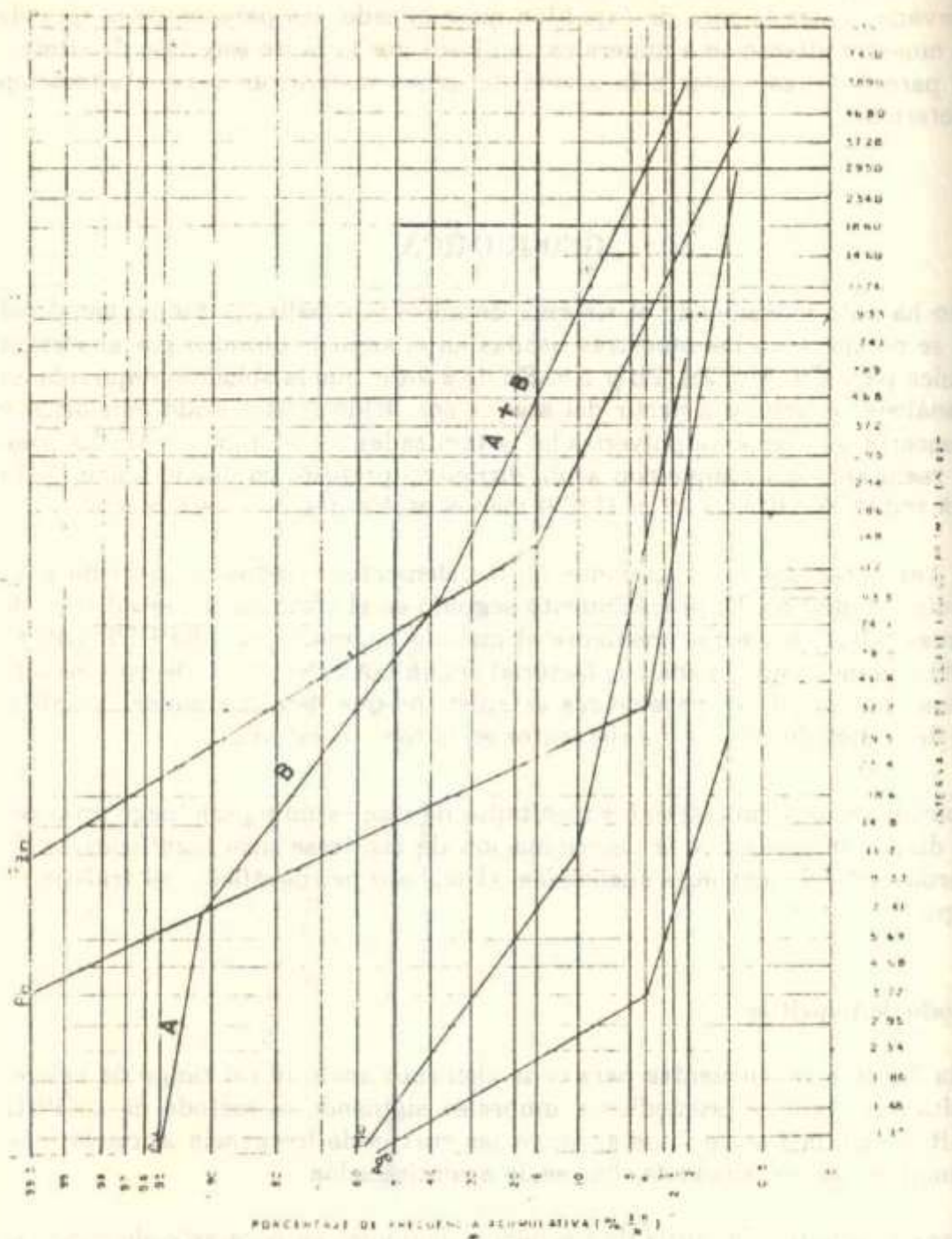


FIGURA 2. Líneas de distribución de frecuencias acumulativas para cobre, molibdeno, zinc, plomo y plata en muestras de pórfido en el área comprendida entre Arquí-Chirapotó (Antioquia-Caldas)

la intersección de la línea más definida (B) con la ordenada 2.5%, lo cual daría un valor de 4.680 ppm; valor que está por encima de los valores detectados en los análisis químicos.

