



Libertad y Orden

**ESTADO DEL CONOCIMIENTO DE LA EXPLORACIÓN  
DE ESMERALDAS EN COLOMBIA**

Por  
**Mario Maya**  
**Joaquín Buenaventura**  
**Rosalba Salinas**

**Bogotá, Mayo de 2004**

República de Colombia  
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA  
**INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA**

**REPÚBLICA DE COLOMBIA  
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA**

**INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA  
INGEOMINAS**

**ESTADO DEL CONOCIMIENTO DE LA EXPLORACIÓN  
DE ESMERALDAS EN COLOMBIA**

**Por**

**Mario Maya  
Joaquín Buenaventura  
Rosalba Salinas**

**Bogotá, Mayo de 2004**

Referencia:

Maya, M., Buenaventura, J., Salinas, R., 2004. Estado del conocimiento de la exploración de esmeraldas en Colombia. Nombre de la publicación. INGEOMINAS. Págs.  
ISSN

## CONTENIDO

<b>RESUMEN .....</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>5</b>
<b>PRESENTATION .....</b>	<b>6</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
<b>1. RECUENTO HISTÓRICO.....</b>	<b>8</b>
<b>2. MARCO ECONÓMICO.....</b>	<b>13</b>
2.1 PRODUCCIÓN Y COMERCIO EXTERIOR.....	13
2.2 SITUACIÓN DE LA MINERÍA Y PERSPECTIVAS.....	15
2.3 EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN.....	16
2.4 TALLA Y GEMOLOGÍA .....	17
<b>3. MARCO GEOLÓGICO ESTRUCTURAL .....</b>	<b>18</b>
3.1 GEOLOGÍA REGIONAL.....	18
3.1.1 Cinturón Oriental .....	19
3.1.2 Cinturón Occidental .....	21
3.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL .....	22
3.2.1 Cinturón Oriental .....	22
3.2.2 Cinturón Occidental .....	23
<b>4. MINERALIZACIÓN.....</b>	<b>25</b>
4.1 CINTURÓN ESMERALDÍFERO ORIENTAL.....	25
4.1.1 Localización de los depósitos .....	25
4.1.2 Estratigrafía.....	25
4.1.3 Geología Estructural .....	27
4.2 CINTURÓN ESMERALDÍFERO OCCIDENTAL .....	27
4.2.1 Localización de los depósitos .....	27
4.2.2 Estratigrafía.....	27
4.2.3 Petrografía.....	30
4.2.4 Geología Estructural .....	31
<b>5. PROSPECCIÓN GEOQUÍMICA.....</b>	<b>34</b>
5.1 CINTURÓN ESMERALDÍFERO ORIENTAL.....	34
5.1.1 Geología y geoquímica de las minas de esmeraldas de Gachalá, Cundinamarca (Escovar, 1975) .	34
5.1.2 Determinación de nuevos prospectos esmeraldíferos en el sector de Gachalá – Guavio – Chivor, Departamentos de Cundinamarca y Boyacá (Carrillo, 1989).....	35
5.1.3 Prospección geológica y geoquímica, Aporte 1228, Guavio – Chivor (Arboleda, 1991).....	35
5.1.4 Exploración y evaluación de nuevas áreas potencialmente esmeraldíferas en el Cinturón oriental y occidental (Profesionales Asociados, 1996) .....	36
5.1.5 Proyecto de exploración de áreas potencialmente esmeraldíferas en un sector de Páez – Campohermoso – Macanal, Departamento de Boyacá (Cardozo & Leal, 2000) .....	37
5.1.6 Otros trabajos de exploración .....	37
5.2 CINTURÓN ESMERALDÍFERO OCCIDENTAL .....	38
5.2.1 Algunos rasgos geológicos y geoquímicos del distrito Muzo – Coscuez (Beus & Mineev, 1972) .	38
5.2.2 Prospección de esmeraldas en los departamentos de Boyacá y Cundinamarca (PNUD, 1975) .....	39

5.2.3 Exploración zona de reserva nacional para esmeraldas Muzo-Coscuez, Boyacá, área suroriental (Mendoza P.G.A., 1991).....	41
5.2.4 Exploración y evaluación de nuevas áreas potencialmente esmeraldíferas en el Cinturón oriental y occidental (Profesionales Asociados, 1996) .....	42
5.2.5 Programa de exploración geológica en zonas promisorias para la exploración de esmeraldas en Yacopí, Cundinamarca, y Coscuez – Peñas Blancas – San Pablo de Borbur, Boyacá, Colombia (Castañeda, 1996) .....	43
5.2.6 Exploración y evaluación de nuevas áreas potencialmente esmeraldíferas, sector Útica – La Palma (Exploraciones y Ensayos, 1997).....	44
5.2.7 Otros trabajos de exploración geoquímica.....	45
<b>6. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA.....</b>	<b>47</b>
6.1 CINTURÓN ESMERALDÍFERO ORIENTAL.....	47
6.1.1 Prospección de esmeraldas en los departamentos de Boyacá y Cundinamarca (PNUD, 1975).....	47
6.1.2 Prospección geológica y geoquímica, Aporte 1228, Guavio – Chivor (Arboleda, 1991).....	48
6.1.3 Exploración y evaluación de nuevas áreas potencialmente esmeraldíferas en el Cinturón oriental y occidental (Profesionales Asociados, 1996) .....	49
6.1.4 Evaluación de espectros magnéticos de posibles zonas de mineralización asociadas a esmeraldas, en el Municipio de Macanal, Boyacá (Vásquez, 2003).....	49
6.1.5 Evaluación magnetométrica, radiométrica y geoelectrica de los depósitos esmeraldíferos del distrito minero de Chivor, Departamento de Boyacá– Colombia (Ochoa, 2003) .....	50
6.1.6 Otros trabajos de exploración .....	51
6.2 CINTURÓN ESMERALDÍFERO OCCIDENTAL .....	51
6.2.1 <i>Report on exploration geophysics at the emerald mines near Gachalá, Cundinamarca</i> (Kutterink, 1975).....	52
6.2.2 Exploración y evaluación de nuevas áreas potencialmente esmeraldíferas en el Cinturón oriental y occidental (Profesionales Asociados, 1996) .....	52
6.2.3 Exploración y evaluación de nuevas áreas potencialmente esmeraldíferas, sector Útica – La Palma (Exploraciones y Ensayos, 1997).....	52
<b>7. QUÍMICA DE LAS ESMERALDAS.....</b>	<b>53</b>
7.1 VALORES DE $\delta^{34}\text{S}$ .....	53
7.2 ESTUDIOS DE INCLUSIONES FLUIDAS .....	53
7.3 VALORES DE $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta\text{D}$ .....	55
7.4 ELEMENTOS MAYORES Y MENORES .....	55
<b>8. DATACIONES ISOTÓPICAS .....</b>	<b>57</b>
8.1 DATACIONES $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ .....	57
8.2 DATACIONES $\text{Rb}^{87}/\text{Sr}^{86}$ .....	57
<b>9. MODELOS GENÉTICOS PROPUESTOS PARA LA FORMACIÓN DE LOS DEPÓSITOS DE ESMERALDAS EN COLOMBIA .....</b>	<b>59</b>
9.1 TIPOS DE DEPÓSITOS EN EL MUNDO .....	59
9.2 MODELOS DE GÉNESIS PARA LAS ESMERALDAS COLOMBIANAS.....	59
9.2.1 Modelo de Beus & Meneev (1972).....	59
9.2.2 Modelo del PNUD (1975).....	60
9.2.3 Modelo hidrotermal - sedimentario.....	61
<b>10. CONTROLES DE LA MINERALIZACIÓN Y GUÍAS DE EXPLORACIÓN ....</b>	<b>63</b>
10.1 LITOLÓGICOS .....	64

10.2 ESTRATIGRÁFICOS .....	64
10.3 ESTRUCTURALES .....	64
10.4 ALTERACIÓN HIDROTERMAL .....	65
10.5 INDICADORES GEOQUÍMICOS.....	66
10.5.1 Distribución de elementos en rocas.....	66
10.5.2 Distribución de elementos en suelos .....	68
<b>11. ÁREAS PRIORITARIAS PROPUESTAS .....</b>	<b>70</b>
11.1 CINTURÓN ORIENTAL .....	70
11.1.1 Determinación de nuevos prospectos esmeraldíferos en el sector de Gachalá – Guavio – Chivor, departamentos de Cundinamarca y Boyacá (Carrillo, 1989) .....	70
11.1.2 Prospección geológica y geoquímica, Aporte 1228, Guavio – Chivor (Arboleda, 1991) .....	70
11.1.3 Exploración y evaluación de nuevas áreas potencialmente esmeraldíferas en el Cinturón oriental y occidental (Profesionales Asociados, 1996) .....	71
11.1.4 Proyecto de exploración de áreas potencialmente esmeraldíferas en un sector de Páez – Campohermoso – Macanal, Departamento de Boyacá (Cardozo & Leal, 2000) .....	71
11.1.5 Otros trabajos de exploración .....	72
11.2 CINTURÓN OCCIDENTAL .....	72
11.2.1 Exploración zona de reserva nacional para esmeraldas Muzo-Coscuez, Boyacá, área suroriental (Mendoza P.G.A., 1991) .....	72
11.2.2 Programa de exploración geológica en zonas promisorias para la exploración de esmeraldas en Yacopí, Cundinamarca, y Coscuez – Peñas Blancas – San Pablo de Borbur, Boyacá, Colombia (Castañeda, 1996) .....	73
11.2.3 Exploración y evaluación de nuevas áreas potencialmente esmeraldíferas en el Cinturón oriental y occidental (Profesionales Asociados, 1996) .....	73
11.2.4 Exploración y evaluación de nuevas áreas potencialmente esmeraldíferas, sector Útica – La Palma (Exploraciones y Ensayos Ltda., 1997).....	74
11.2.5 Atlas Colombiano de Información Geológico-Minera para Inversión – ACIGEMI (INGEOMINAS, 2000) .....	74
<b>12. DISCUSION FINAL Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>75</b>
<b>13. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>78</b>
<b>14. REFERENCIAS1 .....</b>	<b>81</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Producción de esmeraldas en Colombia.....	14
Figura 2. Comercio exterior – exportaciones de esmeraldas en el período 1978 – 2000. ...	14
Figura 3. Destino de las exportaciones de esmeraldas en 2000. ....	15
Figura 4. Localización de los dos cinturones esmeraldíferos en Colombia.....	20
Figura 5. Correlación de las unidades litoestratigráficas en los Cinturones esmeraldíferos Occidental y Oriental (Tomado de Forero, 1987) .....	21

## **RESUMEN**

Este trabajo constituye una síntesis de la información publicada en Colombia y en el mundo sobre el conocimiento de la exploración geológica, geoquímica y geofísica de los depósitos de esmeraldas en Colombia, particularmente en los denominados cinturones esmeraldíferos oriental y occidental localizados en la Cordillera Oriental, del Sistema Andino. Igualmente, en este trabajo se sintetizan los aspectos económicos, los controles de mineralización y guías de exploración, así como las conclusiones y recomendaciones de los trabajos publicados y no publicados.

