

**MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA
INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES
GEOLOGICO-MINERAS**

**GEOLOGIA Y GEOQUIMICA DE LAS MINAS DE ESMERALDAS
DE GACHALA, CUNDINAMARCA**

INFORME No. 1684

Por:

RICARDO ESCOVAR R.

BOGOTA, 1975

CONTENIDO

	<u>Página</u>
RESUMEN	121
ABSTRACT	121
0. INTRODUCCION	122
1. GEOLOGIA REGIONAL	122
1.1. ESTRATIGRAFIA	122
1.2. TECTONICA	125
2. GEOLOGIA DETALLADA	125
2.1. ESTRATIGRAFIA	125
2.1.1. PALEOZOICO	125
2.1.1.1. Grupo Farallones	125
2.1.2. MESOZOICO	128
2.1.2.1. Calizas del Guavio	128
2.1.2.2. Lutitas de Macanal	129
2.1.3. CENOZOICO	129
2.2. GEOLOGIA ESTRUCTURAL	129
3. GEOLOGIA ECONOMICA	130
3.1. CARACTERISTICAS DE LA MINERALIZACION	130
3.1.1. ALTERACION METASOMATICA	130
3.1.2. CONTROL TECTONICO	131
3.1.3. TEMPERATURA	131
3.2. PROBLEMAS RELACIONADOS CON LA MINERALIZACION	131
3.2.1. ORIGEN Y COMPOSICION DE LAS SOLUCIONES	131
3.2.2. MECANISMOS DE TRANSPORTE, PRECIPITACION A PARTIR DE LAS SOLUCIONES, Y LOCALIZACION DE LOS CUERPOS MINERALIZADOS	132
3.2.3. EDAD DE LAS MINERALIZACIONES	133
4. GEOQUIMICA	133
4.1. DISTRIBUCION DE LOS ELEMENTOS EN ROCAS	133
4.1.1. SODIO	136
4.1.2. LITIO	139
4.1.3. BARIO	139
4.1.4. POTASIO	139
4.1.5. PLOMO	139
4.1.6. BERILIO	144
4.1.7. MOLIBDENO	144
4.1.8. ESTRONCIO	144
4.1.9. ZINC	144
4.1.10. COBRE	144
4.1.11. NIQUEL	144
4.1.12. FORMULAS COMBINADAS	145
4.2. DISTRIBUCION DE LOS ELEMENTOS EN SUELOS	145
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	148
6. BIBLIOGRAFIA	153

FIGURAS

1. Mapa de localización del área de estudio	123
2. Mapa geológico regional y lugares de muestreo comparativo	124

	<u>Página</u>
3. Geología Detallada del área de Gachalá	126
3a. Columna Estratigráfica de la Región de Gachalá	127
4. Mapa de localización de muestras de rocas	134
5. Mapa de localización de muestras de suelos.	135
6. Distribución de elementos en rocas	138
7. Mapa con la distribución de los valores de Sodio en rocas	140
8. Mapa con la distribución de los valores de Litio en rocas	141
9. Mapa con la distribución de los valores de Bario en rocas.	142
10. Mapa con la distribución de los valores de Potasio en rocas	143
11. Histograma de distribución de los valores M_1 y M_2	146
12. Mapa con la distribución de los valores M_1	147
13. Distribución de los elementos en suelos	149
14. Mapa con la distribución de los valores de Sodio en suelos	150
15. Mapa con la distribución de los valores de Litio en suelos	151
16. Mapa con la distribución de los valores de Li/Na en suelos.	152

CUADROS

1. Distribución de muestras de rocas por poblaciones y grupos.	136
2. Distribución de los elementos en rocas.	137

RESUMEN

Las mineralizaciones de esmeraldas en la región de Gachalá están emplazadas en brechas, venas y a veces en las paredes de fallas, las cuales tienen un sentido N-NE y afectan los estratos más bajos del Mesozoico. Afloran también en el área rocas sedimentarias de edad Paleozoica.

Estas mineralizaciones están íntimamente relacionadas a lutitas negras (shales), con un alto grado de alteración metasomática. Consiste esta alteración en reemplazamiento de la roca original y relleno de espacios porosos por oligoclasa, dolomita y pirita, algo de calcita y trazas de rutilo y fluorita.

Se cree que las soluciones mineralizantes pudieron ser originadas en aguas meteóricas y/o connatas de los sedimentos encajantes, las cuales por lixiviación, asimilan a su paso a través de las rocas los iones necesarios para la precipitación de esmeraldas. Varios hechos sugieren una íntima relación entre las secuencias evaporíticas y las esmeraldas, suministrando las primeras, por solución, algunos de los iones necesarios para la formación de las segundas.

Debido al conocimiento de las características estructurales, litológicas y geoquímicas de los yacimientos, se proponen ciertas guías para la prospección de esmeraldas en todas las etapas, desde la exploración a escala regional, hasta la conducción de trabajos de minería.

ABSTRACT

Emerald mineralization in the Gachala region is emplaced in breccias, veins, and also in fault walls, these faults having a N-NE strike, and affecting lower Mesozoic strata. Sedimentary rocks of Paleozoic age are also present in the area.

Mineralization is intimately related to the black shales, showing a high degree of metasomatic alteration. This alteration consists of replacement of the host rock and cavity filling by oligoclase, dolomite, and pyrite, some calcite, and traces of rutile and fluorite.

Mineralizing solutions could have been originated by meteoric and/or connate water from sediments, this water leaching the necessary ions on their way through the host rocks. Many features suggest a close relationship between evaporitic sequences and emerald mineralization, contributing the former, by solution, some of the ions required to the formation of the latter.

Some emerald exploration guides are proposed, based on the knowledge of structural, lithologic, and geochemical characteristics. Different methods are applicable in all exploration steps, from a regional scale, to the orientation of mining works.

0. INTRODUCCION

El presente trabajo sobre la geología y la geoquímica de las minas de esmeraldas de Gachalá, fue realizado como parte del Proyecto Esmeraldas INGEOMINAS-Naciones Unidas. El principal objetivo fue el de conocer las características de la mineralización de esmeraldas, con el fin de poder entender aspectos de su origen y modo de formación y de poder determinar guías para su prospección en esta parte de la Cordillera Oriental.

El área está ubicada a una distancia aproximada de 75 km en línea recta al NE de Bogotá, unida a esta ciudad por una carretera en parte sin pavimentar (fig. 1). El viaje dura aproximadamente cinco horas. Las minas en la región de Gachalá son propiedad del Gobierno Colombiano y algunas de ellas están cedidas para su explotación a particulares por el sistema de contratos.

El área fue estudiada anteriormente por Suárez Hoyos (1945), Wokittel y López Casas (1953), Wokittel y Mutis Jurado (1954) y Guerra (1972). Este estudio consistió esencialmente en el levantamiento del mapa geológico en el área de las minas y en la toma de muestras de rocas y suelos para su posterior análisis químico y petrográfico. Por medio de la cartografía geológica se esperaba encontrar guías litológicas y estructurales para la exploración de esmeraldas.

El mapa geológico no pudo ser terminado totalmente, debido a la decisión del Gobierno Colombiano de suspender el proyecto a comienzos del año en curso. Es así como aún falta mucho detalle, especialmente en el aspecto estructural. Fue nuestro deseo el realizar un mapa de fracturas para determinar con más exactitud el patrón estructural del área y extender la cartografía litológica, cubriendo un área mayor. Sin embargo, con los datos obtenidos se pudieron conseguir resultados muy alentadores para la prospección de esmeraldas.

Por medio del estudio geoquímico y teniendo como base el trabajo que sobre la mina de Muzo realizaron Beus (1972) y Bakker (1974), se buscó tener un conocimiento de las

características geoquímicas de la mineralización de berilo y de esta manera encontrar elementos guías útiles para la exploración y un sistema adecuado de muestreo. Los resultados del estudio en este sentido fueron altamente satisfactorios.

Los trabajos de campo fueron realizados con la colaboración de Enrique Gil; Diana Gutiérrez realizó la totalidad de los análisis paleontológicos; Anthony Mariano, Carlos Arce y Gloria Rodríguez, colaboraron en el estudio de numerosas secciones delgadas. Finalmente, algunas de las ideas aquí expuestas fueron discutidas con los miembros del proyecto, en particular con el Director por parte de las Naciones Unidas, Pietter Bakker.

1. GEOLOGIA REGIONAL

A continuación se describen los principales rasgos de la estratigrafía y la tectónica del área.

1.1. ESTRATIGRAFIA

Guerra (1972) realizó el levantamiento geológico del área (fig. 2). En ella afloran rocas de edad Paleozoico Superior, probablemente Jurásico Superior y Cretáceo Inferior, distribuidas bajo la influencia de fallas de rumbo N-NE, las cuales son consideradas como sincrónicas con la depositación de los estratos más antiguos del Mesozoico y posiblemente producto de reactivación de fallas más antiguas que afectaron las rocas paleozoicas. Este factor, junto con la existencia de un paleo-relieve relativamente abrupto al tiempo de la depositación de los estratos más bajos del Mesozoico, complica la estratigrafía del área.

Los estratos paleozoicos pertenecientes al grupo Farallones (DCf) constan en general de argilitas, calizas dolomíticas, cuarcitas y areniscas. Particularmente, en el área de este trabajo, Guerra (1972) menciona la presencia de areniscas cuarzosas, color gris amarillento, limoníticas, con intercalaciones de argilitas grises y verdosas.

El Mesozoico en esta parte de la cordillera consta esencialmente del grupo Caqueza, subdividido en tres formaciones (Ulloa, Rodríguez, 1976).

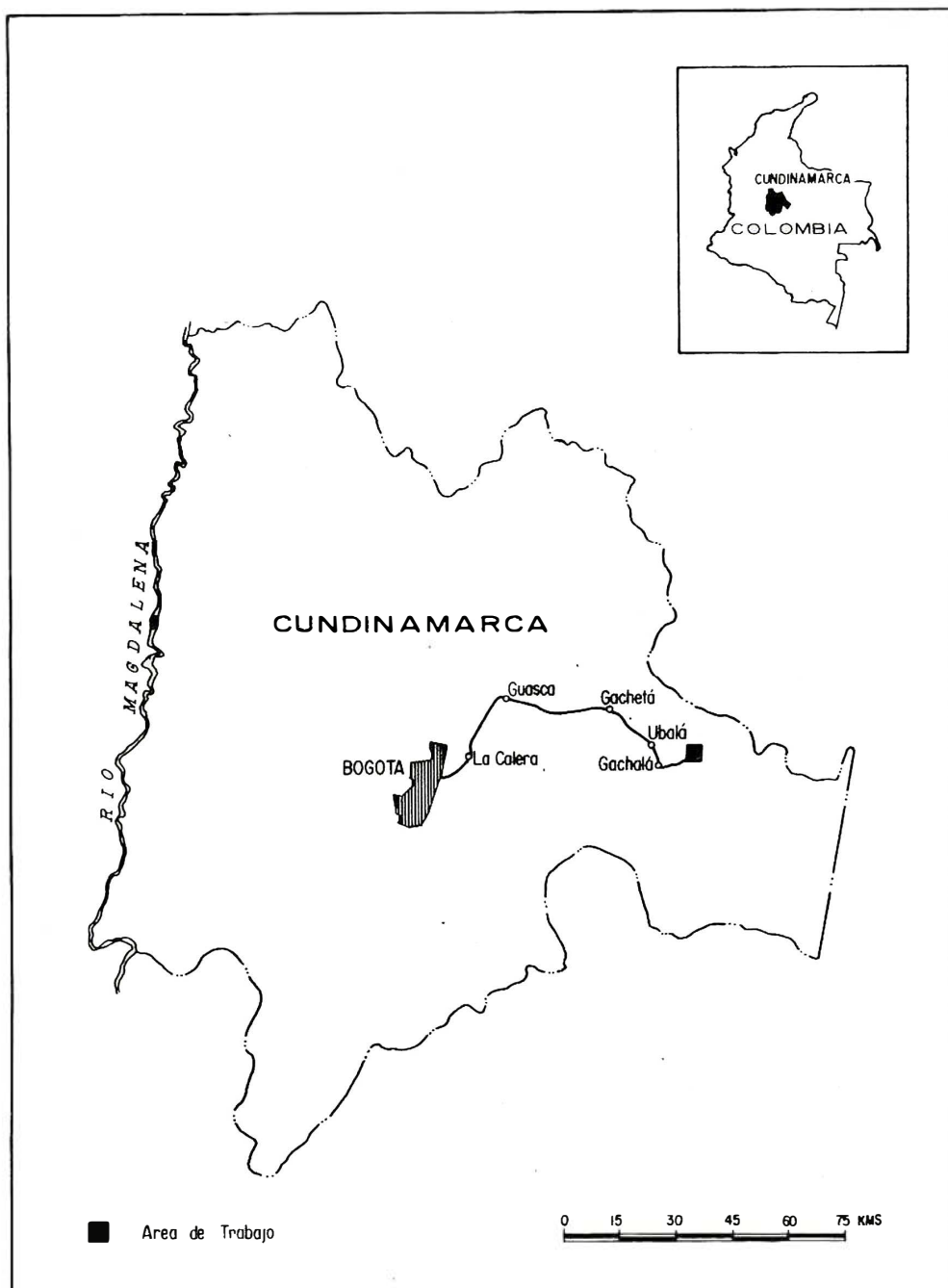
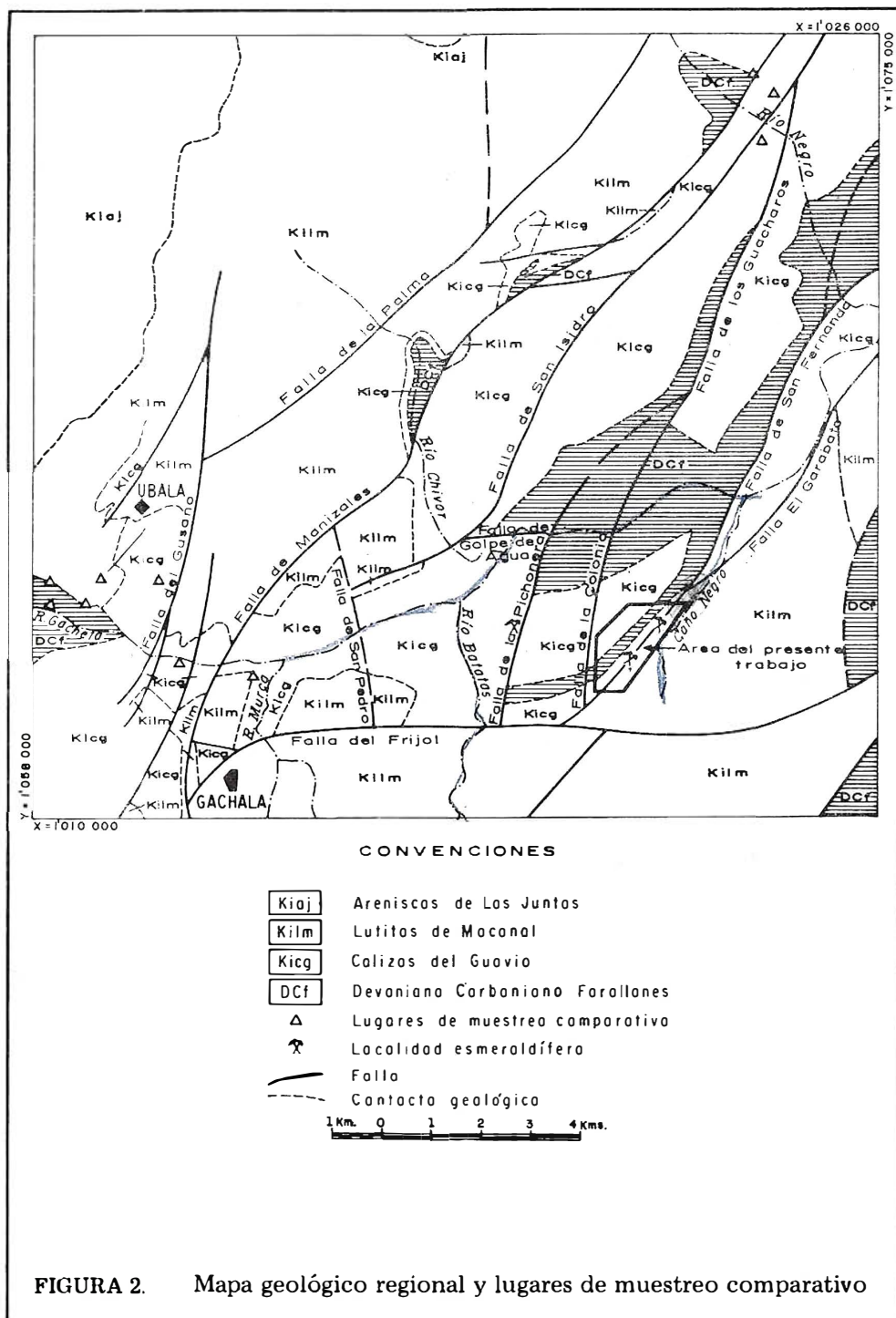


FIGURA 1. Mapa de localización del área de estudio.