Molibdeno.- La línea de frecuencia acumulada muestra un quiebre hacia una menor pendiente en el nivel del 10%. La abscisa del punto de quiebre en este caso corresponde a un valor de 12 ppm y el valor medio se toma donde la recta corta a la abscisa del 50%, de lo cual resulta un valor aproximado de 2 ppm. Los valores medio y umbral obtenidos matemáticamente fueron 3 ppm y 30 ppm respectivamente.

Zinc.- Para este elemento la curva presenta un quiebre positivo en la abscisa del 16%. El nivel umbral corresponde a 150 ppm., leído en el punto de quiebre de la curva. El valor medio se tomó en la abscisa del 50%, indicando un valor de 70 ppm.

Plomo.- La figura de frecuencia acumulativa presenta un quiebre con un valor de menor pendiente en la abscisa 4%, lo cual sugiere un exceso de valores altos en la población, en una curva de Gauss esto correspondería a una asimetría hacia la derecha en dirección de los valores altos.

El valor promedio ha sido calculado con la rama principal situado a la izquierda del punto de quiebre correspondiente a la abscisa del 50%, o sea 15 ppm. La abscisa del punto de quiebre se ha tomado como valor umbral y equivale a 40 ppm.

Plata.- Este elemento presenta un comportamiento bastante similar al del plomo. Aquí la línea de mayor pendiente corresponde a la rama principal donde se ha determinado el valor promedio correspondiente a 1 ppm y el valor umbral leído en el punto de quiebre equivale a 4 ppm.

Tendencia de Isovalores por el Método de Análisis Factorial, «Factor Vector Analysis»

Este método estadístico es de gran interés en trabajos de exploración geoquímica, dado que permite estimar la asociación entre los diferentes elementos analizados. El método es bastante complicado para calcular y un poco difícil de visualizar ya que se utilizan modelos matemáticos vectoriales. Por esta razón, se hace necesario el uso de un computador para obtener las matrices de correlación.

Los resultados obtenidos permiten establecer los vectores «eigen», a partir de los cuales se obtienen los factores de correlación. En nuestro caso, resultan dos factores (F_1 y F_2), que tienen los mayores porcentajes de similitud (Ver Tablas 5 y 6).

TABLA 5.— Resultados del vector y el valor «eigen» para un Análisis factorial Modo R.