Palabras claves: esmeraldas, exploración, geoquímica, geofísica, Cordillera de los Andes

## ***ABSTRACT***

*This work constitutes a synthesis of the information published in Colombia and in the world on the knowledge about geology, geophysics and geochemical exploration of the emerald deposits in Colombia, particularly in the denominated Eastern and Western emerald belts located in the Eastern Cordillera, Andean System. Also, in this publication the economic aspects, the mineralization controls and exploration guides, as well as the conclusions and recommendations of the published and unpublished works are synthesized.*

*Key words: emeralds, geological exploration, geochemistry, geophysical, Andean Cordillera*

## **PRESENTATION**

***By Alain Cheilletz  
Professor  
Institut Nacional Polytechnique de Lorraine, France***

*With 9 millions carats in 2003 (Ministerio de Minas y Energía), Colombia is at present the first producer of emeralds in the world, far ahead his main competitors, Brazil, Zambia, Zimbabwe, Afghanistan, Pakistan and Madagascar. This position comes from two main reasons:*

- (i) Exceptional geological conditions of formation within sedimentary rocks rich in organic matter (black shales) dating from the Early Cretaceous and giving a total area of 9900 km<sup>2</sup> as a potential source of deposits. Additionally, they also include and exceptionally high proportion of pure, gem quality stones including the most magnificent emeralds of Duke of Devonshire (1384 cts), the Smithsonian Institute of Washington (858 cts from Gachala) or the biggest ever found (aproxiamtively 6000 cts in the Tres Cruces mine;*
- (ii) The extraordinary capacities of Colombian people from the Pre-Colombian times, through the Spanish colony and actual times to hardly work and suffer to extract these stones from their birth-place.*

*However, the actual lowering of proved reserves in the principal mines (Muzo, Coscuez and Chivor) endangers seriously the future of this national production. It is therefore time for the different production chain groups to make a seer and exhaustive state of things. This was first done by the government through the organization by PROEXPORT of the first World Congress of Emerald held in 1996 in Bogotá. Among the strongest recommendations issued from the confrontation of world-wide experts, were the necessity of a better knowledge of emerald exploration strategies and resources evaluation. The present report is precisely the first step of such an objective. It encompasses the actual knowledge about the geology of the deposits and the geophysical and geochemical exploration techniques used in mineral exploration applied to Colombian emeralds. It also marks the come back of INGEOMINAS in the emerald field after the remarkable synthesis of H. Forero in 1987.*

*I personally congratulate M. Maya, J. Buenaventura and R. Salinas for this nice piece of work which undoubtedly will serve public and private institutions for a rapid establishment of exploration and resource evaluation strategies in the Colombian emerald field.*

## INTRODUCCIÓN

Este documento pretende poner a disposición de los investigadores y potenciales inversionistas la información publicada y no publicada sobre las esmeraldas en Colombia con el objetivo de informar sobre los conceptos, ideas y métodos empleados en la exploración de esmeraldas en Colombia. Su elaboración corresponde a una compilación de los apartes que tienen que ver, principalmente, con la exploración e investigación y los autores han tenido cuidado de no dar una valoración a los diferentes argumentos, métodos de trabajo, conclusiones y recomendaciones.

El texto, dividido en 15 capítulos, presenta inicialmente los trabajos de investigación sobre esmeraldas realizados en Colombia; luego presenta los aspectos económicos de producción y comercio exterior, situación de la minería y sus perspectivas, situación de la exploración y aspectos generales sobre la explotación que se realiza en los distritos mineros. Posteriormente, se describe el marco geológico y estructural de los dos cinturones esmeraldíferos localizados en la Cordillera Oriental. A continuación se resumen los trabajos que se han realizado en torno a la prospección geoquímica y geofísica de esmeraldas en los dos cinturones esmeraldíferos y luego se hace un recuento de los estudios científicos realizados en sitios específicos, particularmente en las minas más conocidas, los cuales comprenden el conocimiento de los valores de  $\delta^{34}\text{S}$ , estudios de inclusiones fluidas, valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$ , y los estudios de elementos mayores y menores. Más adelante, se presenta el estado del conocimiento respecto a las dataciones isotópicas realizadas. En los capítulos siguientes se exponen los modelos propuestos sobre la génesis de los yacimientos de esmeraldas y los controles y guías de exploración, controles tales como litológicos, estratigráficos y estructurales y guías de exploración importantes como la alteración hidrotermal y los indicadores geoquímicos. Posteriormente, se recogen todas las recomendaciones que autores de trabajos anteriores han hecho en torno a las áreas que tendrían un interés para seguir con una exploración más detallada. Finalmente, se resumen las conclusiones y recomendaciones más importantes presentadas en todos los artículos y publicaciones que fueron analizadas.

Este documento es un producto del Proyecto “Exploración y Evaluación de los Recursos Minerales” dirigido por Rosalba Salinas, Subdirección de Recursos del Subsuelo, del INGEOMINAS. Los autores y el INGEOMINAS agradecen, de manera muy especial, la colaboración del Profesor Alain Cheilletz del *Institut National Polytechnique de Lorraine*, Francia, por la revisión, corrección y presentación de este documento. Jaime Romero hizo varias apreciaciones sobre la geología estructural regional. Marta Velásquez y Carmen Castiblanco realizaron la digitalización de los documentos. Ignacio Patrón colaboró con las figuras. Los autores agradecen a las bibliotecas de MINERCOL, Universidad Nacional, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Universidad Industrial de Santander e INGEOMINAS por el apoyo presentado con toda la información publicada y no publicada disponible.

## 1. RECUESTO HISTÓRICO

Scheibe (1916) presenta un informe sobre la mina de esmeraldas de Muzo y describe los conjuntos litológicos denominados capas buenas o esmeraldíferas, el “cambiado” (estratos negros), capas con otrelita, capas con feldespatos, vetas con albita, roca albítica, vetas de calcita y de dolomita en el “cambiado”, la “cama” (capa con grandes cristales de calcita, muchas veces, con maclas, que incluyen cristales de roca), el “cenicero gris” (brechas con talco o barita), “cenicero rojo” (compuesto por dolomita, albita, pirita, y menos calcita y cuarzo). Presenta ideas sobre el origen magmático de la mineralización de esmeraldas sobre la base de la presencia de diques pegmatíticos aunque admite la inexistencia en afloramiento, hasta el momento, de rocas graníticas del Cretáceo Inferior.

Scheibe (1922, 1933) hace una descripción a la ocurrencia de esmeraldas en Nemocón, nombra, de manera general, los tipos de rocas asociados y da una opinión sobre la pobre importancia económica de la zona.

Bernauer (1922) hace un estudio de las maclas múltiples de esmeraldas de Muzo y sus anomalías ópticas.

María (1947) presenta algunos apuntes sobre la química y distribución general de las esmeraldas colombianas.

Oppenheim (1948) hace una descripción general de la Zona de Muzo que incluye la litología regional y la geología local de Muzo donde hace referencia a las zonas de “cambiado”, “*emerald beds*”, “cama” y “cenicero”, la asociación mineralógica que acompaña a las esmeraldas (calcita, dolomita, parisita, pirita y cuarzo, muy raramente barita, fluorita y apatito) y presenta una localización de las principales minas de la zona y sus métodos de explotación.

Barriga (1953) presenta las medidas del paralelepípedo elemental de la esmeralda de Muzo y muestra la forma de la red espacial que forman los átomos en este cristal.

Wokittel & López (1953) realizan estudios mineros y geológicos generales de la región del Guavio y de los Farallones de Medina describiendo ocurrencias y explotaciones de plomo y cobre asociados a calizas, yeso y azufre nativo asociado a pizarras, calizas y travertinos, hierro como limonita y siderita, carbón, sal, baritina, oro, esmeraldas, guano de poco valor, cuarzo cristal de roca en drusas, tierra diatomáceas, areniscas como roca ornamental y arenas para material de construcción y aguas termales.

Wokittel y Mutis (1954) reportan los trabajos de topografía y geología realizados en zonas de los municipios de Gachalá, Ubalá, Almeida, Macanal y Somondoco (24000 Ha) donde se expone la localización y forma de explotación de las minas activas y abandonadas y se presentan algunas recomendaciones de carácter fiscal sobre las explotaciones. El informe geológico presenta aspectos de la geología regional, en el cual llama la atención la opinión sobre la imposibilidad de que las rocas ígneas localizadas al sur de la región hayan sido las fuentes de las mineralizaciones de esmeraldas pues observa que no hay aureola de contacto en los sedimentos que las sobreyacen. En el resumen de este trabajo se recomienda estimular las iniciativas privadas con condiciones adecuadas y el mejoramiento de la estructura vial para poder transportar la maquinaria necesaria para salir de la explotación rudimentaria que existe.

Bürgl (1955, 1959) realiza un trabajo para establecer bases paleontológicas, estratigráficas y tectónicas del yacimiento de Muzo con el objeto de establecer la distribución de las vetas y la extensión de la explotación. El autor indica que el único camino seguro para establecer la sucesión estratigráfica y definir el aspecto estructural de esta región son los fósiles contenidos en las capas. Establece las unidades cronoestructurales mineralizadas y describe, de manera general, las principales estructuras geológicas como son, Sinclinal y Anticlinal de Itoco y las fallas del río Minero y río Itoco. Las capas esmeraldíferas de Muzo estarían situadas en el eje del Anticlinal de Itoco. Presenta, también, algunos argumentos que podrían establecer un origen magmático para la mineralización de esmeraldas, teniendo en cuenta las intrusiones básicas de la región.

Hubach (1956) presenta algunas consideraciones sobre las condiciones geológicas de los “esquistos arcillosos piríticos” y las mineralizaciones de esmeraldas. Presenta algunas consideraciones sobre el origen magmático de las esmeraldas basadas en su presencia en la unidad geológica (la cuenca infracretácea de Muzo) desde la región al oeste de Muzo en dirección sur hasta la región de La Palma. Estas rocas son ácidas (granodiorita) hasta ultrabásicas que intruyeron los sedimentos cretácicos. En la zona esmeraldífera la roca intrusiva podría yacer en la profundidad del Anticlinal de Itoco.

Wokittel (1957) hace una relación de los principales minerales explotados y potenciales en el territorio Vásquez, en donde se encuentra el depósito de Muzo, entre ellos, esmeraldas, salinas, carbón, guano, plomo, cobre y petróleo.

Restrepo (1958, 1959) hace un reconocimiento de las minas de esmeraldas de Muzo y hace una descripción litológica y estructural. Se refiere a las rocas mineralizadas como “arcillas negras piríticas y recomienda un estudio estructural encaminado a la prospección de esmeraldas. Plantea la posibilidad de origen para las esmeraldas con posible conexión a pegmatitas a profundidad o a fenómenos de anatexis.

Bürgl & Nicholls (1959) exponen que las capas esmeraldíferas de Muzo no son de edad albiana sino de edad barremiana. Además, hacen varias recomendaciones para aumentar el conocimiento de las mineralizaciones de esmeraldas utilizando levantamientos geológicos y topográficos, y estudios magnetométricos (con base en un origen magmático de las esmeraldas).

Mutis (1959) hace un recuento de los trabajos de exploración en Buenavista (Santa Rosa – Ubalá). Estos trabajos se limitan a la apertura de trincheras y búsqueda de esmeraldas.