—Calizas del Guavio (Kicg) subdividida en cinco miembros.

Kicg1- Consta esencialmente de conglomerados con algunas intercalaciones de areniscas, limolitas y arcillolitas.

Kicg2 - Consta esencialmente de lutitas (shales negros).

Kicg3 - Miembro de calizas inferiores subdividido en tres horizontes: el techo y la base, los cuales constan de calizas y un horizonte de lutitas (shales) en el centro

Kicg4 - Miembro de lutitas.

Kicg5 - Miembro de calizas superiores.

—Lutitas de Macanal (Kilm).

—Areniscas de Las Juntas (Kiaj).

En el área de trabajo (fig. 3) únicamente afloran los miembros mas inferiores de las Calizas del Guavio (Kicg1 y Kicg2) y parte de las Lutitas de Macanal (Kilm). Además afloran sedimentos cuaternarios compuestos de "mezclas de material coluvial con suelos de gran espesor" (Guerra, 1972).

1.2. TECTONICA

Como ya se mencionó, la tectónica de esta parte de la cordillera está dominada por fallas con rumbo N-NE principalmente. Las capas paleozoicas fueron sometidas a un tectonismo pre-Cretáceo (Herciniano), tal como se deduce del hecho de que la discordancia Paleozoico-Mesozoico muestra ángulos muy variables, de 0° a 90°. Ya se mencionó que probablemente estas fallas con rumbo N-NE surgieron como resultado de reactivación de fallas pre-mesozoicas, durante la depositación de la parte baja del Mesozoico y probablemente mas tarde. Además, ciertos pliegues y fallas pueden ser producto de la orogenia Andina de edad Terciaria.

2. GEOLOGIA DETALLADA

A continuación se describen los principales rasgos de la estratigrafía y la tectónica del área de las minas.

2.1. ESTRATIGRAFIA

Dentro del área del presente trabajo (figs. 2 y 3) afloran rocas paleozoicas y mesozoicas (Turoniano y Cretáceo Inferior) además de sedimentos cuaternarios no consolidados.

2.1.1. PALEOZOICO

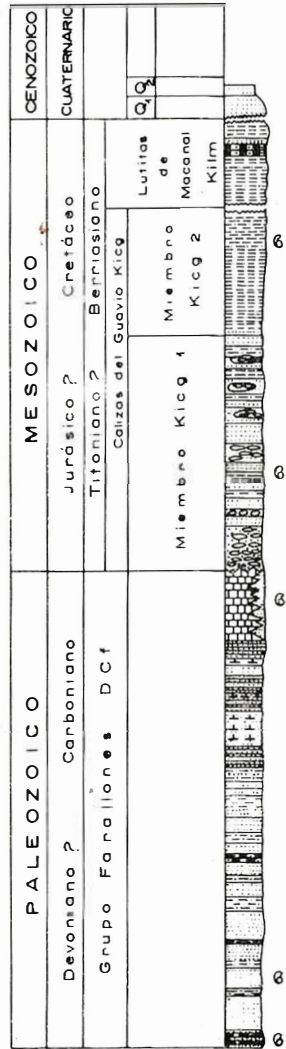
Rocas de esta edad afloran a lo largo de toda la pendiente occidental del área de las minas. Ellas muy probablemente pertenecen al Carboniano (basados en una fauna identificada por D. Gutiérrez, comunicación escrita) y menos probablemente al Devoniano y forman parte del Grupo Farrallones (DCf).

2.1.1.1. *Grupo Farrallones.*- De este a oeste, esta sección consta de un nivel de areniscas cuarzosas, color amarillo y gris, grano fino a medio, macizas, en estratos de 2 a 4 m intercalados con arcillolitas y limolitas, color marrón y amarillo, algunas muy fosilíferas. Este conjunto mide aproximadamente 10 m.

Suprayacen en la sección, probablemente invertida (ver corte en la figura 3) aproximadamente 30 m de areniscas macizas de grano muy fino, con buen sorteamiento y esfericidad, las cuales presentan meteorización bolar con un diámetro mayor de estas estructuras de hasta 5 m, paralelo a la estratificación. Intercaladas con las areniscas se encuentran estratos arcillosos, con óxidos de hierro, de 0,5 a 1 m de espesor.

Descansan encima unas areniscas laminadas de grano fino a medio, color gris y amarillento, con intercalaciones de arcillolitas y limolitas de color gris y amarillo verdoso, micáceas en los planos de laminación, con un espesor aproximado de 10 m. Posiblemente este conjunto es la base de la sección no invertida. Suprayacen aproximadamente 80 m de areniscas de grano fino color gris, rojizo y amarillento, alternando con limolitas arenosas color gris y amarillo, macizas en la base formando estratos de 2 a 3 m de espesor y laminadas al techo.

**COLUMNA ESTRATIGRAFICA
REGION DE GACHALA**



Aluviones recientes
Derrubios

Lutitos negros los cuales se meteorizan a grises, con pequeños intercalaciones de limolitos grises Hacia la parte alta contiene intercalaciones de limolitos y areniscos de grano fino a medio, color gris claro. Tiene en el área \pm 100 mts. de espesor

Lutitos negros (shales negras) con pequeños intercalaciones de limolitos y láminas delgadas de pinita siguiendo y cortando la estratificación El contacto inferior es transicional

Bancos y lentes de conglomerados de 2 o 3 mts. de espesor. La matriz está compuesto de areniscos de grano grueso, a veces conglomeráticos finos. Cemento silíceo Los cantos están compuestos por areniscos, cuarcitas, limolitos, arcillolitos y calizas y tienen un diámetro de hasta 15 cms, en formas redondeadas y ovales Niveles de areniscos, limolitos, arcillolitos y lutitos de color gris claro, amarillo y marrón intercalados con los conglomerados Estos niveles son mas frecuentes hacia el techo y forman la totalidad del miembro cuando los conglomerados están ausentes

Calizas y dolomitas color gris, grano muy fino (calculutitos) o veces muy fosilíferos, de aspecto macizo. Cambio de facies, lateralmente a arenisco
Calizas arenosas y areniscos grises de grano fino, alternando en lentes de aproximadamente 4 cms

Areniscos de grano fino
Contienen cemento calcáreo en varios sitios.

Areniscos de grano fino, colores gris rojizo y amarillento, alternando con limolitos arenosos color gris y amarillento, macizos en la base formando estratos de 2 o 3 mts. de espesor y laminados hacia el techo

Areniscos grises y amarillentos, grano fino o medio, laminados, con intercalaciones de arcillolitos y limolitos grises y amarillos.

0 10 20 30m
Escala

FIGURA 3a. Columna Estratigráfica de la Región de Gachalá.

Siguen encima aproximadamente 15 m de areniscas de grano fino, color gris, las cuales contienen a veces material calcáreo. Suprayacen más o menos 20 m de calizas arenosas y areniscas de grano fino, color gris, alternando en lentes de alrededor de 4 cm. Siguen finalmente al tope unas calizas o dolomitas con un espesor aproximado de 20 m, a veces fosilíferas, de grano muy fino (calculutita de Folk). Al igual que otros tipos de roca, esta caliza se encuentra en ciertos sitios parcialmente reemplazada por oligoclasa.

Debe anotarse que la parte calcárea de la sección pasa a menudo tanto horizontal como verticalmente, a facies arenosas. El espesor aproximado del Paleozoico es de 135 m teniendo en cuenta solamente la sección no invetida. No se conoce ni la base ni el techo de esta unidad.

2.1.2. MESOZOICO

Rocas de edad posiblemente Jurásico Superior (Titoniano) y Cretáceo Inferior, yacen discordantemente sobre las rocas paleozoicas ya descritas. Ellas pertenecen a las Calizas del Guavio (miembros Kicg1 y Kicg2 y Lutitas de Macanal (Kilm). Con base en fósiles (Diana Gutiérrez, comunicación escrita) y características litológicas, se puede establecer que estas rocas son producto de deposición de aguas marinas someras y probablemente en cuencas restringidas. Se exceptúan de esta apreciación los conglomerados basales que pueden ser continentales.

2.1.2.1. Calizas del Guavio.- A continuación se hace una breve descripción de cada uno de los miembros de este conjunto:

—Miembro Kicg1. Aflora descansando discordantemente sobre las rocas paleozoicas. La discordancia tiene cerca de 90° al lado este y es de ángulo muy suave al lado oeste (ver corte en fig. 3). Este miembro está constituido por bancos de conglomerados de 2 a 3 m de espesor con cantos de areniscas, cuarcitas, limolitas, arcillolitas y calizas. Los cantos tienen un diámetro hasta de 15 cm en formas redondeadas y ovoides. La matriz está compuesta generalmente por areniscas de grano grueso, a veces conglomeráticas

finas. El cemento es generalmente silíceo. Intercalados con los conjuntos de conglomerados se encuentran niveles de areniscas, lutitas, arcillolitas y limolitas de color gris claro, amarillo y marrón, siendo más frecuentes estas intercalaciones en la parte alta del miembro, constituyéndolo totalmente cuando los conglomerados están ausentes. Estas intercalaciones presentan lentes fosilíferos. El espesor de este miembro es de 50-80 m dentro del área.

En la mina El Diamante, topográficamente abajo del contacto Mesozoico-Paleozoico, se encuentran gigantesco bloques redondeados de un material que se clasificó como "conglomerado brechoide", el cual debe ser un equivalente a los conglomerados basales ya descritos. Este conglomerado brechoide consiste de estratos hasta de 5 m de espesor, con cantos desde redondeados hasta semiangulares, con un máximo de 30 cm de diámetro mayor, compuesto esencialmente de calcita, dolomita y oligoclasa euhedrales y cuarzo y calcita anhédrales en un tamaño de grano desde muy grueso (mayor de 2 cm) a muy fino. La matriz y cemento de estos estratos están compuestos por reemplazamiento del material original y relleno de cavidades por calcita en su mayoría y también oligoclasa, dolomita y algo de cuarzo. La dolomita algunas veces ocurre como crecimientos en calcita. También contienen trazas de pirita, fluorita y rutilo euhedral. Este material se encuentra también en las minas Las Vegas de San Juan.

Comparando este conglomerado brechoide con los conglomerados basales del Mesozoico, contiene cantos con mayor tamaño y angularidad. Esto pudiera explicarse si se asocia el primero con un conglomerado intraformacional, con muy poco transporte del material. El alto grado de alteración y reemplazamiento puede explicarse por una mayor porosidad la cual permite más fácilmente el paso de fluidos mineralizadores. Existe también la posibilidad de que estos rodados sean parte de una brecha de colapso originada en los estratos calcáreos del Paleozoico y asociada a la discordancia post-paleozoica.

Es posible que estos conglomerados o brechas calcáreas contengan berilo, ya que

los bloques rodados fueron intensamente trabajados por los mineros de la región y además presentan características geoquímicas favorables.

—Miembro Kicg2. Se encuentra este miembro descansando concordantemente sobre el miembro Kicg1. El contacto inferior es transicional, pasando de areniscas, limolitas y arcillolitas a las lutitas negras características de este nivel. Las lutitas presentan intercalaciones delgadas de limolita, láminas de piritita siguiendo la estratificación y en algunas localidades, junto a la falla especialmente, se notan formas fósiles solo visibles al microscopio con luz reflejada dentro de una masa homogénea de oligoclasa, junto con los minerales arcillosos y material orgánico típico de las lutitas, las cuales están atravesadas por pequeñas venas de oligoclasa. Este miembro tiene un espesor de 30-40 m dentro del área, no siendo conocido su verdadero espesor ya que la parte superior está truncada por la Falla de San Fernando en la parte este del área. En la parte oeste se reconoció este miembro pero no se cartografió.

El espesor de los miembros Kicg1 y Kicg2 varía desde 0 hasta 500 m fuera del área (Guerra, 1972) y es de 80 a 120 m dentro del área del presente informe. Este cambio de espesor se puede explicar por la presencia de un paleo-relieve al tiempo de la deposición del Mesozoico más inferior, agregado a movimientos a lo largo de fallas durante este mismo período.

2.1.2.2. *Lutitas de Macanal*.— Este conjunto no se diferenció en el área, pero muy posiblemente equivale al nivel Kicg2b de Guerra (1972). Consiste esencialmente en lutitas negras, que muy comúnmente por efectos de meteorización pasan a grises. Hacia el este contiene intercalaciones de limolitas grises y areniscas arcillosas de grano fino a medio, de color gris claro. El contacto inferior, que en el área de las minas está fallado contra el miembro Kicg2 y por lo tanto se encuentra muy alterado y replegado, fuera del área es concordante con el Kicg5 y a veces discordante sobre el Paleozoico. El contacto superior, no se cartografió dentro del área. El espesor estimado (Ulloa-Rodríguez, 1976) es de 400 m. En el área se cartografió un espesor aproximado de 100 m.

2.1.3. CENOZOICO

Se encuentran materiales Cuaternarios muy recientes, constituyendo derrubios y aluviones que en ocasiones suprayacen los derrubios. Estos cubren parte del escarpe rellenando el pie del escarpe con material erodado de las rocas que lo forman. Los aluviones están formados por sedimentos de la Quebrada Guzmán y los nacimientos de Caño Negro.

Parte de las minas está cubierta por un gran espesor de material de carga, producto de la minería, el cual es removido constantemente y cambiado de lugar. Esto es especialmente notable al este de la Falla de San Fernando.

2.2. GEOLOGIA ESTRUCTURAL

Las rocas aflorantes en esta área han sufrido el efecto de dos o más eventos orogénicos probablemente. Uno, el más antiguo, posiblemente acaecido a finales del Paleozoico (Herciniano) y otro más reciente, probablemente de edad Cretáceo Inferior. Este último evento puede haber reactivado fallas antiguas y producido otras nuevas, las cuales a su vez pudieron haber sido reactivadas por orogénesis más recientes (Andina). Esta última además puede tener expresiones propias en plieques y fallas.