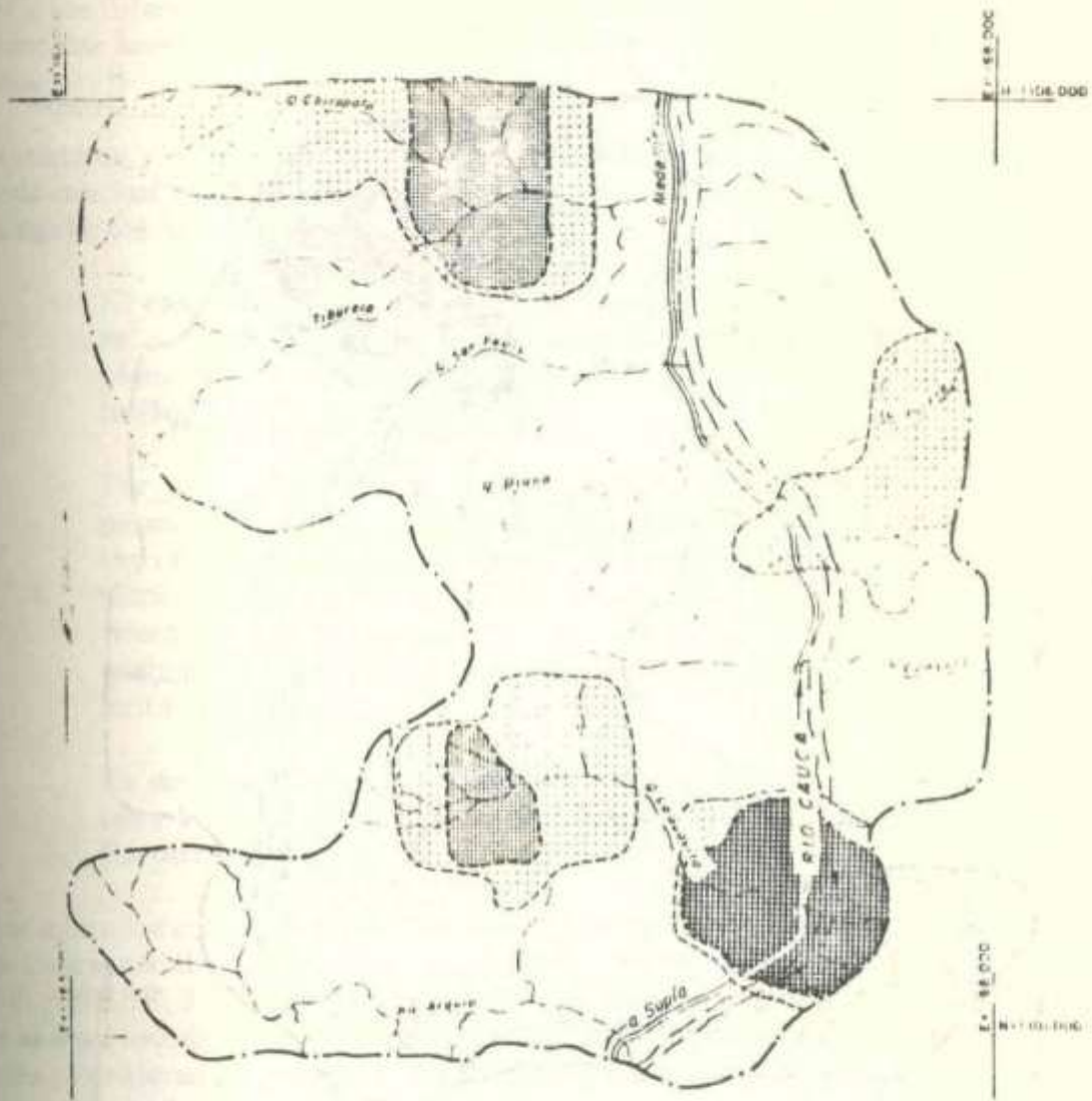
Elemento	VECTORES «EIGEN»				
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅
Cobre	- 0.3014	0.5651	- 0.5110	- 0.520	0.2381
Molibdeno	- 0.4094	0.4271	0.7970	0.29	0.1160
Zinc	0.5878	0.1306	0.2660	- 0.641	- 0.395
Plomo	0.5973	0.2337	0.7938	0.17	0.743
Plata	0.1976	0.6527	- 0.1607	0.537	- 0.469

TABLA 6.— Valor «eigen» y porcentajes de la varianza en el análisis factorial Modo R.

Factor	Valor	Porcentajes de «Similitud sobre los cinco factores dos factores			
		%	% acumul.	%	% acumul.
1	2.17	43.49	43.49	43.49	43.49
2	1.76	35.22	78.72	35.22	78.71
3	0.48	9.77	88.49		
4	0.37	7.39	95.88		
5	0.21	4.12	100.00		

En la Tabla 6, se pueden observar los resultados de los valores para los diferentes factores. Como se ve los factores F₁ y F₂ representan el 78% de la varianza total.