Pratt *et al.* (1961) presentan, para la Sociedad Colombiana de Geólogos y Geofísicos, una recopilación de la información sobre la mina de esmeralda de Muzo, y Gilles (1966), sobre la mina de esmeralda de Chivor.

Medina (1970) hace un análisis de ciertos problemas relativos a la génesis de los depósitos esmeraldíferos de los alrededores de Muzo y propone, por primera vez, un origen autóctono para explicar la génesis de esmeraldas. Concluye que todos los elementos necesarios para la formación de esmeraldas están originalmente en las lutitas negras, y que mediante soluciones descendentes (hidrotermales de origen no-magmático) que condujeron a la lixiviación de los elementos de las pizarras carbonosas, finalmente, formaron las esmeraldas.

McLaughlin & Arce (1971) determinan que los estratos que contienen las esmeraldas de Chivor y Gachalá son aproximadamente correlacionables con la secuencia del Berriasiano-Valanginiano.

Beus & Mineev (1972) analizan la distribución geoquímica de los elementos en la zona tectónica e indican fuerte lixiviación de K, V, Th, U, Y, Mo, Sn, Pb, Zn, Cs, Cr, REE (Elementos de las Tierras Raras) y concentración por alteración metasomática de Na, Mn, Mg, CO<sub>2</sub> y S en lutitas negras y venas, comparados con zonas estériles, y la presencia de berilio proveniente de las soluciones profundas. Los autores proponen la relación K/Na en sedimentos activos de corriente como guía para futuras prospecciones de zonas esmeraldíferas en la Cordillera Oriental.

El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – PNUD (1975a, b) en asocio con el INGEOMINAS realiza un estudio geológico, estructural y geoquímico en las áreas de Muzo - Coscuez, Gachalá y alrededores de Pacho – La Palma (Cundinamarca). En Muzo - Coscuez determinaron una secuencia estratigráfica compuesta de lutitas negras y calizas correlacionables con la Formación Villeta. El estudio geoquímico propone varios indicadores de mineralización.

Hall (1976) realiza un estudio geoquímico y mineralógico y determina seis etapas de formación de minerales de las vetas de Muzo, e identifican el estadio G-III-A como portador de las soluciones generadoras de la esmeralda. Hace un análisis crítico de las diferentes concepciones genéticas propuestas hasta este momento y concluye que las vetas esmeraldíferas tienen más afinidad con procesos postmagmáticos neumatolíticos e hidrotermales.

Ulloa & Rodríguez (1979) realiza un estudio estratigráfico de la zona esmeraldífera del Territorio Vásquez – Yacopí y describe una secuencia litológica que corresponde a la parte media a superior de la Formación Paja, en la zona de Muzo – Coscuez.

Escobar (1979) hace un estudio geológico y geoquímico en la región de Gachalá y concluye que las mineralizaciones de esmeralda están controladas por fallas en lutitas negras y producidas por un metasomatismo sódico originado por aguas meteóricas y/o connatas rela-

cionadas directamente con evaporitas. Propone una fórmula geoquímica para la exploración regional y local.

Forero (1987) realiza una síntesis sobre las esmeraldas en Colombia que incluye usos, ambiente geológico de formación, situación económica mundial y las esmeraldas en Colombia con referencia a los depósitos, exploración y explotación, reservas, producción, exportaciones, perspectivas en el mercado internacional y situación de la minería, además de una extensa bibliografía.

Schwarz (1987) considera las esmeraldas de Colombia como un producto de soluciones hidrotermales producidas con temperaturas bajas y ricas en CO<sub>2</sub>, S, Na, Ca y Mg. Establece una alteración metasomática con temperaturas hasta de 400°C, con albitización durante la carbonatación en un proceso de metamorfismo regional.

En 1988 se inició un intercambio científico entre las instituciones científicas francesas *Centre National de la Recherche Scientifique – CNRS*, *Institut National Polytechnique de Lorraine – INPL* y el Instituto para la Investigación Científica – *ORSTOM*, ahora, *IRD*, lideradas por el Profesor Alain Cheilletz, y MINERALCO (luego MINERCOL, hoy integrado al INGEOMINAS) de Colombia. Este intercambio permitió la participación de instituciones europeas en la investigación científica de las principales minas de esmeraldas de Colombia (Financiación de ECOTECH – CNRS # ARC 215 y E.C DG XII # CT 94-0098) (Cheilletz, 1998; Cheilletz *et al.* 1991, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1999; Cheilletz & Royant, 2001; Giuliani *et al.* 1990, 1991, 1992, 1993, 1995, 1998, 1999, 2000; Arhan, 1993, Banks *et al.*, 1995, 2000; Branquet *et al.*, 1999a,b,c,d, 2002; Sabot *et al.*, 2000).

Pupo & Rodríguez (1989) realizan un estudio geológico en el sector de Coscuez y establecen direcciones para las vetas en varias mineralizaciones. Asocian la mineralización esmeraldífera con calcita, cuarzo, fluorita, caolinita, pirita, albita, parisita y codazzita.

Simultáneamente, Giuliani *et al.* (1990a,c,d, 1991, 1992a,b, 1995a,b), Cheilletz *et al.* (1994), Cheilletz & Giuliani (1996) y Ottaway (1991), Ottaway *et al.* (1994) plantean un modelo hidrotermal – sedimentario para la formación de las esmeraldas de Colombia.

Profesionales Asociados (1996), en un estudio realizado para MINERALCO, realiza la exploración y evaluación de áreas potencialmente esmeraldíferas en el Cinturón oriental, área de Páez (220 km<sup>2</sup>), y el Cinturón occidental, área de Florián (120 km<sup>2</sup>). La exploración en se realizó mediante geología, geoquímica y geofísica. Con base en el estudio fotogeológico y el análisis estructural se inició la investigación regional, obteniéndose un mapa fotogeológico de cada área, a escala 1:25.000, y con el reconocimiento de campo se identificaron y delimitaron las unidades geológicas estructurales, potencialmente esmeraldíferas.

Castañeda (1996) realiza un estudio para MINERALCO en la región de Yacopí con resultados de cartografía geológica, estratigrafía, geología estructural, mineralogía, geoquímica y geofísica. El área de trabajo corresponde al sector de la quebrada La Mina y el Fraile ubicada en las veredas Chirripay y la Mina, cartografía hecha a escala 1:1.000 y 1:2.000.

La Universidad Nacional, la Universidad Industrial de Santander y la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia han desarrollado varios proyectos de tesis de pregrado con el tema de la prospección regional de esmeraldas en los cuales se ha tenido en cuenta la estratigrafía, geología estructural, geoquímica y en los últimos años varios trabajos sobre geofísica.

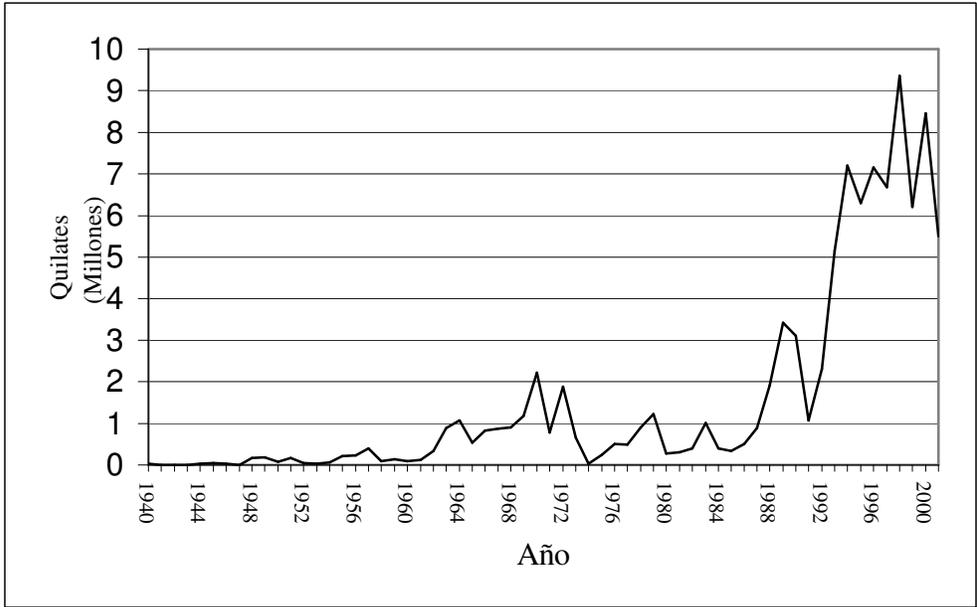
## 2. MARCO ECONÓMICO

### 2.1 PRODUCCIÓN Y COMERCIO EXTERIOR

La oferta y demanda de esmeraldas es una actividad libre y legalizada en el país, desarrollada totalmente en Bogotá y de ella dependen aproximadamente 100.000 personas entre , propietarios de minas, mineros, comerciantes, talladores, comisionistas, joyeros y personas en laboratorios de gemología y tratamiento, casas comercializadoras y exportadores.

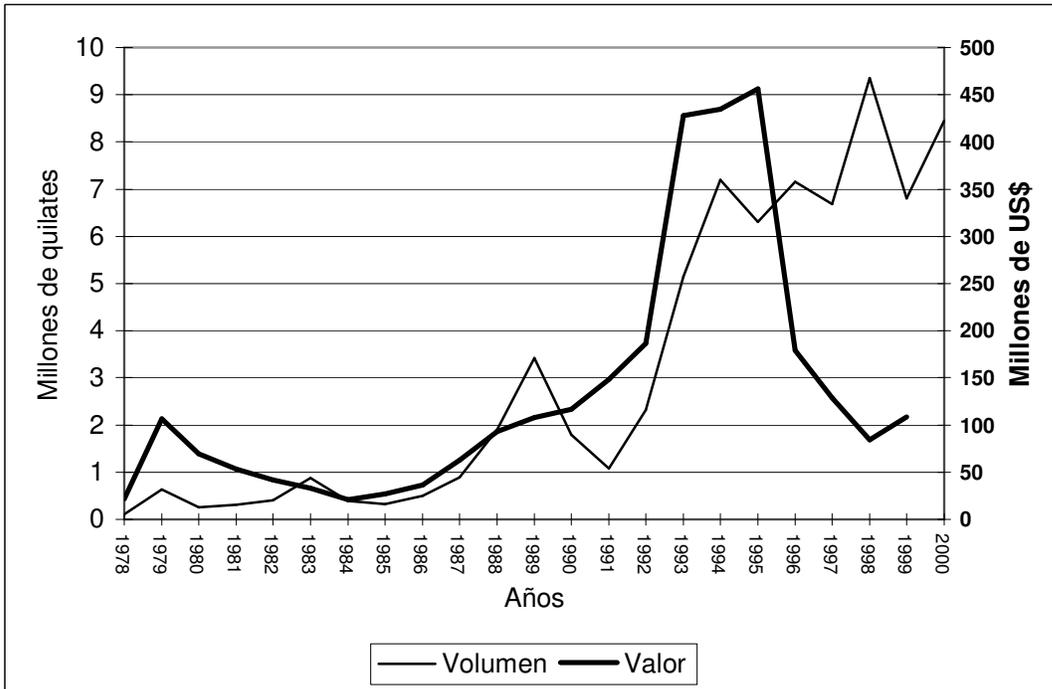
Colombia presenta una de las mayores producciones de esmeraldas en el mundo y una de las máspreciadas por su gran calidad. La figura 1 muestra la situación de la producción que ha venido en aumento. La figura 2 muestra la dinámica de la cantidad y el valor de las exportaciones de esmeraldas colombianas (<http://www.upme.gov.co>). En 2000 el principal país comprador de esmeraldas colombianas fue Estados Unidos de América con 3.620.148 quilates (43%), seguido de Hong Kong con 1.559.633 quilates (18%), India con 1.442.815 quilates (17%) y otros (Fig. 3). El precio para la comercialización internacional se denomina primario para gemas en bruto y secundario para gemas talladas y engastadas. El precio primario para esmeraldas no pulidas colombianas ha variado entre US\$ 0,28 y 0,40 por quilate en los años 1998 – 1999, mientras que en el mismo período las piedras engastadas han variado según los datos oficiales de exportación entre US\$ 53 y US\$ 63 y las piedras talladas, US\$ 118 y US\$ 151 (UPME, 2000).