Los rasgos tectónicos más importantes en el área son:

—Falla San Fernando. Es una falla de rumbo, de tipo inverso, alto grado de inclinación al W y rumbo N-NE. Esta falla tiene gran importancia en la mineralización de esmeraldas como localizador de estos depósitos y también, posiblemente, como conducto para las soluciones mineralizantes. Es así como sobre, o muy cerca de ella están localizadas las minas objeto del presente informe, así como las de Santa Rosa, Buenavista y Chivor. En el área de trabajo, esta falla pone en contacto las unidades Kicg2 y Kilm. La brecha de falla y también las paredes de ella están altamente alteradas metasomáticamente, produciéndose gran cantidad de relleno de espacios porosos y reemplazamiento del material original, por carbonatos y oligocla-

sas además de piritita y trazas de rutilo y fluo- rita. La brecha de falla tiene en ocasiones espesores hasta de 60 m.

—Plegamientos asociados. Se obser- van en el área plegamientos asociados a los períodos orogénicos ya descritos. El Paleo- zoico presenta un pliegue anticlinal de rum- bo N-NE inmediatamente al norte del área, el anticlinal de El Diamante, el cual muy se- guramente puede continuarse dentro del área en el anticlinal isoclinal cuyo flanco E está invertido, deducido de la posición de la dis- cordancia (fig. 3).

Las rocas Cretáceas forman un anti- clinal hacia el W de la Falla San Fernando, cuya cúpula fue erodada y permite el aflora- miento de rocas paleozoicas y cuyo eje con- cuerda aproximadamente con el del anticli- nal de El Diamante. El flanco E tiene un bu- zamiento aproximado de 60° E y el flanco W unos 12° W. Este pliegue puede ser, al me- nos en parte, un pliegue de arrastre produci- do por la Falla San Fernando. Las rocas per- tenecientes al conjunto de Lutitas de Maca- nal, dentro del área forman el flanco W de un sinclinal llamado de Montecristo. Contra la Falla San Fernando este conjunto está muy plegado como producto del arrastre ocasionado por la Falla.

Por medio de métodos geofísicos se han detectado estructuras transversales a la falla principal. Durante la cartografía no fue posible verificarlas y solo se infiere la exis- tencia de una de ellas en rocas paleozoicas al SW del área, por un abrupto cambio en la actitud de estos estratos. Es posible que sean entonces estructuras cubiertas por rocas me- sozoicas, que no se manifiestan en estas úl- timas.

3. GEOLOGICA ECONOMICA

En esta parte del informe se tratará de exponer las características que presenta la mineralización de esmeraldas y los proble- mas que aún permanecen sin resolver.

3.1. CARACTERISTICAS DE LA MINERA- LIZACION

Las características más definidas de las mineralizaciones son la alteración metaso-

mática, el control tectónico y la temperatura de formación.

3.1.1. ALTERACION METASOMATICA

La característica más extendida y común a todos los sitios de este distrito don- de ocurre mineralización de berilo es el alto grado de alteración metasomática, especial- mente feldespática y carbonácea que sufrie- ron las rocas encajantes. Esta alteración es de tipo hidrotermal (soluciones calientes) epigé- nico. Se han visto rocas al microscopio alte- radas en su totalidad, siendo el material original reemplazado por oligoclasa en inter- crecimiento. Oligoclasa es el principal mine- ral acompañante de la mineralización. Este mineral sufre alteración posterior debido posiblemente a meteorización, formando bolsas de kaolinita.

La alteración tiene al parecer como centro la Falla de San Fernando, pero se extiende a los lados de ésta de manera decre- ciente, aun por unos pocos cientos de metros. Esto se puede verificar, ya que se encontraron fósiles totalmente reemplazados por oligocla- sa (autigénica por lo tanto) y venas rellenas del mismo mineral hasta 200 ó 300 m de dis- tancia de la falla. Cabe anotar que todos los fósiles encontrados en el área están reempla- zados por oligoclasa, con excepción del aflora- miento fosilífero en el miembro Kicg1 al oeste del área, el cual está ubicado a una dis- tancia de más de 300 m de la falla San Fer- nando.

El segundo mineral abundante como producto de alteración es dolomita. Este mi- neral reemplaza en ocasiones la matriz de la roca, oligoclasa en intercrecimiento, en tanto que otras veces los espacios dejados por la dolomita son ocupados por oligoclasa y tam- bién parece que existen pseudomorfo de oli- goclasa reemplazando dolomita. En la mine- ralización de la mina Las Cruces, el relleno de la parte central de las cavidades en la bre- cha de la falla está formado por dolomita, contemporánea con el berilo. Hacia el exte- rior de las cavidades existe una película de oligoclasa euédral en crecimiento perpen- dicular a la superficie de los fragmentos de brecha, a los cuales está adherida esta pelícu- la. Se establecería de esta manera y con la evidencia de una venilla encontrada en la mina Las Vegas de San Juan la siguiente pa- ragénesis tentativa: (1) Oligoclasa, (2) Dolo- mita (con algo de berilo, oligoclasa y piritita),

(3) Pirita, (4) Oligoclasa. Se encuentran también calcita y trazas de rutilo y fluorita, los cuales no han sido situados en la secuencia paragenética.

Esta misma alteración está ampliamente extendida en los rodados del conglomerado brechoide, en la mina El Diamante. Este fenómeno se explica, como ya se mencionó, por la porosidad que presentaba esta unidad al tiempo del emplazamiento de fluidos. Esta característica de la porosidad, parece ser importante en control de lugares de mineralización. Es así como en la brecha tectónica, que encierra la mineralización de la mina Las Cruces, se ven al microscopio cristales de berilo y dolomita, llenando espacios entre fragmentos de brecha.

El patrón de alteración no es constante a lo largo de la brecha de falla, pues existen ciertas partes de ésta que no presentan alteración feldespática o carbonática y al parecer dichas áreas carecen de mineralización de berilo. Esto da idea del gran control que sobre la mineralización tiene el tipo de alteración.

3.1.2. CONTROL TECTONICO

Todas las características del emplazamiento de la mineralización dan a entender un control tectónico de ella. En esta área los sitios que son objeto de minería y se han probado productivos, se hallan ya sea en la zona de falla, en brechas o en fracturas y venas, a una distancia no mayor de 200 m de las fallas y muy probablemente conectadas directamente a ellas (fig. 3). Esta característica cobija a las minas del presente informe, así como aparentemente a todas las de este distrito tales como Las Vegas de San Juan, Buenavista, Chivor, etc. En esta última sin embargo, el fracturamiento parece ser mayor, pues la mina es bastante extensa.

Existe la posibilidad de que un patrón de fallamiento con dirección aproximado E-W sea, junto con otros factores, el localizador de berilo en la falla principal. Por estudios geofísicos fue posible establecer dicho patrón, el cual puede tal vez inferirse en rocas paleozoicas no así en rocas más jóvenes. Es posible también que este patrón exista en rocas mesozoicas, pero para verificarlo es necesario un levantamiento geológico más detallado.

3.1.3. TEMPERATURA

Por estudios de inclusiones fluidas se sabe que la temperatura de formación del berilo, en este tipo de yacimientos, está en el rango de 290 hasta más de 355° C (Roedder, comunicación escrita, 1975).

3.2. PROBLEMAS RELACIONADOS CON LA MINERALIZACION.

Muchos problemas relacionados con este tipo de mineralización permanecen aún sin resolver. Algunos de ellos son: (1) origen y composición de las soluciones transportadoras de los iones necesarios para producir una mineralización de este tipo. (2) Los mecanismos de transporte y precipitación a partir de dichas soluciones y la localización de los cuerpos mineralizantes. (3) Edad de la mineralización.

3.2.1. ORIGEN Y COMPOSICION DE LAS SOLUCIONES

Existen varias posibilidades para el origen de estos fluidos. La más llamativa es la de que tengan su origen en aguas meteóricas y/o en aguas connatas de los sedimentos encajantes, las cuales en su camino a través de los sedimentos van asimilando, por lixiviación, iones o complejos iónicos solubles bajo las condiciones de los fluidos, siendo precipitados estos complejos iónicos cuando dichas condiciones, por ejemplo temperatura, presión, concentración, Eh, pH, sufren un cambio.

Mc. Laughlin (1971) menciona la posibilidad de que los depósitos de yeso de Gachalá, unos 10 km al SW de las minas de esmeraldas, sean producto de la concentración residual de una secuencia evaporítica después de la disolución de la halita. Estos depósitos presentan una apariencia brechoide, probablemente producto de brechas de colapso, lo que confirmaría esta interpretación. De esta manera se podría explicar el alto contenido en sodio necesario para la intensa alteración feldespática en los depósitos. Además, se explicaría la presencia de cloro, el cual es un ión reconocido por su facilidad de formar complejos iónicos fácilmente solubles, que permiten la lixiviación y transporte de los elementos que forman depósitos minerales de muy variables características. El magnesio podría también tener su origen en dichas secuencias evaporíticas lixiviadas (dolomitas).

El carácter altamente salino de las soluciones que precipitaron las esmeraldas, es evidente por la alta salinidad que presentan las inclusiones fluidas en cristales de berilo y por el hecho de hallarse muy comunmente cristales de halita en dichas inclusiones fluidas (Roedder, 1972). Otro hecho que podría tener significado en la relación secuencias evaporíticas-esmeraldas, es el haberse encontrado esmeraldas en la minas de Zipaquirá y en el rute asociado a la sal de Nemocón (Mc. Laughlin, 1971).

El berilo podría ser incluido en las soluciones a partir de las lutitas negras (shales) ampliamente distribuidas en esta área, ya que la cantidad necesaria para formar estos depósitos, solamente requiere la lixiviación de una muy pequeña cantidad de este elemento, en un área muy reducida. El origen del cromo se podría explicar de una manera similar.

Otros componentes de estas soluciones serían fluor, azufre, calcio y sílice. Además de la posibilidad del origen de estas soluciones en aguas connatas, existe la de su origen en soluciones hidrotermales magmáticas de cierta profundidad. Un cuerpo diorítico con textura diabásica cuyos principales componentes son hornblenda, biotita, esfena y como feldespatos andesina, fue recientemente hallado en las cercanías de la minas de Muzo (7 km al W) adyacente a una mina antigua de esmeraldas. Además, menos de 100 km al NE de Gachalá, en las cercanías de Pajarito, fue encontrado otro cuerpo de simialres características. Estos cuerpos intruyen rocas cretáceas. No se puede entonces descartar que al menos en parte, soluciones de este origen tengan alguna relación con la mineralización. Esos cuerpos ígneos podrían también causar un desequilibrio térmico que inicie una removilización de fluidos.

En resumen, existen aun problemas para determinar el origen y carácter de las soluciones mineralizadoras. Pueden ser originadas por aguas connatas relacionadas o no con secuencias evaporíticas, o soluciones hidrotermales magmáticas, o una combinación de éstas y posiblemente otras diferentes, cuya mezcla puede producir las condiciones ideales para la precipitación de berilo.

3.2.2. MECANISMOS DE TRANSPORTE, PRECIPITACION A PARTIR DE LAS SOLUCIONES, Y LOCALIZACION DE LOS CUERPOS MINERALIZADOS

El medio lógico de transporte de las soluciones es a través de zonas permeables. Esta permeabilidad puede: (1) ser congénita de las rocas que son atravesadas por los fluidos y (2) ser superimpuesta por fracturamiento o diaclasamiento o por disolución del cemento por los mismos o diferentes fluidos mineralizantes. Cualquiera de estos conductos puede haber sido utilizado por las soluciones y es muy posible que todos ellos lo fueron aunque uno u otro pudo ser predominante.

La localización de las mineralizaciones es un problema bastante complicado. Las características aparentes de los sitios donde se encuentran mineralizaciones de berilo en esta área, no están circunscritas a los lugares de minas. Deben existir mecanismos especiales que producen precipitación de berilo en ciertas áreas y la impiden en otras similares. Condiciones complejas de carácter físico-químico pueden haber actuado como localizadores. Estas condiciones físico-químicas (temperatura, presión, concentración de iones, etc.) están a su vez controladas por diferentes factores: la profundidad durante el emplazamiento de los minerales puede producir la temperatura requerida y controlar la presión hidrostática, pero otra fuente de calor, tal como una intrusión relativamente cercana, puede producir efectos similares. Cambios en la composición de una solución única, mezcla de diferentes soluciones o mutuo desplazamiento de ellas, pueden también actuar como localizadores. El patrón tectónico puede jugar un gran papel como conductor de soluciones y por tanto como localizador de los depósitos.

Es posible que los diferentes patrones de fractura convergentes, que pueden servir de conductos para diferentes tipos de fluidos, sean al menos en parte controles de precipitación de minerales. Beus (comunicación personal) manifiesta que los iones complejos de berilo son fácilmente solubles en fluidos alcalinos de tipo sódico. Una vez que estos fluidos pierden este carácter sódico, por

precipitación de oligoclasa en nuestro caso, los iones complejos de berilo se hacen inestables y se causa su precipitación para formar compuestos, berilo en nuestro caso. Este fenómeno a la vez de localizador, explica la alteración feldespática coexistente con la formación de berilo.

Resumiendo, complejas condiciones físico-químicas deben ser las responsables de la localización de los depósitos de esmeraldas. A su vez, estas condiciones están controladas por diferentes factores, los cuales, para ser totalmente conocidos requieren un estudio más detallado.

3.2.3. EDAD DE LAS MINERALIZACIONES

Se sabe con seguridad que la mineralización tiene una edad post-cretácea inferior, ya que han sido hallados fósiles de esta edad en las rocas inmediatamente encajantes. Si supiéramos que la columna de rocas es la causante de la temperatura requerida (aproximadamente 300°C) necesitaríamos alrededor de 12.000 m de sedimentos y por tanto la mineralización sería de edad Cretácea tardía o Terciaria. Existen dudas si en esta parte de la cordillera se depositó alguna vez tal espesor de sedimentos. Si la fuente de calor es un agente tal como un centro magmático cercano, o calor producido por tectonismo, la edad de los depósitos sería muy próxima a la de estos episodios. Existe la posibilidad de que la temperatura necesaria sea producida por interacción de más de uno de los factores descritos, por ejemplo, gradiente geotermal mas actividad tectónica.

Para poder establecer una secuencia lógica que ayude a determinar la edad de los depósitos, es necesario conocer el origen y la naturaleza de las soluciones que precipitaron estos minerales y el carácter de los fenómenos que causaron dicha precipitación.

4. GEOQUIMICA

Con el objeto de conocer las características geoquímicas de la región de las minas, se colectaron y analizaron 299 muestras de rocas, 590 de suelo y 14 de sedimentos activos. Estas muestras se analizaron por absorción atómica para los siguientes elementos: Na, Li, K, Sr, Ba, Cu, Pb, Zn, Ni, Mo y Be. Fue analizada la fracción menor de malla 80.

Para el muestreo se siguió un sistema de enrejado, cubriendo en la primera fase una distancia aproximada de 300 m a cada lado de la zona de falla en los sitios que mostraban posibilidad de mineralización y en la segunda fase un kilómetro a cada lado (figs. 4 y 5). Siguiendo la dirección de la falla se hicieron líneas de muestreo perpendiculares a ella cada 100 m para la primera fase y luego se intercalaron otras líneas entre las primeras en el área de la mina Las Cruces, para cubrir la segunda fase.