Con estos dos últimos factores considerados de mayor importancia e interés, se procedió a hacer una rotación varimax girándose el sistema con dos ejes de factores independientes para determinar posteriormente los coeficientes que se utilizaron en la elaboración de los mapas. (Figura 3 y 4), representando gráficamente los distintos elementos analizados. El análisis factorial indica que los datos obtenidos representan dos tipos de asociaciones. La primera del Factor 1, corresponde a la asociación Zinc-plomo-plata, la cual tiene una tendencia hacia el sur de la zona en estudio y la asociación sobre-molibdeno-plata, representada por el Factor II, cuya distribución se encuentran hacia el norte.



CONVENCIONES

-  $F_1 > 2$
-  $1 < F_1 < 2$
-  $0 < F_1 < 1$
-  No hay datos para F_1

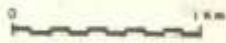
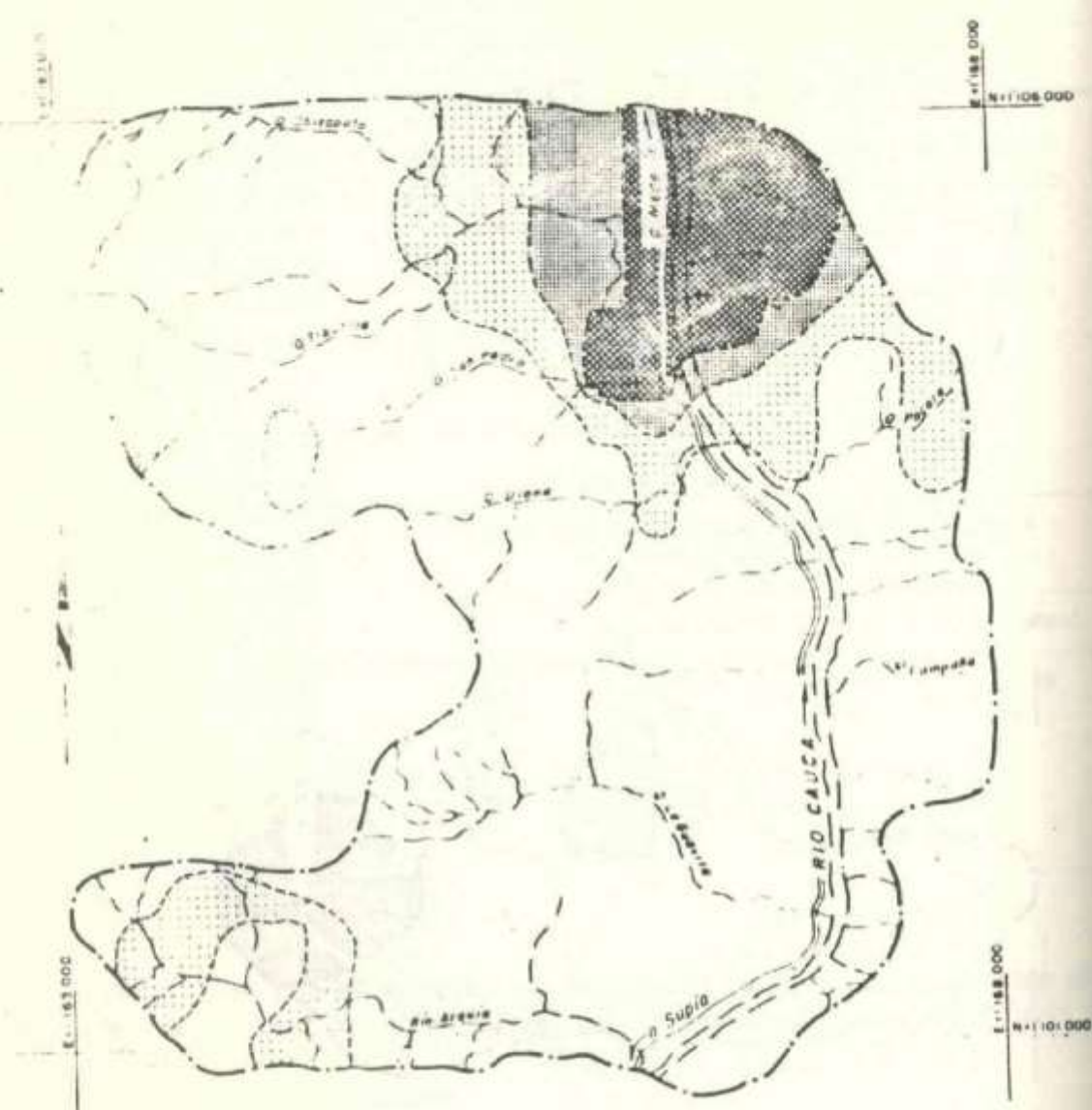