Las proyecciones muestran una tendencia a la baja de los precios. La ventaja de Colombia al poseer una de las variedades de esmeraldas de más alta calidad y ser uno de los mayores exportadores del mundo, le otorga una excelente posición en el mercado. Sin embargo, el hecho de no poseer, actualmente, una industria fuerte en la talla y engaste hace que las ganancias mayores queden fuera del país a través de compañías internacionales especializadas en estos procesos (UPME, 2000).



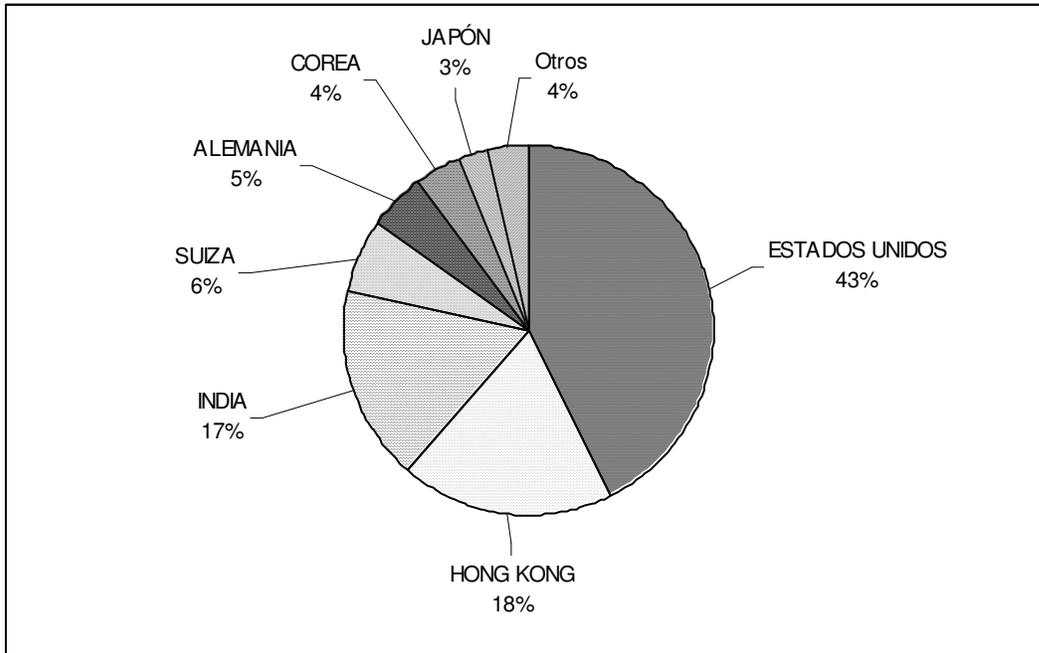
**Figura 1. Producción de esmeraldas en Colombia**

Fuente: UPME, Colombia.



**Figura 2. Comercio exterior – exportaciones de esmeraldas en el período 1978 – 2000.**

Fuente: UPME, Colombia.



**Figura 3. Destino de las exportaciones de esmeraldas en 2000.**

Fuente: UPME, Colombia.

## 2.2 SITUACIÓN DE LA MINERÍA Y PERSPECTIVAS

De manera más específica, la situación actual de la minería de la esmeralda en Colombia es la siguiente (COINVERTIR, 1996):

- Uno de los problemas técnicos en el desarrollo de las actividades de explotación es la falta de control topográfico de estos trabajos.
- Cuando se utiliza sostenimiento de túneles se hace con madera sin los procedimientos técnicos necesarios.
- El transporte en las minas se realiza en vagonetas de rueda de neumáticos y carretilla accionada por tracción humana hasta descargarla en bocamina.
- La ventilación es insuficiente presentándose problemas como la existencia, únicamente, de una sola entrada a la zona de trabajo, por lo tanto los mineros se ven obligados a acondicionar una ventilación auxiliar que, de todas maneras, no se implementa con las técnicas necesarias que garanticen el caudal requerido.
- El desagüe se realiza por gravedad trayendo consigo el problema de deterioro de las vías por la falta de cunetas.
- Se emplea electricidad con cables e interruptores comunes que ofrecen serios peligros.
- Las empresas no cuentan con aparatos de detección de gases ni elementos de seguridad, presentándose altos riesgos por la concentración de gases venenosos y tóxicos.
- En el avance de las vías, el esquema de perforación utilizado no es el correcto, por lo cual no se logra el rendimiento óptimo para la cantidad de explosivo que se utiliza y en zonas mineralizadas el uso no racionalizado de explosivos e incorrecto franqueo ocasiona daños a la piedra preciosa.

- No existe un estudio sobre índices de producción, de seguridad, de condiciones socioeconómicas, de costos y de rentabilidad que permita elaborar un modelo que ayude a dar soluciones a los problemas generados por estos aspectos.

COINVERTIR (1996) expone los problemas principales y las necesidades apremiantes de la industria de las esmeraldas en Colombia:

- Exploración geológica insuficiente
- Agotamiento de reservas
- Incipiente aplicación de tecnología en exploración y explotación
- Deficiencia de seguridad industrial
- Alto impacto ambiental
- Alta explotación informal
- Deficiente tecnología en la industrialización
- Comercialización irregular y desorganizada

Las principales necesidades de la industria son:

- Comercialización irregular y desorganizada
- Inversión extranjera.
- Sustitución de minería a cielo abierto por minería subterránea.
- Planes de recuperación morfoecológico.
- Mitigación de impacto ambiental.
- Establecimiento de organizaciones sociales para el manejo de la minería informal.
- Capacitación en etapas de industrialización de la esmeralda, como gemología, corte y talla, engaste y diseño de joyas.

## **2.3 EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN**

La actividad exploratoria para hallar nuevos yacimientos de esmeraldas en Colombia ha sido mínima. Todos los esfuerzos se han encaminado al estudio de los depósitos precolombinos y aquellos accidentalmente descubiertos por campesinos, con el fin de reconocer o identificar guías geológicas que permitan establecer una metodología para la prospección de esmeraldas (UPME, 2000). Para mejorar esta situación, en 1988 se inició un intercambio científico con instituciones francesas y MINERALCO de Colombia, intercambio basado en la participación de las instituciones europeas en la investigación geológica de los yacimientos conocidos. Algunas conclusiones de este trabajo han sido implementadas como guías de exploración por algunos mineros como en el caso del Sector de La Pita.

Las labores de explotación a tajo abierto y subterránea se ejecutan paralelamente con una exploración visual en áreas reconocidas como productoras de esmeraldas, siguiendo la orientación de mineros experimentados. La explotación – exploración a tajo abierto se hace con ayuda de tractores sobre orugas y monitores hidráulicos, a fin de mantener los frentes de trabajo limpios de estériles y visualizar las posibles zonas o vetas productoras. En los últimos años, se han implementado técnicas de minería subterránea permitiendo una mayor cobertura en la exploración y explotación.

Las labores actuales de exploración y explotación subterránea, además de tener un escaso ordenamiento minero, no ofrecen las garantías exigidas por la correcta operación del personal que en ellas trabaja, presentándose, con cierta frecuencia, accidentes que en el peor de los casos han causado pérdida de vidas humanas, debido a la falta de un adecuado manejo técnico de factores de vital importancia como la ventilación, el sostenimiento, electricidad y el uso de explosivos que junto con otros, también influyen en una menor producción de lo que se podría obtener laborando técnicamente.

## **2.4 TALLA Y GEMOLOGÍA**

En Colombia, parte del material esmeraldífero es tallado en Bogotá, donde se concentra la totalidad de los talleres de importancia. Previo el corte, los expertos examinan las piedras para observar el color, el brillo y la diafanidad, con el fin de determinar los volúmenes a aprovechar. Después del corte inicial el material es pulido, clasificado y, de acuerdo con las características que contribuyan a realzar su calidad y peso, se define la geometría de la talla. A pesar de la tradición, sólo existe una minoría de buenos talladores en Colombia. La práctica más generalizada que incide en la mala calidad de la talla se relaciona con el afán por lograr el peso máximo en las piedras. Por ello gran parte del material exportado es retallado en el exterior, especialmente en Alemania, USA, Reino Unido, Hong Kong e Italia para corregir defectos y aumentar la calidad (MINERCOL, 1996, 1997)

### 3. MARCO GEOLÓGICO ESTRUCTURAL

#### 3.1 GEOLOGÍA REGIONAL

El marco geológico de la zona andina está muy relacionado al desarrollo de una serie de lineamientos tectónicos de carácter regional aproximadamente paralelos y con dirección norte-sur, que marcan un cambio brusco en el estilo estructural de las diferentes unidades litostratigráficas que separan. Su potencial en recursos minerales está ligado, dentro del marco geológico complejo y variado, a los diferentes eventos magmáticos y épocas metalogénicas que tuvieron lugar en el Bloque Norandino (constituido por Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela), desde el Paleozoico al Cenozoico y que son las responsables de los numerosos tipos de depósitos minerales que se encuentran distribuidos en franjas a lo largo de las zonas montañosas que caracterizan al Sistema Andino.

En Colombia este sistema está representado por tres cordilleras, siendo la Cordillera Oriental el lugar donde se encuentran las zonas esmeraldíferas. Esta cordillera nace en el Macizo Colombiano y está limitada al occidente por el valle del Río Magdalena, al oriente por la Amazonía, la Orinoquía y la cuenca del Lago de Maracaibo, al NNE termina en la falla de Oca (Península de la Guajira). Eventos geotectónicos han dado origen a la bifurcación de la cordillera en el nudo de Santurbán, en la Serranía de Perijá y en la cordillera de Mérida en territorio venezolano. Por sus características geográficas, geológicas y estructurales, la cordillera ha sido dividida en las siguientes subregiones de norte a sur: Serranía de Perijá, cuenca del Catatumbo, Macizo de Santander-Floresta, Cuenca de Cundinamarca-Boyacá, Macizo de Quetame, Serranía de la Macarena, Macizo de Garzón y Cuenca del Putumayo.