Además, se colectaron 60 muestras de roca y 18 de suelo en sitios con características geológicas muy similares a las de las áreas de la mina, pero que no muestran ningún indicio de mineralización de esmeraldas (fig. 2). Esto se hizo con el objeto de tener una base de comparación para establecer diferencias dentro y fuera del área de mineralización.

4.1. DISTRIBUCION DE LOS ELEMENTOS EN ROCAS

Con el objeto de llevar a cabo análisis estadísticos de las muestras de roca, se obtuvieron por medio del procedimiento antes mencionado tres poblaciones:

—Muestras tomadas en sitios que presentan mineralización de berilo. Esta población se denominará en adelante *sitios mineralizados* o población *a*;

—Muestras tomadas durante el desarrollo del muestreo en el área de las minas, incluyendo la población *a*, pero que abarcan cerca de 1 km a cada lado de la Falla San Fernando. Esta población en adelante se llamará *área de minas*;

—Muestras tomadas fuera del área de minas, en los sitios que indica la figura 2. Esta población se denominará *fuera del distrito minero*. Además, todas las muestras de roca fueron clasificadas en grupos, dependiendo de sus características litológicas: (1) Lutitas negras (shales negros). (2) Lutitas, excluyendo las negras, y arcillolitas. (3) Limolitas, areniscas y unos pocos conglomerados. (4) Carbonatos, incluyendo calizas y dolomitas. (5) Rocas que presentan alteración especialmente metasomática o alteración relacionada con la actividad tectónica, visible macroscópicamente. Como es obvio, la gran mayoría de las muestras pertenecientes a la

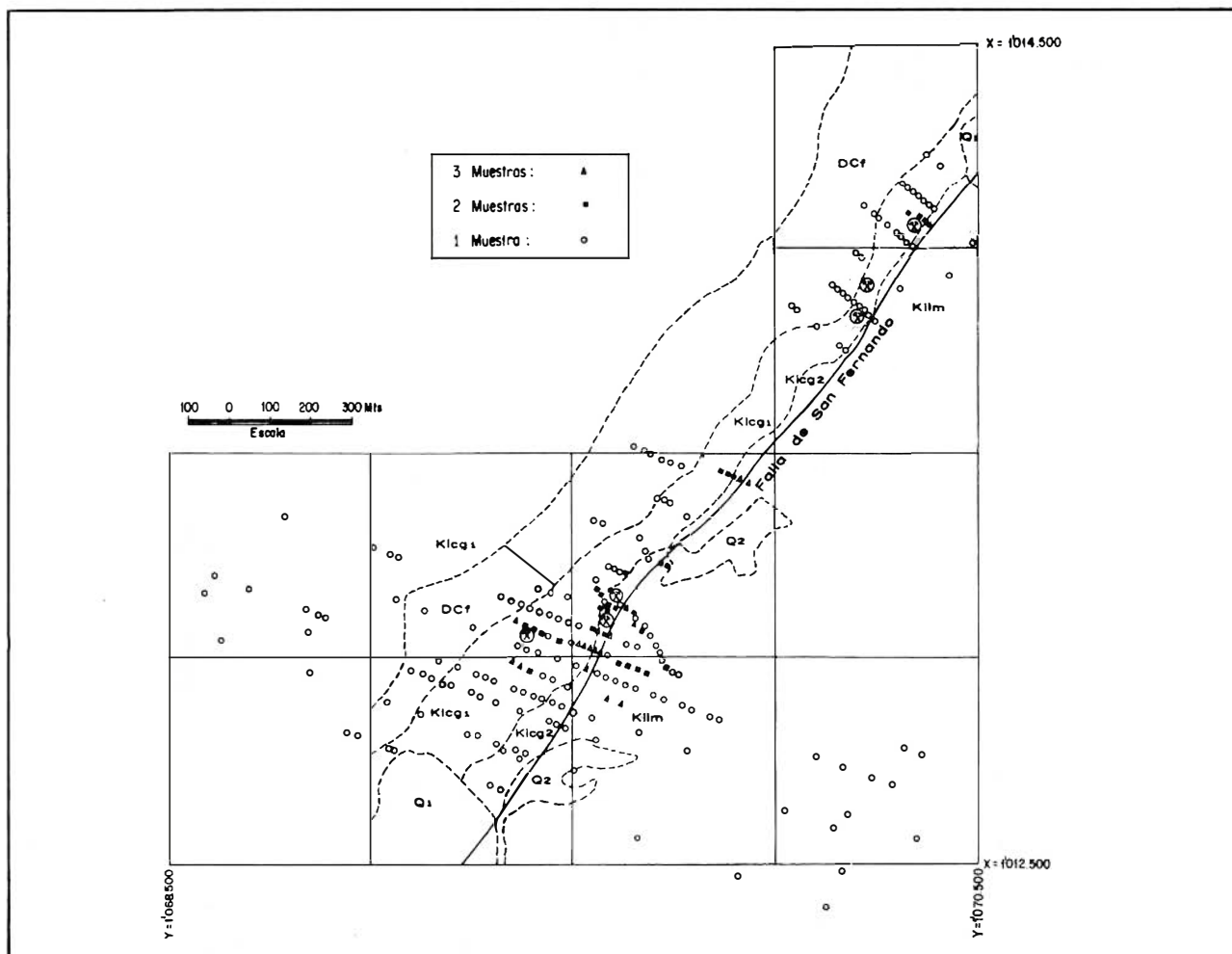


FIGURA 4. Mapa de localización de muestras de rocas.

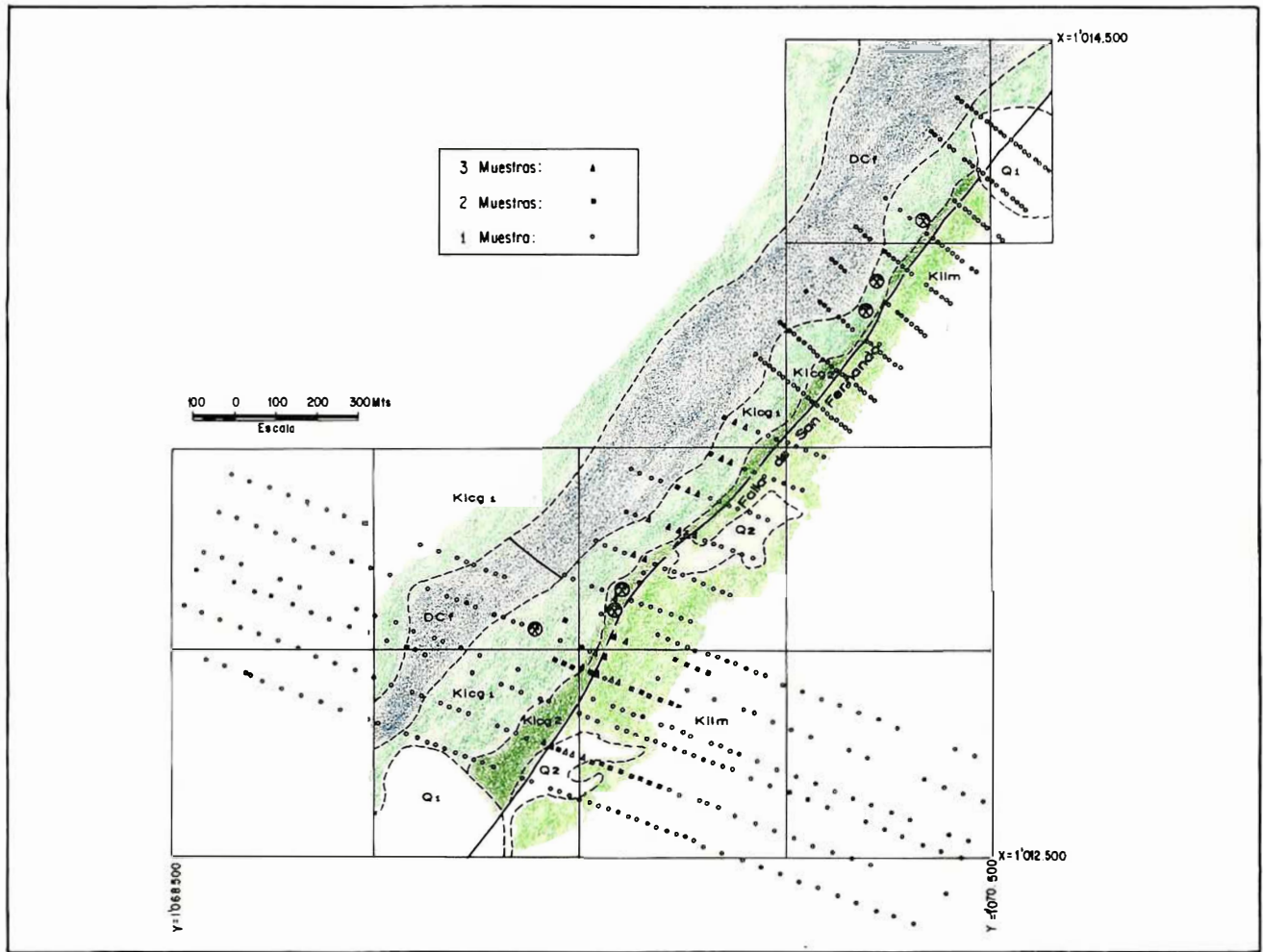


FIGURA 5. Mapa de localización de muestras de suelos.

población *a* (sitios mineralizados) están clasificadas dentro del grupo 5 o muestras de alteración. El cuadro 1 presenta la distribución de muestras de roca por poblaciones y por grupos.

Poblaciones	GRUPOS					Total
	1	2	3	4	5	
<i>Sitios Mineralizados</i>	7	—	—	—	29	36
<i>Area de Minas</i>	65	128	55	8	43	299
<i>Fuera del Distrito</i>						
<i>Minero</i>	16	29	11	—	4	60

Cuadro 1: Distribución de muestras de rocas por poblaciones y grupos.

* Jose
 Para llevar a cabo análisis estadísticos se construyeron histogramas con clases logarítmicas para cada población y para cada grupo. Con ayuda de estos histogramas se establecieron, para cada elemento, los valores límites para determinar "background", "threshold" y valores anómalos. Vale la pena aclarar que background y threshold no son considerados como valores sencillos sino como rangos de variaciones. Los límites se escogieron en base a comparaciones entre las diferentes poblaciones. Se tomó como background la variación que presentan los elementos en la población *fuera del distrito* y como valores anómalos los presentes en la población *sitios mineralizados* siempre y cuando, obviamente, no sean comunes en la población *fuera del distrito*. El rango del threshold se escogió en base a los valores que no son característicos en ninguna de las poblaciones, siendo más asociados a la población *sitios mineralizados*. Los valores background threshold y anómalos están obviamente mezclados en la población *área de minas*.

No se trabajó en base a curvas acumulativas log-normales, pues éstas no muestran, ni en parte ni totalmente, segmentos rectos, los cuales indican una población normal. Esto es especialmente notable en las poblaciones *sitios mineralizados* y *área de minas*. Este fenómeno se puede explicar fácilmente si se considera: (1) Que algunos elementos no son trazas, tales como sodio, potasio, bario y estroncio. La ley de log-normalidad trabaja especialmente bien para elementos traza. (2) Que las poblaciones *sitios mineralizados* y especialmente *área de minas*

son obviamente muy heterogéneas en sus componentes, pues han tenido diversos orígenes y han sufrido procesos diferentes. Es bien sabido que las distribuciones de los elementos en áreas mineralizadas no siguen muy precisamente una distribución normal. (3) Que las muestras consideradas son de roca, para las cuales los procesos de homogeneización, tales como meteorización y erosión, no se han llevado a cabo. Estos procesos tienen gran importancia en la distribución log-normal de los elementos.

Con el objeto de dar una idea de las variaciones en la distribución de los diferentes elementos en los grupos y poblaciones considerados nos referimos enseguida a cada elemento por separado. De esta manera se pueden apreciar las bases para escoger elementos indicadores de la mineralización de berilo y también cómo el tipo de alteración metasomática está muy bien reflejado en los cambios de composición de las rocas.

Para dar una idea de la composición elemental, se mencionará para cada elemento el valor medio y el coeficiente de variación. Este último es una medida de dispersión de valores alrededor del valor medio, dada en porcentajes y es igual a:

$$CV = \frac{s}{m} \times 100$$

donde *s* es la desviación standard y *m* es el valor medio. Estos valores se dan para cada grupo y población. La figura 6 expresa en forma gráfica los valores medios para cada elemento en cada una de las poblaciones y grupos.

Un elemento será un buen indicador local si muestra un contraste al comparar los valores de los *sitios mineralizados* con los otros valores dentro del *área de minas*. Para ser buen indicador regional deberá mostrar un buen contraste al comparar los valores en el *área de minas* con los valores *fuera del distrito minero*.

4.1.1. SODIO

Este elemento es el mejor indicador de mineralización tanto local como regional, tal como puede deducirse del cuadro 2 y de la figura 6. Los *sitios mineralizados* poseen el valor medio máximo. El segundo valor corresponde al grupo de alteración dentro del *área de minas*. La diferencia es explicable ya que, aunque la mayor parte de la alteración dentro

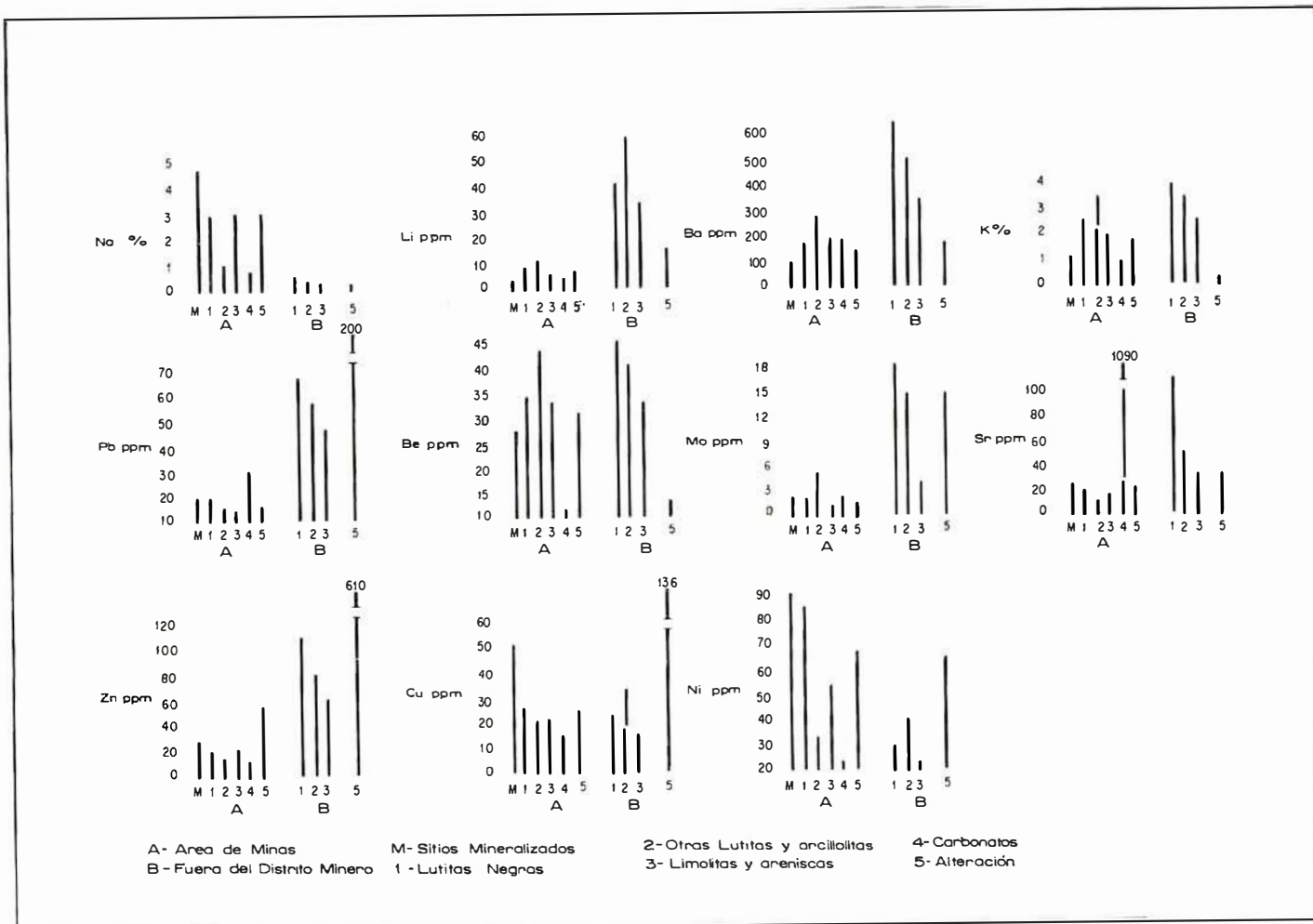


FIGURA 6. Distribución de elementos en rocas (valor medio).