FIGURA 3 Distribución de la asociación zinc-cobre-plata en los porfidos del área Arauca-Chirano (Antioquia-Caldas); obtenida por el método "Factor-Vector-Análisis".



- CONVENCIONES
-  $F_2 > 2$
 -  $1 \leq F_2 \leq 2$
 -  $0 < F_2 < 1$
 -  No hay datos para F_2

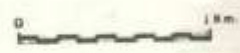


FIGURA 4 Distribución de la asociación carbón-lignito-plat. en los ríos de la zona Arica-Supio (Antioquia-Caldas), obtenida por el método "Factor-Vector-Análisis".

Discusión general sobre los resultados geoquímicos

A pesar del escaso número de muestras analizadas, en el tratamiento estadístico y los diferentes gráficos discutidos en los capítulos anteriores se lograron determinar áreas con valores significativos para los diferentes elementos analizados.

En resumen y de acuerdo a los diferentes análisis hechos en forma general se puede concluir que hay dos áreas anómalas. Esta conclusión es el resultado de los siguientes hechos:

- El análisis factorial delimitó claramente dos asociaciones: la primera representada por el Factor I, corresponde a la asociación zinc-plomo-plata y la segunda representada por el Factor II, indicada por la asociación cobre-molibdeno-plata.
- Por otra parte, la cartografía geológica en el trabajo de campo permitió encontrar varias mineralizaciones de sulfuros en las distintas unidades como ya se discutió. Las mineralizaciones se localizan principalmente en las quebradas Chirapotó y San Pedro y está constituida esencialmente por piritita, calcopiritita y molibdenita. En la quebrada La Guavita se hallaron vetas que constan de cuarzo y esferulita. Ver Figura 3.

Es decir hay una buena correspondencia entre los sulfuros presentes y las asociaciones de los elementos metálicos delimitados por los Factores I y II.

Si se miran los contenidos detectados, se observa como el cobre y el molibdeno que tienen una abundancia de 30 y 1.5 ppm en rocas ígneas félsicas (HAWKES, H.E. y WEBB, J.S. (1962), representan la asociación indicada por el Factor II. En el área estudiada estos elementos están concentrados en las zonas delimitadas con valores que superan las 100 ppm para el cobre y 12 ppm para el molibdeno, lo cual equivale a considerar que esta zona es anómala geoquímicamente para los citados elementos.

La anomalía en el caso del cobre y del molibdeno está representada en el mapa por las partes bajas de las quebradas San Pedro, Chirapotó, Diana, Pácora y la parte alta del río Arquía. Esta anomalía geoquímica es muy probable que esté relacionada con la presencia de mineralizaciones vetiformes y diseminadas explicadas en el Capítulo 3. ver Figura 4.

El zinc cuyo contenido en las rocas ígneas félsicas es de 60 ppm, delimita zonas en el área que superan las 150 pp. Al observar la Figura 3, las zonas definidas como supuestamente anómalas corresponden a muestras recolectadas en luga-

res bastantes cercanos a los filones mineralizados (Véase mapa geológico), en estos filones se detectó la presencia de cuarzo y pirita excepto en la quebrada La Guavita donde se manifestó la presencia de esfalerita.