La Cuenca de Cundinamarca – Boyacá, que corresponde a la parte central de la Cordillera Oriental, está constituida principalmente por un basamento precámbrico, representado por rocas metamórficas y graníticas, cubiertas por metasedimentos y sedimentitas del Paleozoico (limolitas, lutitas e intercalaciones de calizas, conglomerados, areniscas cuarzosas, lodolitas calcáreas, calizas y limolitas), los cuales a su vez infrayacen capas rojas y vulcanitas del Triásico-Jurásico (secuencias de lavas y piroclastitas, además de areniscas de grano fino a conglomeráticas, limolitas rojas y margas). Las rocas de edad cretácica están ampliamente distribuidas en la cordillera y están constituidas por secuencias marinas y transicionales (areniscas, conglomerados, calizas, lutitas, lodolitas limosas, horizontes de carbón e importantes niveles de fosforitas). La sedimentación del Paleógeno y el Neógeno se caracteriza por acumulaciones de clásticos gruesos, particularmente, conglomerados, areniscas y horizontes de lutitas. El Magmatismo del Jurásico al Cenozoico, de composición ácida a intermedia, ha afectado la mayor parte de las rocas mencionadas anteriormente, encontrándose estrechamente relacionado con muchas de las mineralizaciones metálicas hipogénicas que se conocen en la región.

En la Cordillera Oriental los eventos metalogénicos responsables de las mineralizaciones epigenéticas que se presentan en esta zona, son de afinidad magmática y sedimentogénica, los cuales tuvieron lugar aparentemente entre el Cretáceo y el Neógeno. Las esmeraldas colombianas solo se han encontrado en la Cordillera Oriental, dentro de la cuenca de Cundinamarca-Boyacá, asociadas a sedimentitas del cretácico inferior que hacen parte del Supraterrano cretácico (Etayo *et al.*, 1983).

En el contexto regional las esmeraldas se encuentran en dos cinturones esmeraldíferos localizados en lados opuestos de la Cordillera Oriental (Fig. 4). Los depósitos de esmeraldas en Colombia pueden considerarse como tipo estratoconfinado, debido a que a escala regional están localizados en formaciones sedimentarias específicas del Cretáceo Inferior (Fig. 5), asociados a lutitas (shales) negras carbonosas. Las unidades litológicas que están relacionadas con la mineralización esmeraldífera en ambos cinturones son las siguientes:

### 3.1.1 Cinturón Oriental

El Cinturón Oriental está conformado por el Grupo Cáqueza el cual presenta tres formaciones, que en orden ascendente corresponden a: Calizas del Guavio, Lutitas de Macanal y Areniscas de Las Juntas (Ulloa y Rodríguez, 1979).

**Formación Calizas del Guavio**, de edad Jurásico superior – Berriasiano superior (Ulloa y Rodríguez, 1979), está representado de base a techo por los siguientes miembros:

- Miembro Conglomerado de Miralindo con un espesor que varía entre 50 m y 500 m (conglomerados de matriz arenosa, con cantos de arenitas, cuarcitas y filitas)
- Miembro Lutitas de Miralindo, con un espesor entre 30 y 80 metros (lodolitas negras).
- Miembro Caliza de Malacara con un espesor de 400 metros (calizas grises macizas y limolitas de color gris oscuro a negro con lentejones de calizas);
- Miembro Lutitas de Las Mercedes con un espesor que varía entre 40 m y 250 m (lodolitas y limolitas negras fosilíferas, con lentejones de calizas).
- Miembro Caliza de Las Mercedes con 120 metros de espesor (calizas micríticas de color gris oscuro con intercalaciones de arenitas cuarzosas de grano medio y de color negro).

**Formación Lutitas de Macanal**, de edad Berriasiano (?) - Valanginiano (Ulloa y Rodríguez, 1979), con un espesor aproximado de 2900 metros, está representada por lodolitas negras micáceas, compactas, ligeramente calcáreas, con láminas de yeso y localmente fosilíferas; en la parte intermedia contiene intercalaciones de estratos gruesos de arenitas cuarzosas de grano fino y de color gris oscuro.

**Formación Areniscas de Las Juntas** con un espesor aproximado de 900 metros. Hasta el momento esta formación no ha sido reportada como esmeraldífera.

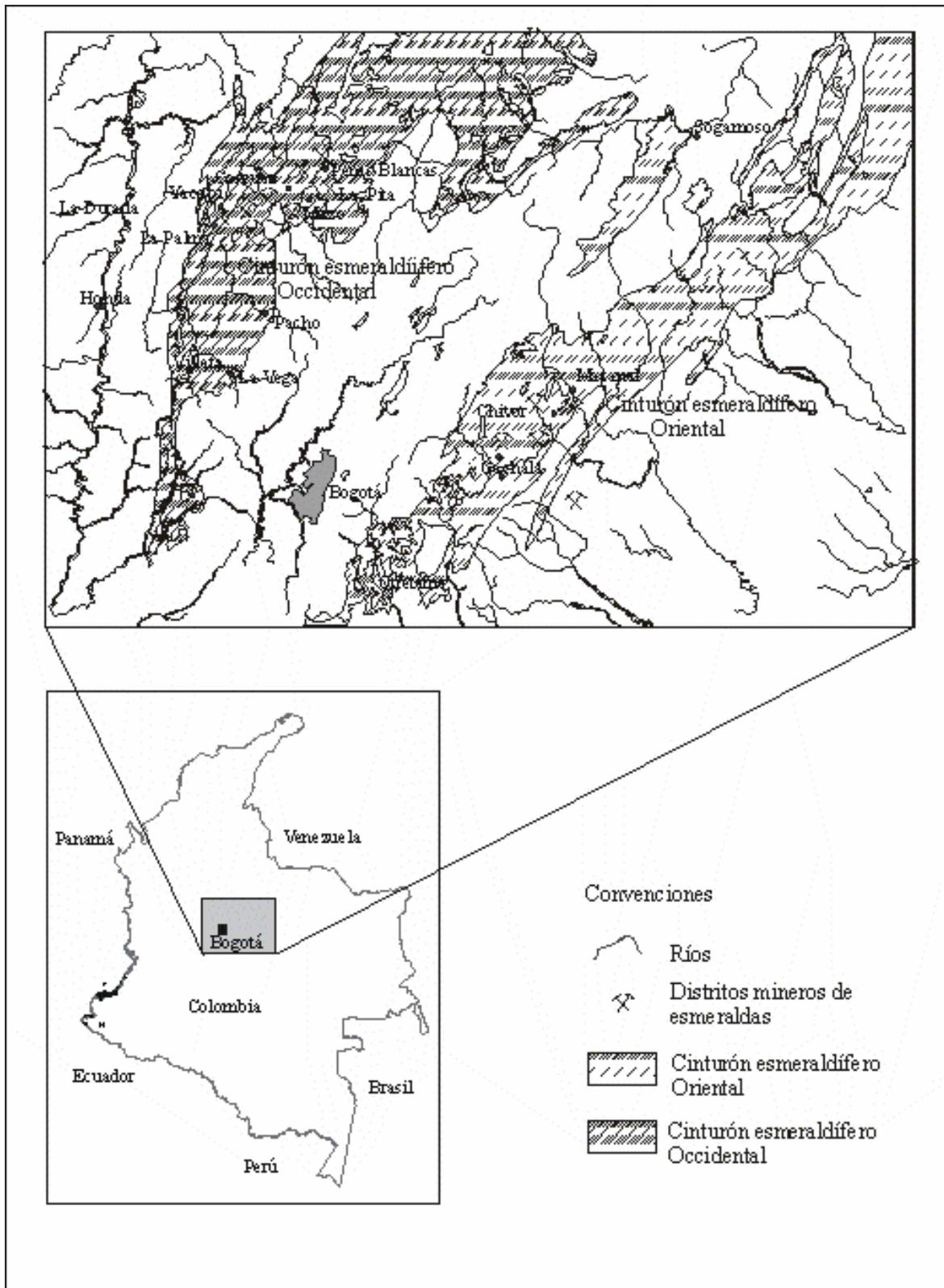


Figura 4. Localización de los dos cinturones esmeraldíferos en Colombia

Período	Época	Cinturón Esmeraldífero Occidental	Cinturón Esmeraldífero Oriental
Cretácico Superior	Cenomaniano	Formación Chipaque Formación Une	Areniscas de Las Juntas Lutitas de Macanal Calizas del Guavio Grupo Cáqueza
Cretácico Inferior	Albiano	Formación Fômeque	
	Aptiano		
	Barremiano		
	Hauteriviano	Formación Paja	
	Valanginiano	Formación Rosablanca	
	Berriasiano		
Titoniano			

Figura 5. Correlación de las unidades litoestratigráficas en los Cinturones esmeraldíferos Occidental y Oriental (Tomado de Forero, 1987)

### 3.1.2 Cinturón Occidental

En el Cinturón Occidental, las unidades litológicas de mayor importancia son:

**Formación Rosa Blanca** de edad Hauteriviano-Barremiano (Wheeler, inédito, según Morales y otros, 1958), con un espesor muy variable entre unos pocos metros y 400 metros, aproximadamente. Predominantemente, son calizas de color gris oscuro; la parte inferior presenta dolomitas y *grainstones* de oolitos, ostrácodos e intraclastos; la parte intermedia son micritas y biomicritas y la parte superior presenta arenitas mixtas y lodolitas calcáreas con interestratificaciones de shales calcáreos negros.

**Formación Paja**, de edad Hauteriviano-Barremiano-Aptiano (Wheeler, inédito, según Morales y otros, 1958) o Hauteriviano-Barremiano (Forero, 1987), depositada en un ambiente marino somero durante el Cretácico inferior, con un espesor que varía entre 100 y 600 metros, aproximadamente, compuesta por shales arcillosos a limosos, de color negros, micáceos, ligeramente calcáreos y delgadamente laminados, con láminas y venillas delgadas de yeso; la parte inferior contiene concreciones calcáreas, nódulos septáreos y venas de calcita).

**Grupo Villeta** de edad Barremiano - Coniaciano (Hettner, 1982), con un espesor de 7.500 metros que suprayace al Grupo Cáqueza e infrayace al Grupo Guadalupe. De base a tope esta constituida por las siguientes unidades estratigráficas:

- **Formación Fόμεque** compuesta por shales de color gris oscuro con algunas interestratificaciones de calizas y arenitas.
- **Formación Une** compuesta por arenitas con delgadas capas de shales negros.
- **Formación Chipaque** compuesta por shales con algunos estratos de arenitas y calizas. La mineralización está contenida en brechas hidrotermales, venas de espesor de varios centímetros y cavidades rellenas con calcita, dolomita y pirita.

## 3.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La región esmeraldífera se encuentra en la parte central de la Cordillera Oriental, la cual se considera una cuenca sedimentaria de retro-arco del Triásico al Cretácico tardío, invertida en el Cenozoico. Esta cuenca corresponde a un conjunto rocoso plegado que cabalga sobre la cuenca de los Llanos en el oriente y sobre la cuenca del Magdalena, al occidente (Fabre, 1987; Cooper *et al.*, 1995; Branquet *et al.*, 1999b).