Na (%)		SM	GRUPOS				
			1	2	3	4	5
AM	m ₁	4.85	2.91	106	2.81	0.69	3.07
	CV ₁	39%	61%	126%	83%	105%	71%
FM	m ₂		0.63	0.49	0.29		0.11
	CV ₂		39%	33%	41%		10%
m ₁ /m ₂			4.61	2.16	9.68		27.91

Be (ppm)		SM	GRUPOS				
			1	2	3	4	5
AM	m ₁	2.76	3.44	4.34	3.34	1.22	3.11
	CV ₁	45%	45%	26%	54%	113%	51%
FM	m ₂		4.53	4.08	3.25		1.40
	CV ₂		15%	40%	31%		13%
m ₂ /m ₁			1.32	0.94	0.97		0.48

Li (ppm)		SM	GRUPOS				
			1	2	3	4	5
AM	m ₁	3.88	8.16	10.31	5.18	4.81	6.67
	CV ₁	71%	73%	83%	74%	70%	89%
FM	m ₂		39.27	59.48	33.11		15.10
	CV ₂		103%	152%	85%		66%
m ₂ /m ₁			4.81	5.77	6.39		2.26

Mo (ppm)		SM	GRUPOS				
			1	2	3	4	5
AM	m ₁	2.39	2.25	5.60	1.86	2.98	2.15
	CV ₁	60%	91%	315%	135%	64%	62%
FM	m ₂		18.50	14.54	4.03		14.57
	CV ₂		169%	141%	118%		49%
m ₂ /m ₁			8.22	2.60	2.17		6.78

Ba (ppm)		SM	GRUPOS				
			1	2	3	4	5
AM	m ₁	110	186	296	207	187	151
	CV ₁	51%	59%	50%	59%	49%	60%
FM	m ₂		646	500	354		175
	CV ₂		40%	41%	59%		91%
m ₂ /m ₁			3.47	1.69	1.71		1.16

Sr (ppm)		SM	GRUPOS				
			1	2	3	4	5
AM	m ₁	25	21	16	20	10.90	25
	CV ₁	53%	66%	71%	57%	137%	56%
FM	m ₂		110	53	31		34
	CV ₂		72%	68%	47%		106%
m ₂ /m ₁			5.24	3.31	1.55		1.36

K (% ₀)		SM	GRUPOS				
			1	2	3	4	5
AM	m ₁	1.17	2.63	3.53	1.92	0.97	1.89
	CV ₁	76%	45%	35%	81%	113%	73%
FM	m ₂		3.87	3.51	2.58		0.28
	CV ₂		23%	25%	65%		62%
m ₂ /m ₁			1.47	0.99	1.34		0.15

Zn (ppm)		SM	GRUPOS				
			1	2	3	4	5
AM	m ₁	33	21	17	24	12	58
	CV ₁	144%	130%	120%	164%	37%	287%
FM	m ₂		111	81	60		610
	CV ₂		154%	236%	108%		84%
m ₂ /m ₁			5.28	4.76	2.50		10.52

Pb (ppm)		SM	GRUPOS				
			1	2	3	4	5
AM	m ₁	21.57	20.02	15.14	10.39	30.17	17.92
	CV ₁	104%	94%	106%	81%	68%	88%
FM	m ₂		67.05	57.82	47.32		199.54
	CV ₂		82%	126%	155%		49%
m ₂ /m ₁			3.35	3.82	4.55		11.13

Cu (ppm)		SM	GRUPOS				
			1	2	3	4	5
AM	m ₁	51.56	26.07	22.21	22.55	15.33	26.37
	CV ₁	216%	94%	136%	198%	57%	88%
FM	m ₂		24.36	39.90	16.46		135.97
	CV ₂		91%	151%	42%		66%
m ₂ /m ₁			0.93	1.48	0.72		5.16

AM= Area de Minas. FM= Fuera del Distrito Minero. SM= Sitios Mineralizados. m = Valor Medio (mean). CV = Coeficiente de Variación.
 m₁/m₂ = Factor de Enriquecimiento. m₂/m₁ = Factor de Lixiviación.;

1 = Lutitas negras. 2 = Otras lutitas y arcillolitas. 3 = Limolitas - areniscas. 4 = Carbonatos. 5 = Alteración.;

CUADRO N.º 2. DISTRIBUCION DE LOS ELEMENTOS EN ROCAS

del *área de minas* es feldespática (oligoclasa), en algunos sitios no lo es. Los lugares que presentan una alteración no feldespática no son, hasta donde sabemos, productores de berilo. Esto es una prueba más del control de la alteración sobre la precipitación de berilo.

Los valores para los grupos 1 y 3 son siempre más altos dentro del *área de minas*, lo que implica, como se comprobó petrográficamente, que la alteración metamórfica no está restringida a lugares de alteración tectónica (brechas y fisuras), sino que se extiende dentro de las rocas que forman las paredes de falla. Este hecho es de gran importancia en exploración detallada.

Es interesante anotar también que las lutitas grises, comprendidas en el grupo 2, tienen un contenido inferior en sodio a las negras. Esto se debe a que las lutitas grises son en su mayoría producto de meteorización de las negras, perdiendo en este proceso buena parte del contenido de sodio. La gran utilidad de este elemento como indicador de berilo se deduce también al observar el mapa de distribución en el *área de minas* (fig. 7). Los lugares que se han comprobado como productores de berilo durante los trabajos de proyecto, son indicados por un contenido anómalo de sodio.

4.1.2. LITIO

Después del sodio, el litio es el elemento que mejor puede ser utilizado en la prospección de esmeraldas. El cuadro 2 muestra la distribución de este elemento. Contrario al caso de sodio, el litio presenta una gran lixiviación en los *sitios mineralizados*. Es allí donde muestra el valor más bajo. El siguiente valor más bajo lo poseen las muestras de alteración, exceptuando los carbonatos, los cuales, a pesar de estar generalmente en sitios no favorables, normalmente tienen un bajo contenido de litio. Los valores para los diferentes tipos de roca son más bajos en el *área de minas* que *fuera del distrito minero*.

La lixiviación de litio se puede explicar por la similaridad de las propiedades de este elemento con sodio y con magnesio. En soluciones saturadas de sodio y magnesio, el litio tiene poca oportunidad de ocupar, como impureza, los espacios propios de estos elementos en la estructura cristalina.

Como puede verse en la figura 8, este elemento muestra lixiviación en los sitios donde se ha comprobado mineralización de berilo, corroborando su utilidad como elemento indicador.

4.1.3. BARIO

Después del sodio y litio, el bario y el potasio son los mejores indicadores locales de mineralización, siendo notablemente lixivados de los lugares mineralizados, tal como puede verse en el cuadro 2. De nuevo son los *sitios mineralizados* los que poseen el valor más bajo de bario, seguido por las muestras de alteración. También, los valores en el *área de minas* son siempre más bajos que *fuera del distrito minero*. Es sorprendente el bajo valor del coeficiente de variación en este elemento, lo cual indica una distribución bastante constante en los grupos y poblaciones consideradas. También lo es su extrema lixiviación en lutitas negras, material este en el cual es un excelente indicador.

La figura 9 muestra gráficamente la utilidad del bario como indicador de mineralización.

4.1.4. POTASIO

Este elemento muestra una gran lixiviación en los *sitios mineralizados* (ver cuadro 2). Es por esto que se escogió junto con bario como un elemento indicador de berilo, después del sodio y litio. Debido a que en muestras de alteración este elemento sufre mayor lixiviación *fuera del distrito minero*, no puede ser utilizado como indicador regional de berilo. Sin embargo, debido a su bajo contenido en los *sitios mineralizados*, comparado con cualquier otro valor dentro del *área de minas*, puede ser utilizado como indicador en exploración detallada o semidetallada. También el potasio está lixivado de las lutitas negras dentro del *área de minas*, al compararlas con las de *fuera del distrito minero*. La figura 10 muestra cómo los patrones de lixiviación en el *área de minas* corresponden con bastante aproximación con las zonas mineralizadas.

4.1.5. PLOMO

Después de sodio y litio, el plomo es el elemento que mejor se puede utilizar como indicador regional (ver cuadro 2).

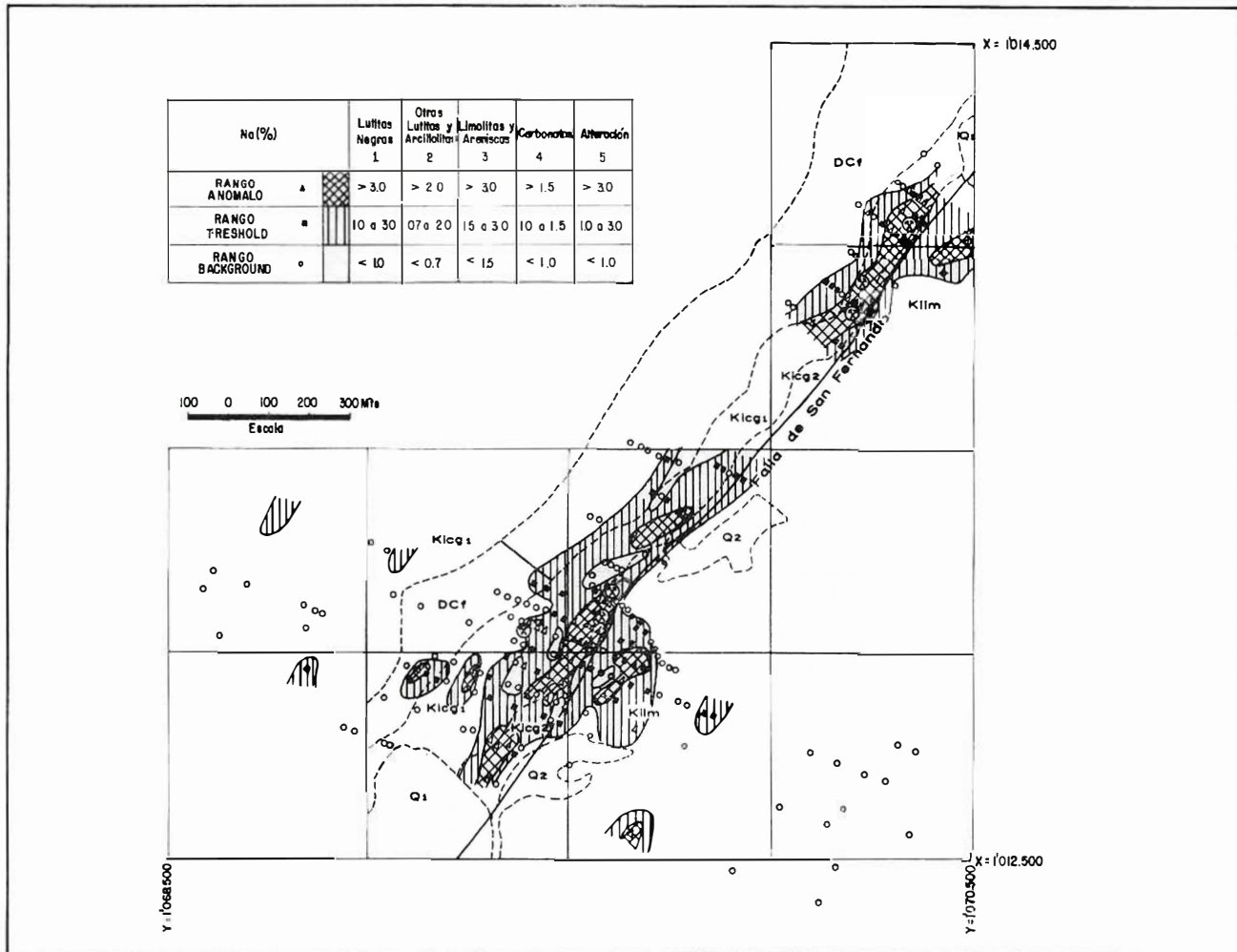


FIGURA 7. Mapa con la distribución de los valores de Sodio en rocas.