En el plomo, se encontraron dos muestras con valores de 65 y 890 ppm; resultados que si se comparan con el valor promedio de 48 ppm en las rocas ígneas félsicas

CONCLUSIONES

La mineralización en el área Arquía-Chirapotó está relacionada a pequeños intrusivos de características subvolcánicas que forman parte del magmatismo ácido a intermedio que afectó el Occidente Colombiano durante el Cenozoico (Plioceno). Los resultados de cinco análisis en roca total indican características calcoalcalinas del magma generador.

La mineralización de sulfuros primarios ocurre como venillas y diseminaciones, consiste esencialmente de pirita y calcopirita, aunque también se observó galena y esfalerita las cuales están subordinados al contacto rocas porfídicas rocas metamórficas. Los filones que afectan esta última unidad son de mejor significado por su espesor y contenido de sulfuros.

La extensa alteración propilítica y su relación con los bajos porcentajes de sulfuros (principalmente pirita), hace pensar que la alteración del área correspondería a la zona más externa de la alteración de un eventual yacimiento tipo pórfido cuprífero. De existir éste, la zonación vertical indicaría la presencia a mayor profundidad de la alteración potásica, a la cual debería asociarse un alto contenido de cobre o molibdeno.

Se nota bastante la distribución areal de los metales básicos, dentro de los cuales se infiere cierta zonación. Esta indica valores altos de cobre y molibdeno, concentrados hacia el extremo norte (zona de Chirapotó), mientras que los valores altos de zinc y plomo se ubican al extremo sur (Zona de la quebrada La Guavita).

La evaluación de los resultados geoquímicos demuestran la estrecha relación de la plata con los demás elementos tales como cobre, molibdeno, zinc y plomo. De éstos, el plomo parece ser el más indicado para ser utilizado como elemento guía en la prospección de plata y ésta en asociación con el oro. Para el oro se desconoce su contenido, pero se supone su presencia, por lo cual sería interesante investigarlo.

Las zonas más importantes delimitadas sobre los mapas de isovalores son correlacionadas con la presencia de mineralizaciones diseminadas y de mayor

importancia en la cercanía con las mineralizaciones vetiformes, por lo tanto se pueden considerar como áreas geoquímicamente anómalas.

(HAWKES, H.E y WEBB, J.S., 1962), tiene significado geoquímico. Al igual que los elementos analizados, la anomalía se ubica en las cercanías de una mineralización filoniana en la quebrada La Guavita.

Las anomalías delimitadas por la plata, se caracterizan por superponerse aproximadamente con las anomalías indicadas por los demás elementos. Este elemento tiene un promedio de 0.15 ppm en las rocas ígneas félsicas, que comparado con los valores detectados, superiores o iguales, a 1 ppm de nuevo un resultado significativo. Todas las quebradas muestreadas reportan datos iguales o superiores a este valor, pero sólo las quebradas La Guavita y Chirapoto tiene valores del orden de 22 y 5 ppm respectivamente.

ABSTRACT

The results of a geochemical and petrographic study of on 25 sq km area North o Marmato (Caldas), with a similar geological environments as the well known gold producing area presented in this thesis.

A total of 50 porphyritic rock samples were analysed by atomic absorption to determine the contents of the following basic metals: copper, molybdenum, zinc, lead and silver with the greatest interest in the first two. 41 of the same samples were analyzed petrographically demonstrating that they were affected by an extensive propylite alteration followed by a filic phase of secondary importance.

The mineralization and the alteration zone are closely associated with dacitic and andesitic rocks, but they also affected the various country rocks.

In these rocks two types of mineral occurrences were found, one in veins and the other disseminated. The mineral associations consist essentially of pyrite, chalcopyrite, molybdenite and sphalerite.