El principal levantamiento de la cordillera se atribuye a la gran inversión del Mioceno Medio (Laumonier *et al.*, 1996), reflejada mediante desarrollo de cabalgamientos, pliegues rampa y fallas inversas orientadas paralelamente a la cadena y asociadas a un despegue profundo; también se reconocen deformaciones del Paleógeno en la cuenca del Magdalena y en la cadena del borde llanero (Laumonier *et al.*, 1996; Branquet *et al.*, 1999b)

Los dos cinturones esmeraldíferos presentan una litología compuesta por lutitas negras del Cretáceo Inferior, rocas que afloran en zonas de doblamiento (zonas de bisagra) de amplios anticlinorios.

Separados por 80 a 100 km, los dos cinturones esmeraldíferos muestran similitud muy marcadas en su geoquímica, estratigrafía y estructural. A escala regional, se distinguen las siguientes regiones morfoestructurales de occidente a oriente: Semifosa del Valle del Magdalena, Sinclinorio de Guaduas, Anticlinorio de Villeta, Sinclinorio de la Sabana de Bogotá, Anticlinorio de Los Farallones, Sinclinorio de Nazareth y la Planicie de los Llanos Orientales. Las estructuras principales son pliegues con direcciones NNE-SSW en general, la misma dirección de la cordillera.

### 3.2.1 Cinturón Oriental

La zona esmeraldífera del cinturón oriental, se localiza en la parte noroccidental del Anticlinorio de los Farallones. Las principales minas ocurren en las Calizas del Guavio (Distrito de Gachalá) y en las lutitas y calizas del tope del Guavio, Distrito de Chivor (Branquet, 1999; Branquet *et al.*, 1999b).

La tectónica de esta parte de la Cordillera está dominada por fallas inversas de ángulo alto con rumbo NE y buzamiento hacia el oeste. Probablemente estas fallas se originaron como fallas normales durante orogenias prejurásicas y limitaron una serie de bloques paleozoicos; este tectonismo premesozoico determinó que la discordancia del Paleozoico – Mesozoico observada en la región muestre ángulos muy variables de 0 a 90° y que se presenten

cuñas de conglomerados interrumpidas por las fallas (Escovar, 1975, 1979; Ulloa, 1979, 1980; Branquet *et al.*, 2002).

En el cinturón oriental la mineralización de esmeraldas está controlada tectónicamente. Los sitios productivos se localizan en la zona de falla, en brechas o en fracturas y venas a menos de 200 m de las fallas y probablemente conectadas a ellas; característica que se puede extender a todo este cinturón (Escovar, 1975, 1979).

Nuevos análisis estructurales de los depósitos de esmeraldas y ocurrencias de la zona oriental (Arhan, 1993; Branquet, 1999; Cheilletz *et al.*, 1997; Branquet *et al.*, 1999b) indican que la mineralización de esmeraldas ocurrió en el límite del Cretácico – Paleógeno durante un evento tectónico extensional tipo escama ligado a una disolución de evaporitas. Esto condujo a la formación de un nivel brechoso estratiforme mineralizado. Las albitas blancas constituyen los respaldos superior e inferior de los niveles brechosos estratiformes. En el depósito de Chivor, diferentes tipos de estructuras mineralizadas están ramificadas desde el nivel brechoso: (i) fallas lístricas, (ii) fracturas distensivas inyectadas con brechas hidrotermales y (iii) grupo de fracturas extensionales con dirección NE -SW que cortan perpendicularmente las albitas. La fase tectónica transpresional que corresponde al episodio Mioceno Medio de la Cordillera Andina provoca la fracturación de los depósitos de esmeralda por medio de fallas normales, inversas y zonas de cizalla.

### **3.2.2 Cinturón Occidental**

En el Cinturón Occidental se ha determinado que los depósitos yacen en la cresta del anticlinorio de Villeta con buzamiento axial hacia el SSW el cual está atravesado por tres sistemas de fallas que lo separan en bloques, cada uno de los cuales ha sido desplazado hacia el NE; el anticlinorio cabecea inmediatamente al sur de la mina de Muzo. Las mineralizaciones de esmeralda aparentemente están relacionadas con fallas de dirección, en general, NNE y NW (Ulloa, 1979, 1980).

Igualmente, cada depósito en particular está controlado por un fallamiento local. En Muzo, las principales excavaciones están cruzadas por varias fallas de desplazamiento pequeño, con rumbo N y NE, a las cuales se asocian pliegues irregulares de mediana escala dentro de la lutita; a lo largo de estas fallas es frecuente observar zonas de brecha, algunas de ellas mineralizadas. En el depósito de Coscuez la mineralización se encuentra en una zona de lutita intensamente plegada limitada por dos fallas con rumbo Norte. La esmeralda en estos depósitos se extrae casi exclusivamente de venas de calcita blanca que cortan lutitas negras carbonosas bien estratificadas ricas en pirita, pertenecientes a la Formación Paja. Localmente se han encontrado esmeraldas dentro de venas en calizas, aunque en secuencias predominantemente arcillosas. En Peñas Blancas, las esmeraldas se presentan en venas calcáreas delgadas que cortan unas intercalaciones de lutitas negras y grises de la Formación Rosa Blanca (Ulloa, 1979, 1980).

La dirección principal del plegamiento y fallamiento regional es NE-SW, el cual corresponde con la tendencia estructural de la Cordillera Oriental, afectada por el Lineamiento de Muzo (Ujueta, 1992), con orientación NW-SE que enmarca y controla la mineralización

presente, el desplazamiento de estructuras, el levantamiento del bloque de la Formación Rosablanca y la posibilidad de alguna actividad ígnea al norte de la quebrada Caco. El principal rasgo tectónico lo constituye el anticlinal de La Chapa, enmarcado por estructuras sinclinales, afectadas a su vez por fracturas debidas a fuerzas compresivas y distensivas: sinclinales de Muzo, Santa Helena, Otanche y Coscuez. La falla del río Minero, de carácter regional, es de tipo compresional con buzamiento hacia el este. Es notorio el predominio del fallamiento sobre el plegamiento. Se presentan tres tendencias principales de fallas y fracturas: NE-SW, NW-SE y ENE-WSW a E-W, las cuales han desarrollado un modelo de bloques y subbloques. Las fallas Itoico, Minero, Pava – Pisco – Calamaco y Guazo determinan el bloque mineralizado del sector de Muzo - Quípama; las fallas Pava – Pisco – Calamaco, Tapaz, Guazo-Miocá y Caco limitan el bloque de mineralización en el sector de Coscuez (Mendoza, 1996).

## 4. MINERALIZACIÓN

Las mineralizaciones esmeraldíferas en Colombia están distribuidas en dos cinturones estrechos y alargados en dirección NE-SW, aproximadamente paralelos, localizados en la parte central de la Cordillera Oriental. Los depósitos de esmeraldas, aparentemente, son la respuesta a dos eventos de mineralización que tuvieron lugar, uno a finales del Cretácico y el otro en el límite Eoceno - Oligoceno, con características mineralógicas muy similares y estrechamente relacionados a la evolución tectónica de la Cordillera Oriental.

### 4.1 CINTURÓN ESMERALDÍFERO ORIENTAL

Este cinturón presenta altitudes entre 900 y 2000 metros sobre el nivel del mar y una orientación regional N30-40E. Los depósitos del distrito de Gachalá (minas de la Vega de San Juan, Las Cruces, El Diamante y El Toro) se ubican en el extremo sur del cinturón, aproximadamente 75 km al ENE de Bogotá. El cinturón se extiende unos 35 km hacia el NE conectando las minas de Gachalá con las del Distrito de Chivor (minas de Gualí, Chivor, Buenavista y Mundo Nuevo).

#### 4.1.1 Localización de los depósitos

Los depósitos de esmeralda del Cinturón Oriental corresponden a los distritos mineros de Chivor, Gachalá y Macanal (Fig. 4).

#### 4.1.2 Estratigrafía

Al igual que en los depósitos del Cinturón Occidental, los depósitos de esmeraldas se localizan en sedimentitas del Cretáceo inferior (Grupo Cáqueza) y además son evidentes las similitudes geológicas y estructurales entre los depósitos.

El grupo Cáqueza está constituido por tres formaciones, que en orden ascendente corresponden a: Calizas del Guavio, Lutitas de Macanal y Areniscas de Las Juntas (Ulloa y Rodríguez, 1979). La Formación Calizas del Guavio con aproximadamente 1300 m de secuencia, se ha dividido en cinco miembros, a la base conglomerados, dos conjuntos de calizas y dos de lutitas; la fauna colectada permite asignarle una edad de Titoniano a Berriasiano. La Formación Lutitas de Macanal corresponde a una secuencia monótona de lutitas negras con esporádicas intercalaciones de calizas, areniscas y lentes de yeso que en conjunto alcanzan aproximadamente 2900 m de espesor; su edad se ha determinado desde Titoniano hasta Valanginiano. La Formación Areniscas de Las Juntas corresponde a una secuencia de dos niveles arenosos separados por un nivel de lutitas; alcanza un espesor de aproximadamente 900 m y se le asigna una edad Hauteriviano.

En la región del Guavio las mineralizaciones de esmeraldas se encajan en las Calizas del Guavio, secuencia que allí está formada por capas delgadas de dolomitas negras laminadas intercaladas en bancos gruesos de calizas. La mineralización por lo general se relaciona a brechas de fallas, en las que se encuentran fragmentos de arcillolita negra y de lutitas gris-negro en una matriz mineralizada y con presencia de pirita y caolín. En las brechas, la mineralización contiene cuarzo, albita, esmeralda, pirita, material carbonoso, calcita y rombos de dolomita gris. Los minerales de vena son albita, esmeralda, pirita y cuarzo; la albita normalmente está alterada a caolín o haloisita. También se encuentra calcita, moscovita y fuchsita. Las venas de calcita sólo se observan en lutitas suprayacentes a los estratos productores de esmeralda.

El Depósito de esmeralda de Chivor está encajado en un conjunto sedimentario que corresponde a la parte alta de la Formación Guavio (Berriasiano) la cual está suprayacida por los shales de la Formación Macanal (Valanginiano) con 2900 metros de espesor (Ulloa & Rodríguez, 1976). El conjunto sedimentario que hospeda las venas contenedoras de esmeraldas y las brechas hidrotermales está compuesto por lutitas y lodolitas que están localmente albitizadas, una secuencia albitizada y carbonatada, biohermas de calizas que gradan vertical y lateralmente en lutitas negras intercaladas con lodolitas conglomeráticas calcáreas y olistostromas (Branquet *et al.*, 1999b). En Chivor la mineralización se encuentra asociada a los siguientes tres tipos de roca (Cheilletz *et al.*, 1997):

#### 4.2.2.1 Albititas estratiformes

Son rocas masivas, bandeadas de color blanco, dispuestas paralelamente a la estratificación de las lutitas negras. Las albititas representan los horizontes de lutita negra que fueron metasomatizados con crecimiento epigenético de albita, calcita, dolomita, pirita, micas y cuarzo.

#### 4.1.2.2 Brechas tectónicas hidrotermales

Son brechas poligénicas compuestas de fragmentos de lutita negra y albititas cementadas por pirita, albita, carbonatos y lutita negra pulverizada. Estas rocas yacen generalmente paralelas a la estratificación y cercanas a la albititas estratiformes; su espesor varía de 10cm a 10m. Contienen cavidades con depósitos de esmeraldas.