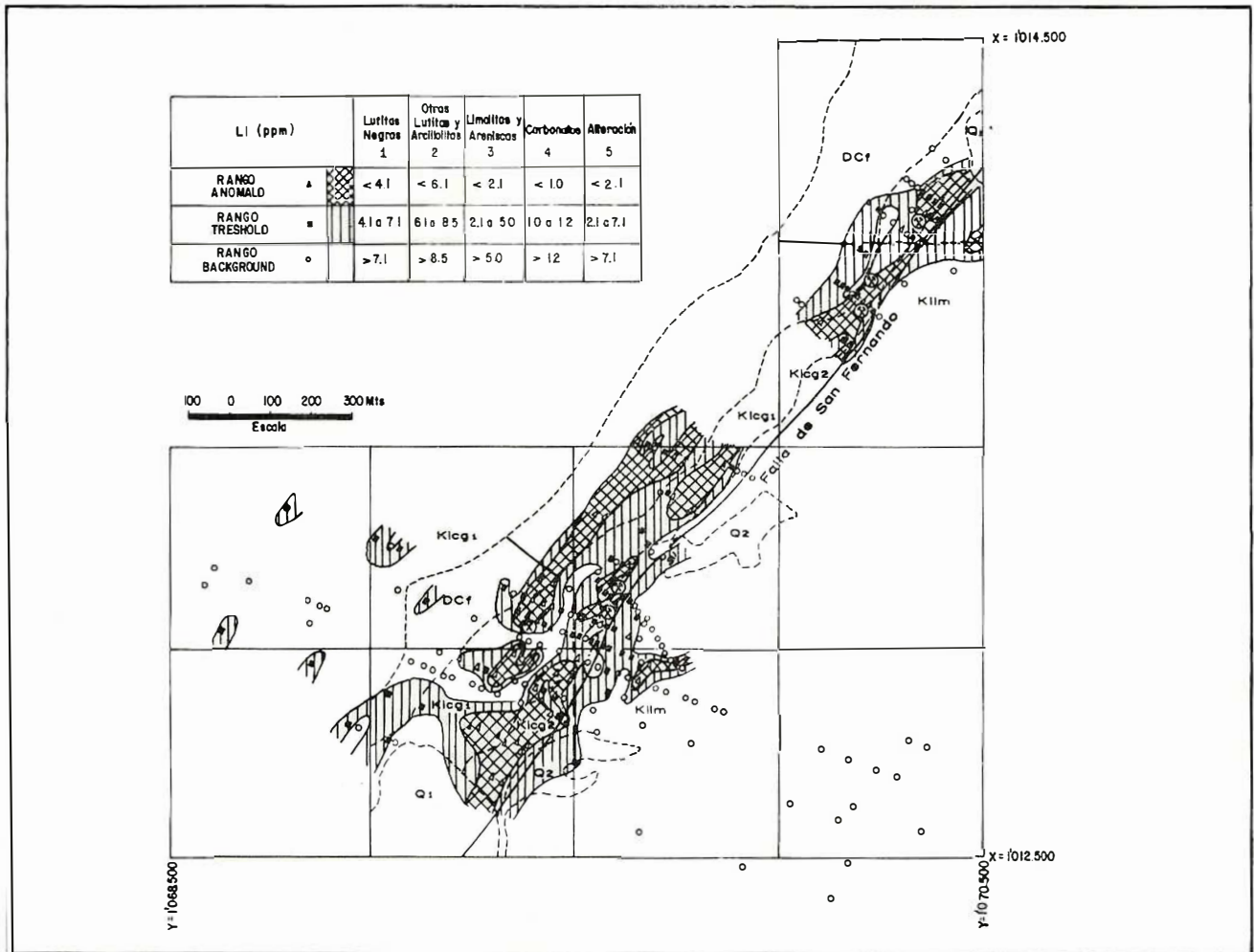


FIGURA 8. Mapa con la distribución de los valores de Litio en rocas.

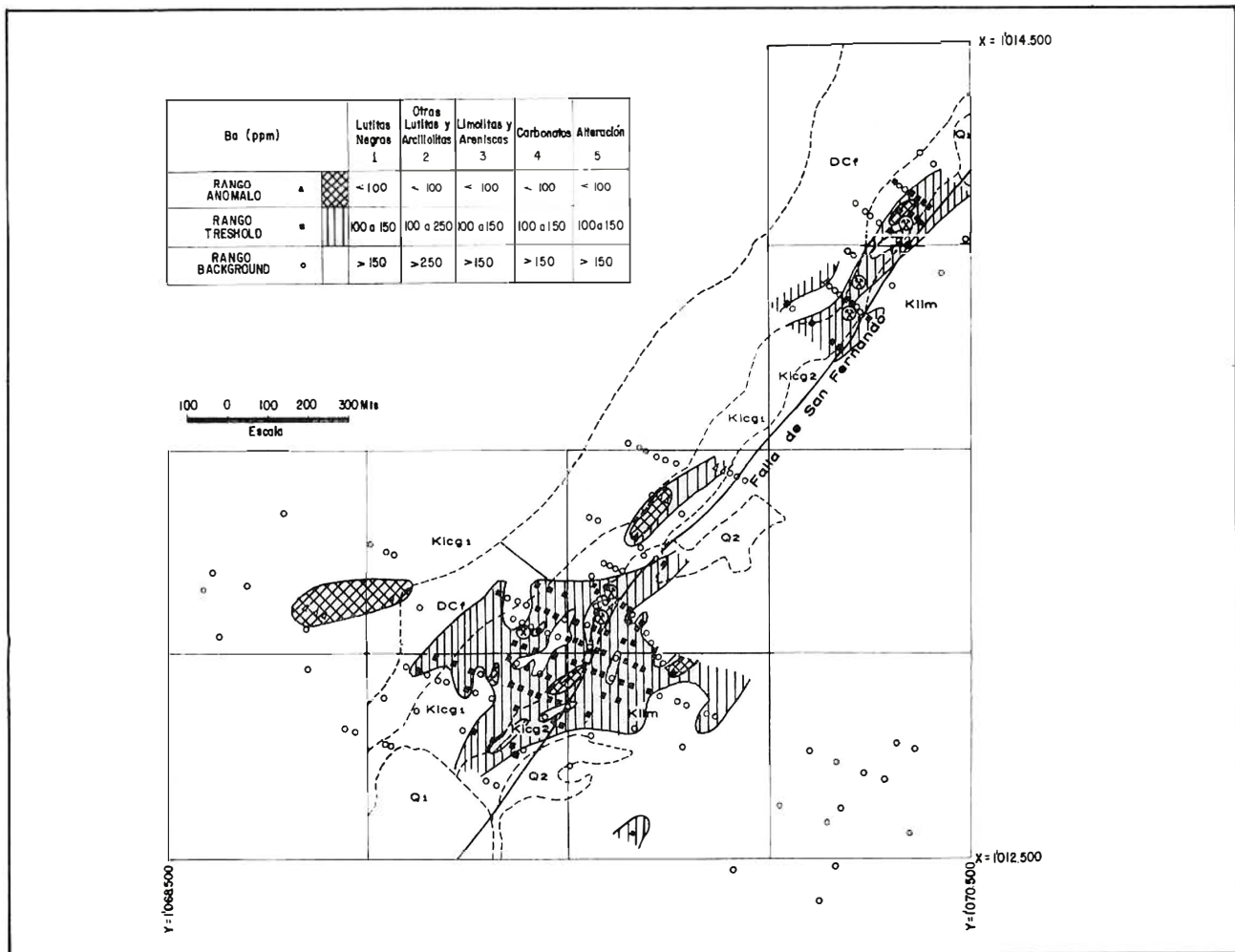


FIGURA 9. Mapa con la distribución de los valores de Bario en rocas.

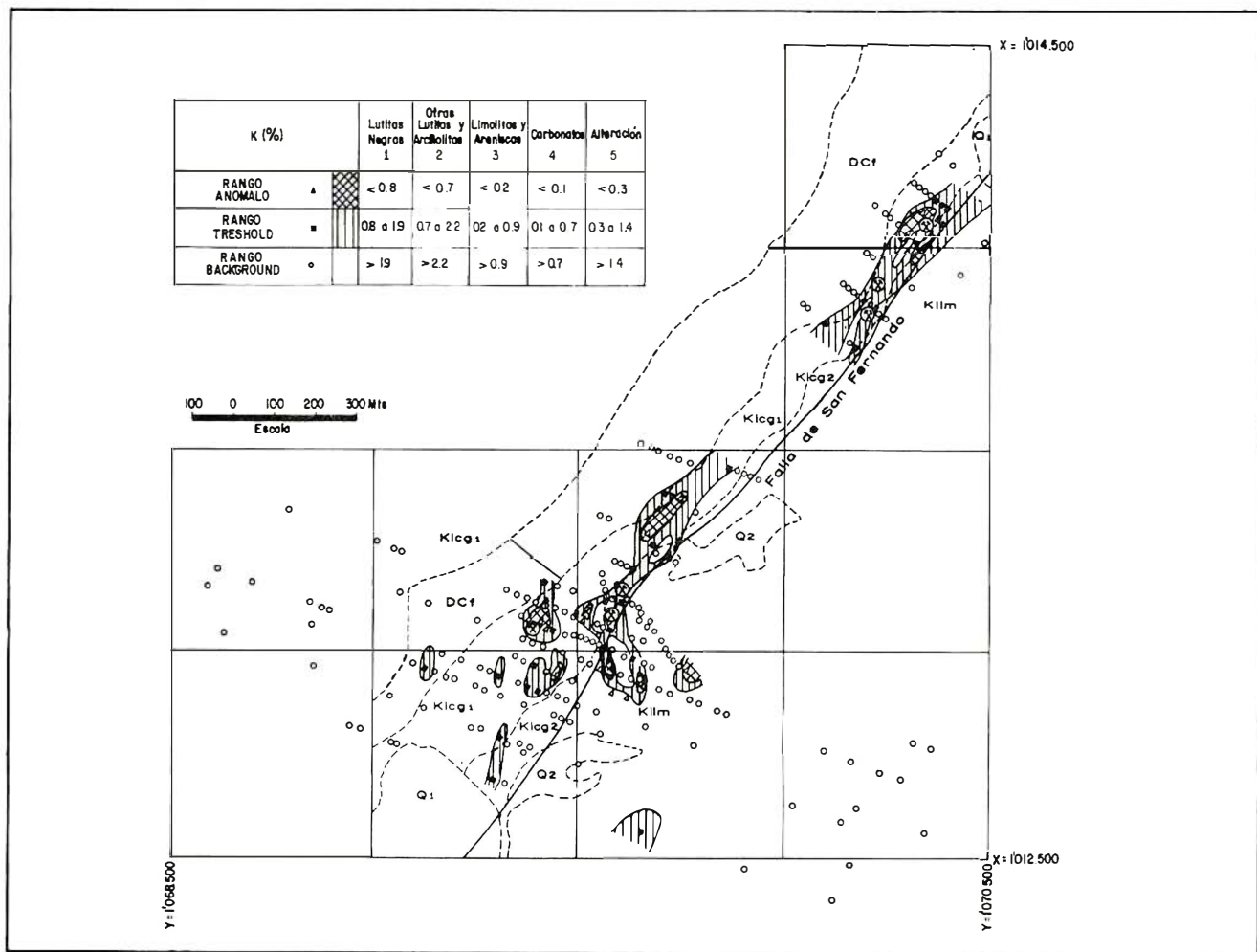


FIGURA 10. Mapa con la distribución de los valores de Potasio en rocas.

Debido a que este elemento no muestra diferencias entre los *sitios mineralizados* y los demás del *área de minas*, no fue utilizado como indicador local, pero dados los buenos valores que presentan los factores de lixiviación, sirve como indicador regional. Especialmente las rocas alteradas dentro y fuera del distrito poseen de gran contraste en el contenido de plomo. Este hecho puede ser en parte debido al alto background en los sitios *fuera del distrito minero*, donde como es sabido, existen manifestaciones de plomo y zinc.

4.1.6. BERILIO

La utilidad de este elemento es mayor como guía para entender la génesis de estos depósitos y menor como guía de exploración. La distribución de berilio se muestra en el cuadro 2.

Como puede verse, en los *sitios mineralizados* el contenido de berilio en las rocas es menor que en los otros tipos de roca en el *distrito minero*, exceptuados los carbonatos, los cuales normalmente tienen un bajo contenido de berilio. Esto es indicación de lixiviación en el *área de minas*. Esta lixiviación es probablemente suficiente para producir el berilio necesario para la precipitación de esmeraldas en el *área de minas*.

En las rocas de alteración, especialmente *fuera del distrito minero*, existe una extrema lixiviación de berilio. La no formación de esmeraldas en esa parte puede ser explicada por la ausencia de sodio en las rocas producto de alteración. Esto implica que probablemente las soluciones que precipitaron los minerales de alteración *fuera del área de minas*, estaban aún saturadas de sodio y no favorecieron la precipitación del berilio.

En comparación con las rocas *fuera del distrito minero*, únicamente las lutitas negras en el *área de minas* se encuentran lixiviadas en berilio. Este hecho, además de que fuera del distrito las rocas de alteración presentan una gran lixiviación, hace que el berilio no sea útil en la prospección regional de esmeraldas.

Cerca de 6 muestras que contenían berilio fueron analizadas, dando valores en berilio entre 20 y 210 ppm. Esto indica que muestras con más de 20 ppm de este elemento muy probablemente son mineralizadas. En este sentido, puede ser utilizado muy res-

tringidamente como indicador detallado de mineralización.

4.1.7. MOLIBDENO

Este elemento es un buen indicador regional tal como se deduce de sus factores de lixiviación. Sin embargo, debido a los altos valores del coeficiente de variación, sodio y litio son considerados mejores indicadores (cuadro 2).

Molibdeno es especialmente lixiviado de las lutitas negras y las rocas alteradas en el *área de minas*, como se observa al comparar estos valores con sus respectivos *fuera del distrito minero*. Es en estos mismos grupos donde presenta los mejores valores del coeficiente de variación, y este hecho le da crédito como indicador regional.

4.1.8. ESTRONCIO

El comportamiento de este elemento es, como puede esperarse, similar al de bario, pero es un indicador regional en vez de local (cuadro 2). Presenta buenos factores de lixiviación para lutitas y limolitas, materiales en los cuales puede ser utilizado como indicador regional de berilio.

4.1.9. ZINC

Tiene un comportamiento similar al plomo. Puede ser utilizado como indicador regional (cuadro 2). Como el plomo, el zinc posee muy buenos valores de lixiviación, pero sus altos coeficientes de variación hacen que el plomo sea preferido para exploración regional. Igual que el plomo, los valores de alteración dentro y fuera de la zona de minas muestran un contraste muy significativo.

4.1.10. COBRE

Este elemento no parece ser utilizable en exploración de berilio (cuadro 2). El cobre tiende a enriquecerse en las zonas de alteración, muy especialmente fuera del distrito. El mismo fenómeno es observado en los *sitios mineralizados*, aunque con una intensidad mucho menor.

4.1.11. NIQUEL

Este elemento tampoco es útil en la exploración de esmeraldas; muestra enriquecimiento en los lugares mineralizados y en

las lutitas negras del *área de minas*, comparadas con las muestras de *fuera del distrito minero*.

4.1.12. FORMULAS COMBINADAS

Con el fin de obtener el mayor contraste posible para exploración detallada y para exploración regional en base a muestras de rocas, se consideró conveniente incluir en una fórmula combinada el mayor número de elementos indicadores útiles para la prospección. Durante la visita de Alexei A. Beus se discutió esta idea y en base a los datos colectados por el proyecto en esta área, Beus sugirió la fórmula:

$$M = \frac{(\text{Na}\%)^3}{(\text{K}\%)(\text{Li ppm})(\text{Mo ppm})} = \frac{\text{Na}}{\text{K}} \times \frac{\text{Na}}{\text{Li}} \times \frac{\text{Na}}{\text{Mo}}$$

siendo M lo que él llamó "coeficiente del grado de alteración metasomática".

Luego de revisar los datos finales existentes se llegó a la conclusión que el mayor contraste utilizable en exploración detallada lo suministra la fórmula:

$$M_1 = \text{Log} \frac{(\text{Na}\%)^3}{(\text{Li ppm})(\text{K}\%)(\text{Ba ppm})}$$

Se puede apreciar en la figura 11, que en el histograma correspondiente al *área de minas* están perfectamente manifestadas las dos poblaciones involucradas allí, a saber: *sitios mineralizados* y *fuera del distrito minero*. Estas dos últimas poblaciones muestran histogramas de distribución muy diferentes, hasta el punto de que ni siquiera tienen intervalo común. El 58,09% de los valores de M_1 en el histograma *área de minas* son exclusivos al compararlos con los valores en el histograma de los *sitios mineralizados*, lo cual da una idea del excelente contraste suministrado por la expresión M_1 para la prospección detallada.

Para diseñar esta expresión se tuvieron en cuenta los elementos que muestran un buen contraste en su contenido entre los *sitios mineralizados* y el *área de minas*, especialmente en las lutitas negras en las cuales se presenta la mineralización. La utilidad de esta fórmula como indicador de mineralización se pone de manifiesto en la figura 12. Los sitios mineralizados están perfectamente señalados por los valores anómalos de esta expresión.