The geochemical study showed the following contents of the elements analyzed; copper, average 61 ppm, with a range from 1 ppm to 1830 ppm; molybdenum, average 2 ppm, with values less than 4 ppm to 106 ppm; zinc, which showed 70 ppm average with a variation from 11 ppm to 2800 ppm; lead, with a 15 ppm average and a variation between 5 ppm and 890 ppm; and finally, silver which averaged 1 ppm and varied between 1 ppm and 22 ppm.

The results were analysed by Lepeltier's, the moving average and factorial analysis methods. The treatments indicate, importantly that the following associations are statistically related:

- Copper · molybdenum · silver
- Zinc · lead · silver

The distribution of these association is zonal with the maximum concentration on the first towards the Q. Chirapoto, while the second is strong in the Q. La Guavita. These two associations indicate the existence of areas with geochemical anomalies which are correlated with lode mineralization.

BIBLIOGRAFIA

- ALVAREZ, J. y ARIAS, A. Geología Local del área de Marmato. Informe 1573 Medellín, Ingeominas. 1970. 47 p.
- ARIAS, A. y CABALLERO, H. Metamorfismo Barroviano del Grupo Arquía. Tesis Ing., Geol. Medellín, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, 1978.
- BOTERO, J. y ZULUAGA, C. Geoquímica y Estructura de los depósitos de oro de Marmato. Tesis Ing., Geol. Medellín, Universidad Nacional de Colombia, Facultad Nacional de Minas, 1980. 141 p.
- DAVIS, J.C. Statistics and data analysis in geology John Wiley and sons, inc. New York, 1973. 550 p.
- GONZALEZ, H. Geología del cuadrángulo J-8, Sonsón. Ingeominas, Bogotá, 1974.
- GONZALEZ, H. Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina). Bol. Geol. Ingeominas Medellín, Vol. 23 No. 1, p. 1-98. 1980.
- GROSSE E. Estudio geológico del Terciario Carbonífero de Antioquia. Berlín Dietrich Reimer, 1926. 361 p.
- HAWKES, H.E. and WEBB, J.S. Geochemistry in mineral exploration. Ed. Harper & Row. New York, 1962, 145 p.
- JARAMILLO, J.M. Volcanic rocks of the Cauca Valley Colombia, M.A. Thesis, Rice. University of Houston, Texas, 1976. 39 p.
- JARAMILLO, J.M. Petrology and geochemistry of the nevado del Ruiz colcano northern Andes, Colombia. Ph.D. Thesis University of Houston, 1980, 167 p.
- LEPELTIER, C. A simplified statistical treatment of geochemical data by graphical representation. Econ. Geol., Vol. 64, No. 1 pp. 538-550. 1969.
- MORA, B. y CUELLAR, J. Paragénesis del yacimiento de las minas Nacionales de Marmato. Tesis Geol. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, 1982.
- RESTREPO, J.J., TOUSSAINT, J.F. Edades radiométricas de algunas rocas de Antioquia. Medellín, Publicación especial. Facultad Nacional de Minas pp 6-26, 1975.
- TOUSSAINT, J.F. y RESTREPO, J.J. La Formación Abejorral y sus implicaciones sobre la evolución de la Cordillera Central de Colombia durante el Cretáceo: Anales Fac. Minas, No. 58. 1974.
- TOUSSAINT, J.F. Grandes rasgos geológicos de la parte septentrional del occidente colombiano. Bol. Geol., Medellín, No. 3 p. 231, 1978.
- VAN DER HAMMEN T. Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continentales y Tectogenésis de los Andes Colombianos. Bol. Geol. Bogotá, Vol. 6 (1-3), pp. 67-128, 1960.
- WINKER, H.G.F. Petrogenesis of Metamorphic rocks, 4th Ed. Springer Verlag New York, 1979. 247 p.