#### 4.1.2.3 Venas

Pueden ser agrupadas en dos fases cuya densidad se incrementa cerca de las brechas tectónicas hidrotermales. Conjuntos bien ordenados están compuestos de cortes por tensión; los conjuntos desordenados resultan de la fracturación hidráulica bajo alta presión de fluidos. Las venas de la fase 1 son estériles y están compuestas principalmente de calcita fibrosa rellenas de venas. Las venas de la fase 2 están caracterizadas por la precipitación de calcita romboédrica y dolomita, pirita, cuarzo, albita, moscovita, fluorita y esmeralda (Cheilletz *et al.*, 1997)

### **4.1.3 Geología Estructural**

De manera local, el trabajo de Profesionales Asociados (1996) presenta un esquema general de la geología estructural del área de Páez, en el Cinturón oriental. La tendencia estructural de la zona coincide con el regional de la cordillera. Las estructuras tienen un rumbo general NE. El rasgo estructural principal es la presencia de fallas de cabalgamiento de escamación delgada de bajo ángulo con vergencia Este y pliegues superficiales por flexión y por propagación de falla. Se hizo un análisis microtectónico en las áreas Upía I, II y Mincho, donde se tomaron datos de fracturamiento en diaclasas y venas.

López y Uribe (1989) determinan en rocas del Grupo Farallones, Calizas del Guavio y Lutitas de Macanal dos sistemas de cizallamiento. En el primero, NW-SE, se destacan las fallas que controlan parte del río Guavio y las quebradas la Negra, San Juanito y La Esperanza. El segundo, NE-SW, comprende los fallamientos de mayor extensión regional, fallas El Garabato, San Fernando y La Esmeralda.

Zafra (1996) define en la región de Guavio – Chivor los pliegues locales del Sinclinal de Santa Rosa, el Anticlinal de Montecristo (a lo largo del costado oriental del área) y el Anticlinal del Diamante. Se distinguen dos direcciones principales de cizallamiento NE-SW y NW-SE. A la primera corresponden las Fallas de San Fernando, Garabato, La Esmeralda y de Manizales; Al segundo corresponde la Falla del Fríjol.

## **4.2 CINTURÓN ESMERALDÍFERO OCCIDENTAL**

Este cinturón tiene elevaciones entre 850 y 1020 metros sobre el nivel del mar y presenta una dirección N20°E. Uno de los depósitos más conocido y estudiado es el de Muzo, ubicado a 100 km al norte de Bogotá; otras dos mineralizaciones importantes son las de Coscuez y Peñas Blancas, localizadas a 12 y 20 km al norte de la mina de Muzo, respectivamente. También hacen parte de este cinturón las mineralizaciones de Quípama, Yacopí y La Pita.

### **4.2.1 Localización de los depósitos**

Los depósitos esmeraldíferos de esmeralda del cinturón occidental se encuentran en los distritos mineros de Muzo, Coscuez, Peñas Blancas, La Palma – Yacopí y La Pita (Fig. 4). En conjunto todos estos distritos presentan muchas similitudes en su marco geológico, mineralogía y paragénesis.

### **4.2.2 Estratigrafía**

La mineralización de Peñas Blancas se encuentra en la Formación Rosablanca: secuencia de bancos de caliza con intercalaciones de lutitas negras. La mineralización de Yacopí se localiza dentro de sedimentitas del Grupo Villeta: secuencia conformada por alternancia de lutitas negras carbonosas, lutitas negras silíceas, limolitas y lodolitas.

El conjunto sedimentario que contiene los depósitos esmeraldíferos de Muzo y Coscuez está compuesto por las calizas dolomíticas de la Formación Rosablanca (Valanginiano - Hau-

teriviano) y las lutitas blancas calcáreas y silíceas (Hauteriviano) que forman la base de las limolitas (Barremiano – Aptiano) de la Formación Paja (Branquet *et al.*, 1999b).

El Distrito minero de La Pita presenta una geología muy similar a los depósitos de Muzo y Coscuez, con venas de carbonatos con esmeraldas que atraviezan las rocas sedimentarias carbonáceas negras (Fritsch *et al.*, 2002)

En estudios de la secuencia estratigráfica, particularmente en la región de Muzo - Coscuez se han reconocido y descrito las siguientes unidades litológicas de base a techo (Branquet, 1995, 1999):

#### 4.2.2.1 Calizas magnesianas

Rocas de color gris con coloraciones amarillas por la alteración meteórica, con un espesor de 10 a 30 cm. El aspecto de las capas es masivo y duro. La roca tiene una matriz micrítica impregnada de óxidos de hierro por alteración de pirita. También se encuentra cristalización de calcita y albita gruesa (5 – 6%) dentro de pequeñas cavidades. Esta unidad está fracturada con venas paralelas a la estratificación rellenas de calcita y albita gruesa o por cuarzo y calcita. Medidas sobre el isótopo 13 de Carbono dan  $\delta^{13}\text{C} = +1.1\text{‰}$  y  $\delta^{18}\text{O} = +22.5\text{‰}$ , valores característicos de calizas marinas.

#### 4.2.2.2 Calizas carbonosas calcáreas

Unidad estratigráfica que recibe la mineralización de esmeralda. Se trata de lutitas compactas en capas de 5 a 10 cm de espesor, generalmente, aunque a veces presenta un espesor de 20 – 30 cm. Posee una coloración negra debido a la pigmentación por la concentración de materia orgánica. Unidad intensamente plegada con pliegues discordantes. Las lutitas carbonosas calcáreas son igualmente afectadas por muchas vetas y brechas. La mineralización de las esmeraldas se localiza en los sistemas de fracturas y brechas. El espesor de esta unidad es aproximadamente de 130 m, correspondiendo al espesor tectónico y no al sedimentario.

#### 4.2.2.3 Lutitas carbonosas silíceas

Alternancia de capas de lutitas negras silíceas de 10 – 15 cm de espesor, capas de lutitas un poco más arcillosas de 3 – 5 cm de espesor y capas de areniscas piritizadas y calcitizadas de 50 cm de espesor. La matriz de la roca es arcillosa y presenta, a veces, cristalización de micas. Se presentan, ocasionalmente, cristales prismáticos que forman rosetas de cloritoides. Esta unidad es pobre en mineralización de esmeraldas, exceptuando la presencia de algunas morrallas en vetas de calcita romboédrica.

#### 4.2.2.4 Lutitas grises silíceas

Unidad monótona de color gris con poco contenido de materia orgánica, con espesores de 5 – 30 cm, menos afectada por la deformación tectónica que las demás. No presenta mineralización de esmeralda.

Todas las rocas, excepto las lutitas grises silíceas presentan fenómenos de alteración hidrotermal. Las rocas son afectadas por un metasomatismo alcalino marcado por el desarrollo

de albita, calcita y pirita. Los fluidos que son responsables de esta alteración hidrotermal son ricos en sodio, calcio y azufre. La cristalización de la esmeralda es una consecuencia de esta alteración hidrotermal porque el metasomatismo permite la concentración del berilio (que estaría antes en la lutita) dentro del fluido residual. Inicialmente, los fluidos utilizan los planos de apertura que son los cabalgamientos para circular, después en las rocas el metasomatismo se desarrolla por un sistema de venillas (a menudo, paralelo a la estratificación) donde a partir de los fluidos cristalizan albita, calcita y pirita. Entonces las rocas cambian de composición química, pero también de aspecto. La roca consigue un aspecto de fajas de metasomatismo y, al mismo tiempo, cambia de color.

#### 4.2.2.5 Trampas para la mineralización

Según Branquet (1995), las trampas para la mineralización de esmeraldas son las siguientes:

Brechas tectónicas. Formadas a lo largo de cabalgamientos y que tienen la particularidad de estar cementada por minerales de origen hidrotermal. Presentan fragmentos negros de lutita carbonosa, así como fragmentos blancos de lutita hidrotermalizada. El cemento se compone de los mismos minerales de la paragénesis hidrotermal, a saber, albita, calcita y pirita, ocasionalmente dolomita. Estas brechas están parcialmente cementadas.

Brecha hidráulica. Se trata de un tipo de brecha con trozos angulares que no muestran movimiento alguno. Una red de venillas atraviesa la roca, cortándola en compartimientos. La fracturación no es homogénea; el tamaño y el espesor de las venillas cambian mucho. Es normal observar cavidades de figuración hidráulica. La calcita romboédrica, la pirita y la esmeralda se forman en este sistema de venillas y cavidades. Se trata de una trampa mayor para la mineralización de la esmeralda. Este tipo de brechas se forman donde la presión de los fluidos es fuerte, en lugares como los corazones de los pliegues debido a una presión de fluidos superior a la presión de la roca encajante.

Vetas: Se trata de la tercera trampa para las esmeraldas. Es muy difícil de caracterizar el tipo de génesis para cada veta, pero parece posible indicar dos grupos; las vetas paralelas a la estratificación y las vetas que cortan la estratificación. Las vetas paralelas a los planos de estratificación están rellenas, principalmente, por calcita o pirita fibrosa. Frecuentemente, al nivel de las paredes de estas vetas se desarrollan micas verdes determinadas como moscovita enriquecida por vanadio y cromo. Algunas de estas vetas paralelas presentan una segunda etapa de apertura rellenas de calcita. Este relleno puede contener esmeraldas. Las vetas que cortan la estratificación, presentan un relleno de calcita fibrosa a veces, aunque generalmente corresponde a calcita romboédrica. Se encuentra también pirita y moscovita sobre las paredes. Es claro que este tipo de vetas está asociado con la etapa de fracturación hidráulica.

Las vetas pueden tener hasta 30 cm de espesor y, al parecer, en Coscuez constituyen la mejor trampa para las esmeraldas. La presión de los fluidos asociada con plegamientos es responsable de la apertura de estas vetas.

### 4.2.3 Petrografía

Branquet *et al.* (1999) presentan la siguiente descripción petrográfica:

#### 4.2.3.1 Brecha

Fragmentos, matriz y cemento. En los afloramientos, la brecha muestra fragmentos de roca inmersos en un enmallado de matriz cementante. Los fragmentos son de dos tipos, lo que imprime en la brecha una naturaleza poligenética: fragmentos blancos de albitita, y fragmentos negros de la lutita negra encajante. En un cuerpo brechoso, los fragmentos negros o blancos pueden ser exóticos relacionados a la roca de falla o fractura. Esta es una clara evidencia de transporte de la brecha. El tamaño de fragmento varía desde 3 cm hasta 7 cm, sin distribución sistemática de tamaño, color, forma o redondez. En vista de esta heterogeneidad, se pueden distinguir tres morfologías de fragmentos para todas las diferentes clases de tamaño y para los fragmentos blancos y negros, de la siguiente manera:

- Fragmentos planos angulares a subangulares. Están siempre presentes, y en los contactos de planos de falla a menudo muestran la incorporación de fragmentos planares del respaldo en las brechas.
- Fragmentos redondeados con márgenes suaves que sugieren desgaste por fricción de los fragmentos originalmente angulares durante el transporte.
- Fragmentos amoeboidales que muestran zonas de corrosión y algunas veces cortezas de alteración lo cual sugiere reabsorción química por fluidos hidrotermales en la brecha. Generalmente, los planos de estratificación internos y bandeamiento metasomático de los fragmentos están orientados aleatoriamente. Esto implica que los fragmentos han sufrido rotación durante el transporte. Sin embargo, cerca de los respaldos de las brechas, algunos fragmentos angulares y planares tienen su eje mayor paralelo a los respaldos y esto parece indicar una dirección de transporte.