Para exploración regional se sugiere como mejor indicador la fórmula:

$$M_2 = \text{Log} \frac{(\text{Na}\%)^3}{(\text{Li ppm})(\text{Pb ppm})(\text{Mo ppm})}$$

Para la construcción de esta expresión se consideraron los elementos que mayor contraste presentaban en su composición, al comparar las poblaciones *área de minas* y *fuera del distrito minero*; en otras palabras, los elementos que poseen un mayor factor de enriquecimiento (caso del sodio), o de lixiviación. La figura 11 presenta los histogramas de M_2 para las diferentes poblaciones.

En esta figura se aprecia cómo el 56,50% de los valores de M_2 en el histograma *área de minas* son exclusivos al compararlos con los valores en el histograma *fuera del distrito minero*. Estas fórmulas combinadas, tienen además la ventaja de mostrar una distribución de valores muy similares para diferentes tipos de roca, evitando así que las muestras tengan que ser clasificadas (lutitas, areniscas, etc.) antes del tratamiento estadístico.

4.2. DISTRIBUCION DE LOS ELEMENTOS EN SUELOS

Para poder realizar análisis sobre la distribución de los elementos en las muestras de suelos, éstas fueron divididas en dos grupos principales así: (A) comprende todas muestras tomadas dentro del *área de minas*; un total de 590 según se indica en la figura 5. (B) Incluye las muestras tomadas fuera del distrito minero, tal como se explicó antes, en los sitios marcados en la figura 2. Se colectaron un total de 18 muestras. Además, las muestras del grupo A fueron subdivididas, dependiendo de las formaciones o miembros geológicos a los cuales representaban (figura 3). Se obtuvieron así otros cinco grupos:

- 1- Muestras tomadas sobre el miembro Kicg1 en la parte occidental del mapa, totalizando 60 muestras.
- 2- Muestras situadas sobre la formación DCf, las cuales sumaron 66.
- 3- Muestras localizadas sobre el miembro Kicg1 al este del anterior y las cuales totalizaron 150.
- 4- Muestras tomadas sobre el miembro Kicg2 y sobre la zona de fractura. Este grupo suma

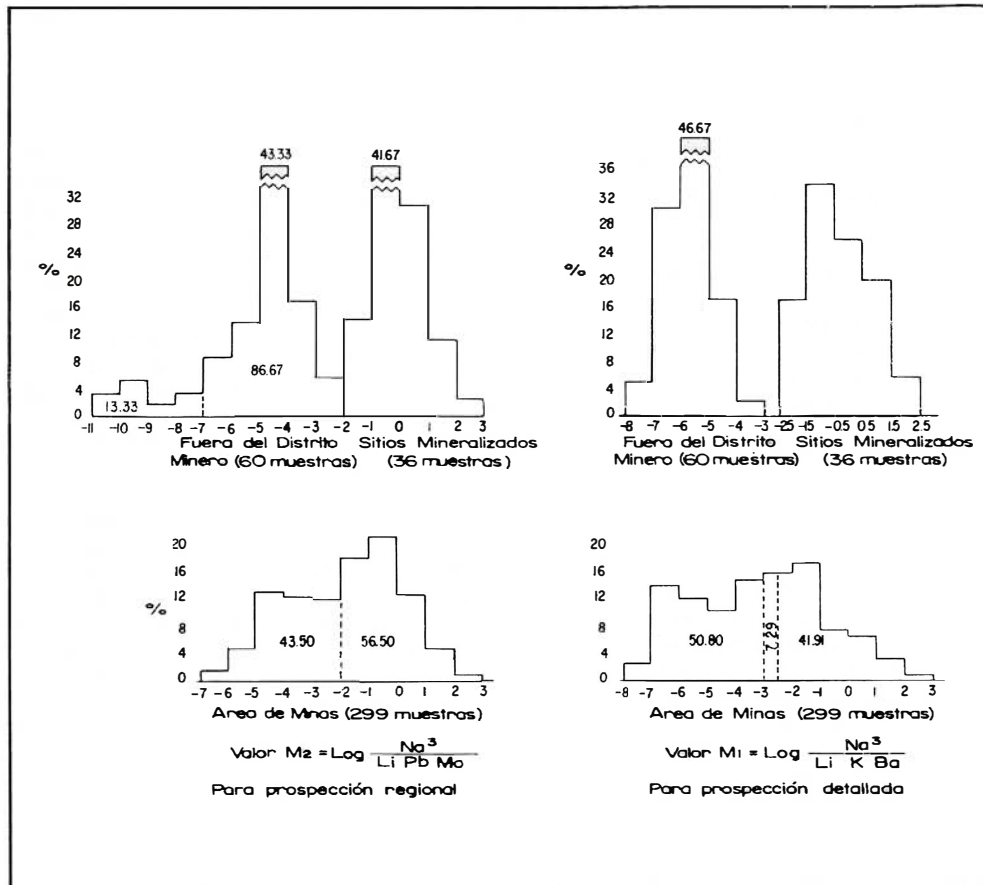


FIGURA 11. Histograma de distribución de los valores M_1 y M_2 .

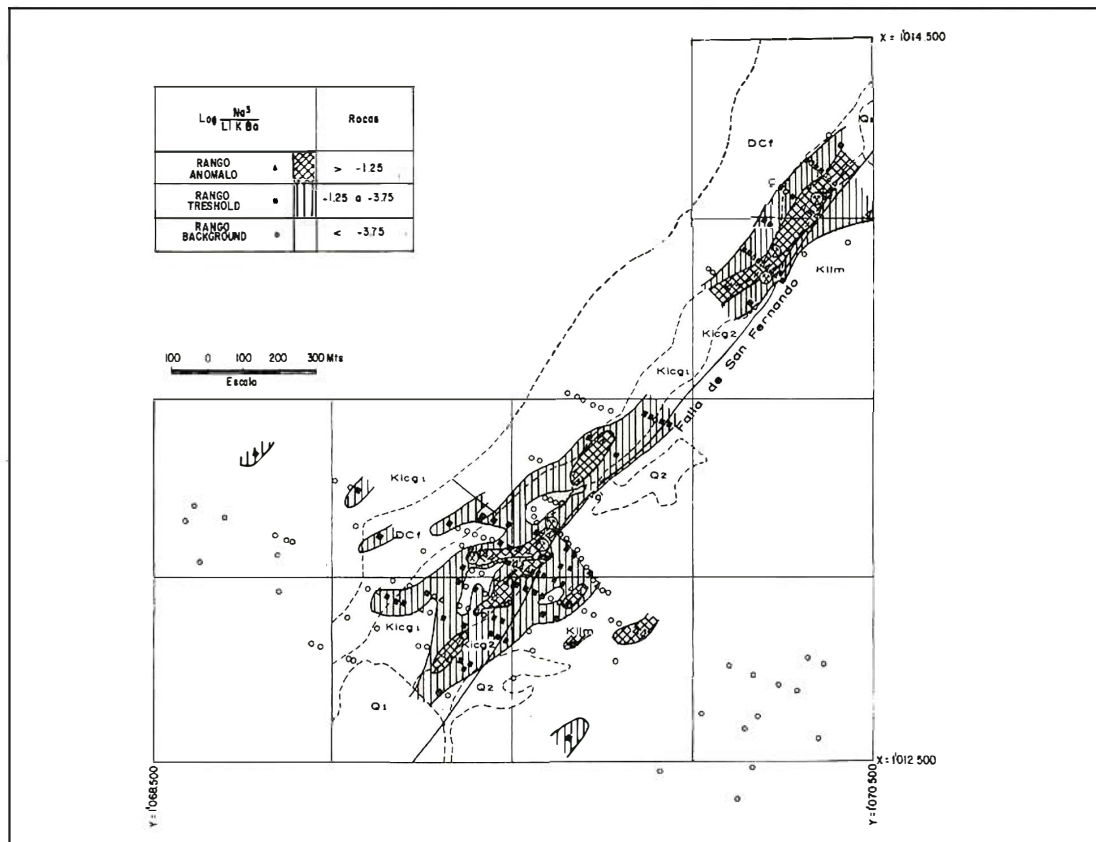


FIGURA 12. Mapa con la distribución de los valores M_1 en rocas (Na y Ken ; Li y Ba en ppm).

127 muestras y lógicamente incluye la mayoría de las muestras anómalas y de los sitios mineralizados.

5- Muestras tomadas sobre la formación Kilm al este de la zona de fractura. Este grupo totaliza 232 muestras.

El valor medio de cada elemento en todos los grupos descritos, está representado en la figura 13. De esta figura se infiere claramente cómo sodio, litio y bario, son los mejores indicadores para prospección detallada de berilio, al comparar el valor medio en el grupo 4 con los demás grupos dentro del área de minas. Al plotear en mapas los valores anómalos, sodio y litio son los elementos que mejor determinan los sitios mineralizados, tal como se aprecia en las figuras 14 y 15. De esta manera, el mejor indicador de suelos es la relación Li/Na, cuya distribución de valores está representada en la figura 16. Esta relación tiene también la ventaja de mostrar una distribución de valores similar en las diferentes formaciones y miembros representados, evitando así tener que clasificar las muestras antes de proceder al tratamiento estadístico.

Para la prospección regional los mejores indicadores son: sodio, litio, bario, molibdeno y estroncio, tal como se deduce al comparar los valores para los grupos A y B. Plomo y Zinc son también buenos indicadores, pero es posible que tal como sucede con las rocas, esto se deba a un alto background en el grupo fuera del distrito minero, donde como se sabe, existen manifestaciones de plomo y zinc.

En general, los valores de rocas y suelos corresponden bien para un determinado lugar dentro del área de minas. Se exceptúa de esta apreciación el berilio, el cual muestra un enriquecimiento bien marcado en los suelos del grupo 4, cuando era de esperarse una lixiviación en los mismos, ya que, como se vió anteriormente, las rocas mineralizadas y las lutitas negras cerca a la mineralización, muestran lixiviación en este elemento.

Existen dudas acerca de la razón por la cual, la indicación de mineralización por medio de suelos queda totalmente cortada en la parte norte del mapa. Existe la posibilidad de que se deba a diferencias en el tipo de muestras de suelo, las cuales no se pudieron evitar. Las muestras tomadas dentro

de los trabajos de las minas, hasta donde llega la anomalía, son suelos residuales, algunas veces un poco removidos por las labores de minería. Los de la parte norte y otros, son suelos con contenido orgánico, ya que se tomaron en áreas cubiertas por pastos. Es posible que el agudo contraste se deba a que las muestras orgánicas son menos representativas o a que la zona de alteración está realmente cortada.

En general, se tiene la impresión de que las muestras de rocas son más representativas y mejores indicadores locales de mineralización que las muestras de suelo.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Por medio de este estudio se conocieron ciertas características geológicas y geoquímicas de los yacimientos de esmeraldas y se propusieron ideas acerca de su origen y modo de formación. Como consecuencia de esto, se encontraron guías útiles para la exploración de esmeraldas en esta parte de la Cordillera Oriental, pero que seguramente tienen aplicación en otros distritos.

Complejas condiciones físico-químicas deben ser responsables de la localización de los depósitos. Estas condiciones están controladas por factores tales como profundidad de emplazamiento de la mineralización, distancia de una posible fuente de calor, composición de una solución única o mezcla de soluciones, patrón tectónico como conductor, etc. Para el esclarecimiento de estos factores se hace necesario continuar la investigación.

Áreas favorables para la exploración regional pueden ser escogidas a lo largo de fallas mayores, generalmente con sentido N-NE, relacionadas a movimientos posiblemente penecontemporáneos con la depositación de los estratos más bajos del Cretáceo y las cuales tengan en sus paredes de falla lutitas negras (shales negros). Es importante hacer un estudio más detallado sobre el papel de las fallas transversales a las ya mencionadas, en el control de los lugares mineralizados.

Sobre estas áreas, estructural y litológicamente favorables, se debe llevar a cabo un muestreo de sedimentos de corriente, con una densidad aproximada de una muestra por kilómetro cuadrado; de esta forma, se pueden escoger ciertos segmentos favorables

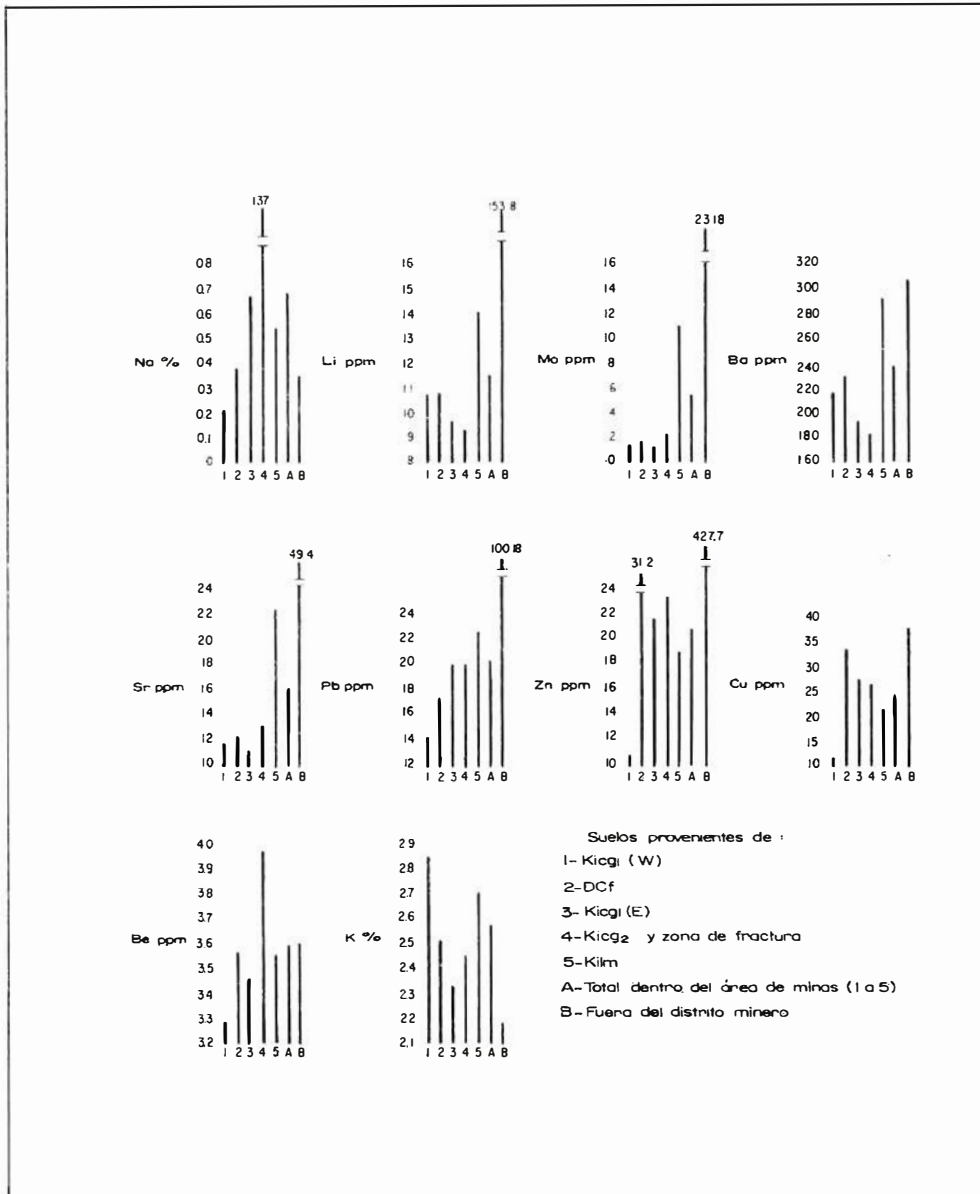


FIGURA 13. Distribución de los elementos en suelos (valor medio).

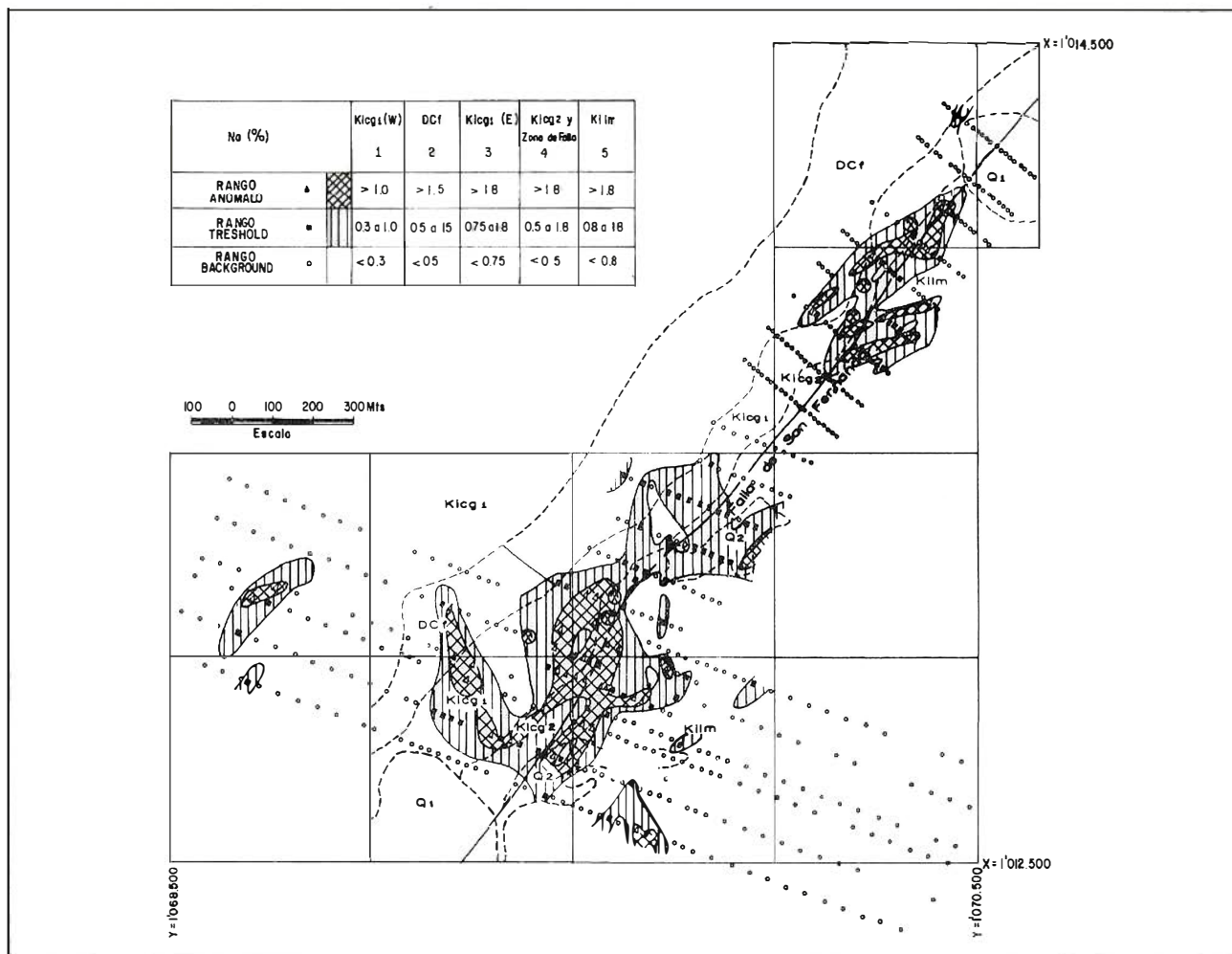


FIGURA 14. Mapa con la distribución de los valores de Sodio en suelos.

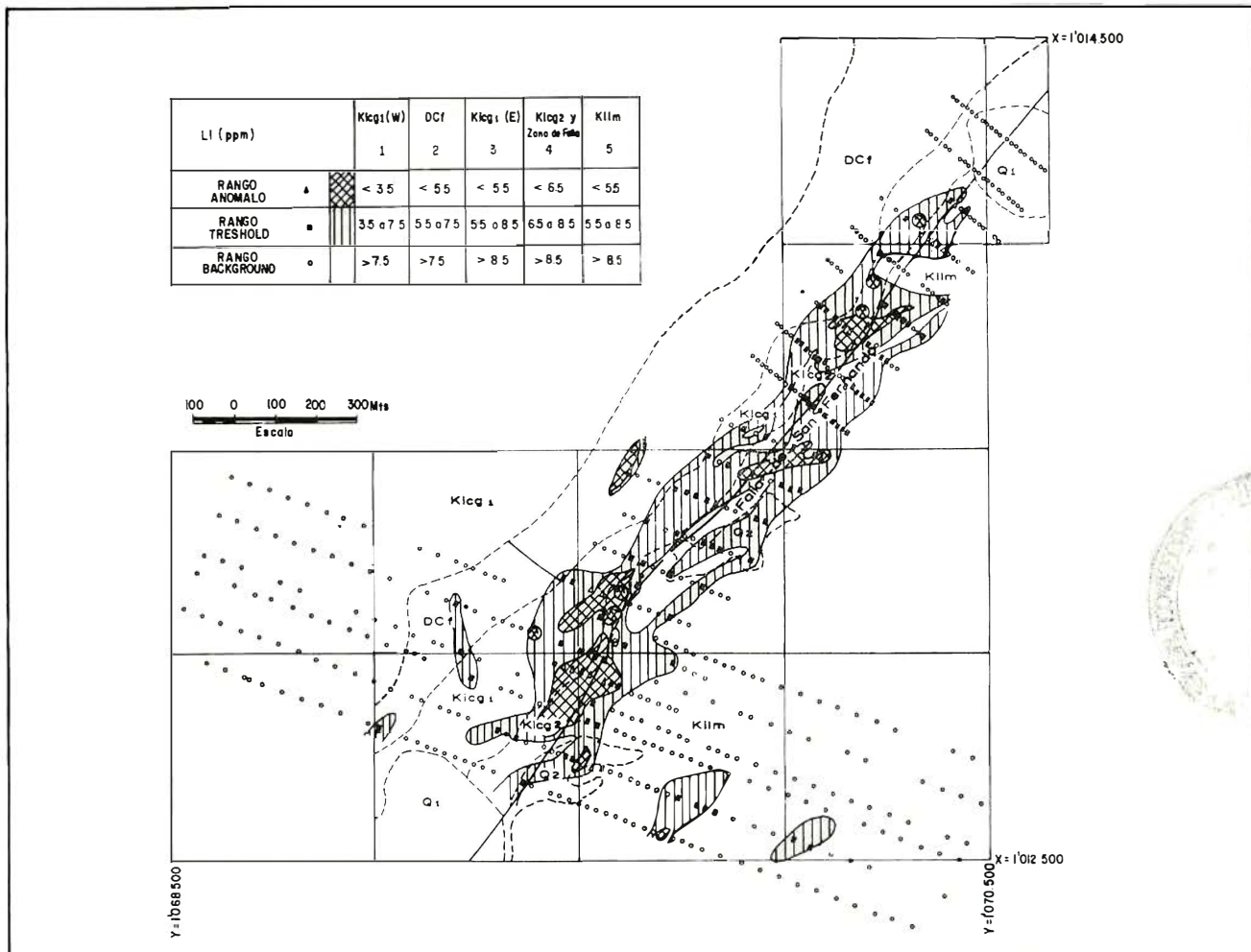


FIGURA 15. Mapa con la distribución de los valores de Litio en suelos.

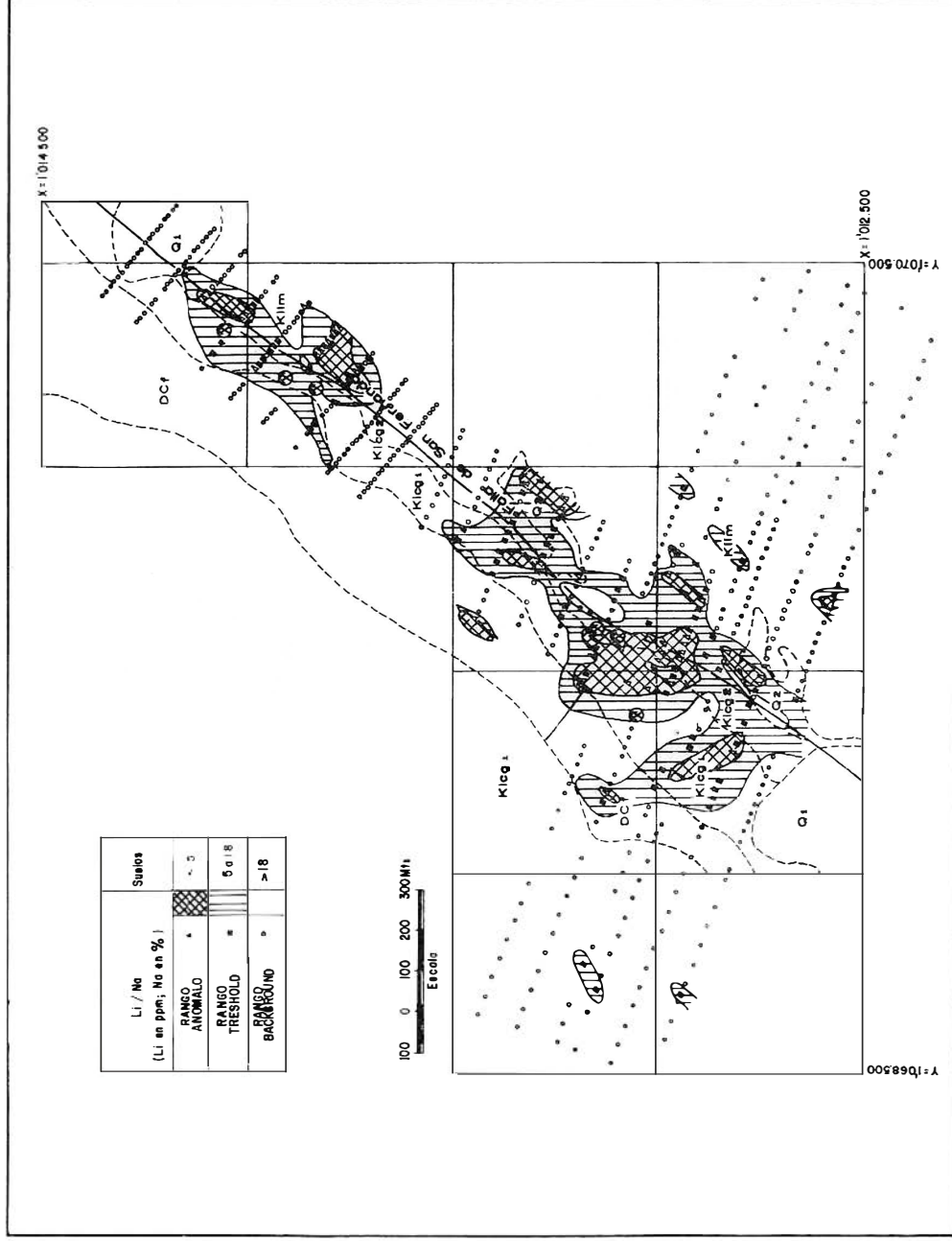


FIGURA 16. Mapa con la distribución de los valores de Li/Na en suelos.

de estas estructuras, indicadas por anomalías en la relación Li/Na en los sedimentos de corriente. A lo largo de estos segmentos de falla y perpendicularmente a ellos, se deben hacer líneas de muestreo cada 100 m, preferiblemente en rocas y si no es posible, en suelos. Cada línea debe extenderse unos 500 m a cada lado a lo largo de los cuales se toman muestras cada 25 m. Para detectar anomalías en suelos se utiliza la relación Li/Na y en rocas la fórmula combinada:

$$M_1 = \text{Long} \frac{(\text{Na} \%)^3}{(\text{Li ppm}) (\text{K} \%) (\text{Ba ppm})}$$

En las áreas restringidas que después de esta última etapa presentan anomalías, se debe hacer por medio de destapes y trincheras un estudio petrográfico y geoquímico de los patrones de alteración, para así determinar zonas favorables e iniciar una fase de explotación tentativa.

El estudio de patrones de alteración es no solamente útil para la exploración de esmeraldas, sino también de otros minerales. Los patrones de alteración pueden reflejar una zonación mineral existente en el área de estudio, la cual puede controlar la presencia de depósitos minerales de esmeraldas, plomo, zinc y cobre, posiblemente relacionados de una u otra forma en su génesis.

Para completar el estudio geoquímico de patrones de alteración, se sugiere investigar en el uso de los lantánidos, de elementos radioactivos como uranio, torio y de la relación Mg/Ca. Esta última, se aconseja debido a la extensa dolomitización que presentan las rocas alteradas en esta región.

Finalmente, la aplicación de la geoquímica de rocas se puede extender a la conducción de trabajos de minería en el proceso de explotación. Se demostró que utilizando la geoquímica de rocas se pueden trazar fácilmente áreas restringidas, favorables para la producción de berilo.

6 BIBLIOGRAFIA

- BAKKER, P., 1973.- *Investigaciones Geoquímicas en las minas de Muzo. Informe Técnico Interno No. 1, Proyecto Esmeraldas Naciones Unidas, 24p, (Inédito).*
- BEUS, A.A. y MINEEV, D.A., 1972.- *Some geological and geochemical features of the Muzo-Coscuez emerald zone, Cordillera Oriental, Colombia. United Nations Internal Report, 47p. (Inédito).*
- GUERRA, A., 1972.- *Estudios geológicos de las Calizas del Guavio, municipios de Ubalá y Gachalá Cundinamarca. Informe No. 1615 - INGEOMINAS Bogotá, 151 p. (Inédito).*
- McLAUGHLIN, D.H.Jr. y ARCE, M., 1971.- *Recursos minerales de parte de los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Meta. Bol. Geol. 6, (1), 102 p.*
- ROEDDER, E., 1972.- *Data of geochemistry. Sixth edition. Chapter JJ. Composition of fluid inclusions. US Geological Survey Professional paper 440 JJ. 189 p.*
- SUAREZ, V., 1945.- *Reconocimiento geológico de la región del Guavio, Gachalá Cundinamarca. Compilación de Estudios Geológicos Oficiales de Colombia. Tomo VI, p. 147-188.*
- WOKITTEL, R. y LOPEZ CASAS, J., 1953.- *Estudio minero y geológico de la región del Guavio y de los Farallones de Medina, Departamento de Cundinamarca. Bol. Geol. 1 (4), p. 1-61.*
- WOKITTEL, R. y MUTIS, V. 1954.- *Yacimientos esmeraldíferos de los municipios de Ubalá, Gachalá, Almeida, Macanal y Somondoco, departamentos de Cundinamarca y Boyacá. Informe No. 1050, 1a. parte INGEOMINAS, Bogotá - 26 p. (Inédito).*