La matriz está formada por una fracción clástica de grano fino (<3mm) en la brecha. La matriz es una harina de roca de color negro o blanco cuando proviene de la trituración de lutitas negras y albititas, respectivamente.

El cemento hidrotermal está compuesto de rombos de calcita y dolomita, pirita, albita, cuarzo, moscovita y esmeralda como mineral accesorio. Los rombos de carbonatos y el cuarzo tienen, frecuentemente, coloraciones oscuras o negras debido a numerosas inclusiones de partículas de lutitas negras. Esto parece indicar un reemplazamiento de la matriz por el cemento.

#### 4.2.3.2 Texturas y microtexturas

Las texturas varían desde una brecha matriz-soportada a una brecha cemento-soportada. Dentro del mismo cuerpo brechoso las texturas pueden variar lateral y verticalmente entre dos miembros finales. Algunas veces, lentes aislados de brecha cemento-soportadas están rodeadas por una brecha matriz-soportada. De manera significativa, cubos de pirita y, algunas veces, esmeraldas se encuentran flotando en la brecha matriz-soportada, sugiriendo que fluidos hidrotermales han circulado en las brechas no cementadas.

En sección delgada, las brechas cemento-soportadas muestran una ausencia de matriz y unos pocos fragmentos presentes en el cemento. Las fases de cemento carbonatado dominante varían desde porfiroblásticos a microsparíticos y están asociadas con pirita, albita y cuarzo en proporciones variables (Branquet *et al.*, 1999).

#### 4.2.3.3 Estructuras de los cuerpos de brecha

Las principales estructuras en los cuerpos brechosos según Branquet *et al.* (1999) son los lentes–matriz, estructuras bandeadas en venas y estratificación ígnea. Aunque los fragmentos de roca están generalmente embebidos en la matriz, algunos lentes–matriz que incluyen muy pocos fragmentos pueden, visualmente, distinguirse de la matriz en enrejado con fragmentos heterogéneos. Estos lentes-matriz son de una limitada extensión y pueden o no ser paralelos a los respaldos de la brecha. Ellos sugieren que la selección entre fragmentos y matriz ha ocurrido durante el transporte.

En términos de su textura y mineralogía, la brecha paralela al cabalgamiento está dispuesta en capas. Según Branquet *et al.* (1999) esta estratificación, paralela al respaldo – contacto, está compuesta de, abajo a arriba, por las siguientes partes:

- Una vena de cabalgamiento con carbonato, la cual puede ser retrabajada e incorporada como fragmentos de vena en la brecha suprayacente.
- Una brecha parcialmente cementada con rombos de calcita y pirita.
- Una zona de brecha retrabajada tectónicamente con fragmentos de brecha incorporados en una mezcla roja parcialmente cementada por pirita y dolomita rica en hierro (ankerita) (los fragmentos de lutita son escasos).
- Una capa roja, totalmente cementada y muy dura, compuesta exclusivamente de pirita y ankerita y carente de fragmentos de lutita.
- Una capa pirítica pura.

#### 4.2.4 Geología Estructural

Profesionales Asociados (1996) realizó en el área de Florián una prospección regional y una exploración en semidetalle, localizada en el departamento de Santander, límites con el departamento de Boyacá, en una extensión de 120 km<sup>2</sup>. El objetivo primario de esta fase es la selección de áreas promisorias para una investigación de semidetalle, e incluye la ejecución de actividades para la obtención de la cartografía geológica a escala 1:25.000, en la que se identifican y delimitan las unidades geológicas que las conforman, sus relaciones estratigráficas y la disposición estructural. Como resultado de estos productos se define la identidad morfoestructural de las áreas, delimitándose las diferentes provincias o dominios estructurales existentes y los patrones de fracturación de cada una de las zonas identificadas.

En este trabajo se realizó un análisis estructural que comprendió la determinación de la tendencia o dirección preferencial de la fracturación y su frecuencia. Ulloa y Rodríguez (1979) enmarcan el área de estudio dentro de un macroelemento estructural, el Anticlinorio Villeta – Portones, en el que diferencian dos estructuras mayores. El Sinclinal de Pescadero y el Anticlinal de Portones.

Profesionales Asociados (1996) definen la existencia de cuatro extensos dominios estructurales, los cuales fueron subdivididos en siete zonas con características tectónicas propias definidas así: IA – Ibacapí, IB - Guas, IC - Peñas Blancas, IIA - San José de Florián, IIB-Guayabal, III - Tunungua, IV - Otro Mundo. El área de Florián está contenida, casi en su totalidad, en la zona demarcada con I, que a su vez se subdivide en tres subdominios estructurales (A, B, C).

- El subdominio IA - Ibacapí, lo conforma un gran homoclinal donde las capas presentan una posición predominante horizontal, con variaciones locales por arrastre entre bloques por fallamiento. Las dos únicas estructuras identificadas corresponden a dos amplios sinclinales, en las veredas Delicias y la Esperanza, limitados en sus dos flancos por fallas y grandes fracturas. La litología está integrada casi exclusivamente por sedimentos arcillosos de la Formación Paja. La fracturación muestra una tendencia preferencial en las direcciones 45°, 50° (fallas Riobamba, Aguafría, Grande y Tiofilo), 300° (Río Minero, quebradas Sabanera y la Boba) y 350° (San Roque), con sistemas conjugados principales 5°, 75° y 330°. Al oriente la limita la Falla la Venta con orientación general 10°.
- El subdominio IB-Guas. La estructura mayor es un gran homoclinal con buzamiento muy leve (<10°) hacia el W-NW con variaciones locales hacia el E-SE en la vereda Buavista Loma de Gallineros, en litologías arcillosas de la Formación Paja. La tendencia de la fracturación muestra direcciones preferenciales en dirección 45° (Falla Aguafría), 290° (Falla Guas, quebrada Palmarona) y 335° (quebrada La Trementina) con sistemas conjugados de fracturas en las direcciones 20°, 70° y 315°.
- El subdominio IIA-San José de Florián presenta estructuras sinclinales y anticlinales en rocas poco competentes, como calizas de la Formación Rosa Blanca, orientadas regularmente a N25E. Las fallas principales tienen predominantemente las direcciones N20E y N40E (Falla la Venta) con sistemas conjugados en las direcciones N70E, N300E y N330E.
- El dominio III-Tunungua, no obstante sus componentes litológicos provienen de eventos tectónicos regionales, no presenta en el área disposición estructural definida. Tampoco son evidentes lineamientos que evidencien fracturación con direcciones selectivas o predominantes. El límite norte (Falla Canutillo) es una falla de tipo cuchara, típica de zonas terminales en deslizamientos (Profesionales Asociados, 1996).

Profesionales Asociados (1996) realiza un estudio en semidetalle, escala 1:10.000, en varias zonas del área de Florián en el Cinturón occidental. El tren estructural de la zona coincide con el regional de la cordillera; las estructuras tienen un rumbo general NE y N. El rasgo estructural principal es la presencia de fallas de cabalgamiento de escamación delgada, de bajo ángulo (exceptuando la Falla de la Venta, que probablemente tiene un ángulo mayor al del resto) con vergencia W y pliegues amplios superficiales por flexión de falla. No se presentan fallas normales relevantes, pero sí basculamientos de bloques en el escarpe de la Falla de la Venta; además, se reconocieron estructuras de “*boudinage*” en el sector de San Roque que evidencia procesos extensionales por lo menos en la secuencia de techo.

La estructura general la marca el amplio Anticlinal de la Boba, cuyo eje pasa por la quebrada del mismo nombre en el centro del mapa; éste es limitado al W por la Falla de San Roque, al E por la Falla de la Venta y al sur por las fallas de Ibacapí y del Río Minero.

Zapateiro & Rodríguez (1985) definen en Coscuez que el patrón estructural N-NE refleja la tendencia regional y como estructuras locales al Sinclinal de Santa Bárbara, cuyo eje pasa a 2,3 km al oriente del municipio de Otanche, el Anticlinal de Coscuez localizado al occidente de la mina y el Sinclinal de Coscuez al oriente de la misma. El yacimiento está afectado por fallas tipo Amarillal (N35E-N70E) y tipo San Gregorio (NW).

Murcia y Soler (1989) realizan un trabajo en el área de Itoco – Itoco norte, ubicada en el Municipio de Quipama (Departamento de Boyacá), en rocas de la Formación Villeta. Indican que estas rocas fueron afectadas por los períodos compresivos que generaron amplias estructuras plegadas de dirección N15E y fallas de cabalgamiento de alto ángulo longitudinales a los ejes de plegamientos que conforman un sistema imbricado con vergencia al oriente y cizallamientos transversales E-W que acomodan el desplazamiento desigual en la vertical a lo largo de los planos de cabalgamiento. Como resultado de la transferencia de movimientos transversales de los bloques fallados se presentan enraizamientos profundos que se comportan como caminos de ascenso de los fluidos mineralizantes de las esmeraldas, los cuales terminaron por depositarse en estos puntos de inflexión.

Respecto al marco estructural de la brecha, la brecha, llamada “cenicero” por los mineros locales y “brecha tectónica cementada por carbonato” por Laumonier *et al.* (1996), aflora a lo largo de los cabalgamientos, fallas inversas de ángulo grande y *tear faults*. Las relaciones de campo muestran que la formación de las brechas es contemporánea con el fallamiento. Entre los cabalgamientos y las fallas inversas, la brecha forma cuerpos estratiformes no continuos que pueden ser trazados hasta por 50 m a lo largo del plano, con un espesor que va de 10 cm a 3 m. En las fallas tipo *tear faults*, los cuerpos brechosos muestran las mismas características morfológicas de las asociadas a cabalgamientos. Las brechas también llenan fracturas dilatantes conectadas a las fallas y atraviesan cortando la estratificación. Las observaciones sugieren que la formación de brechas está ligada a la dilatación (distensión) controlada por fallas a lo largo de los cabalgamientos, fallas verticales y fracturas asociadas.

Guerrero & Carrillo (1997) indican que las estructuras presentes en el área de Peñas Blancas – Coscuez – Otanche son producto de imbricaciones y la generación de estructuras duplex, cuyos planos de despegue ascienden a partir de una superficie de despegue principal

## **5. PROSPECCIÓN GEOQUÍMICA**

La prospección y exploración geoquímica para esmeraldas en Colombia se inició, básicamente, a partir del trabajo de Beuss & Mineev (1972) y alcanzó su mayor aplicación durante los estudios realizados por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo en asocio con INGEOMINAS (PNUD, 1975), en el cual se establecen con claridad la distribución de ciertos elementos químicos que pueden utilizarse como indicadores geoquímicos, presenta conclusiones concretas y resalta la importancia de los estudios geoquímicos en la exploración de esmeraldas. Posteriormente, se realizaron una serie de investigaciones con un componente importante de prospección geoquímica.

### **5.1 CINTURÓN ESMERALDÍFERO ORIENTAL**

La mayor parte de todos los trabajos exploratorios adelantados en este cinturón se llevaron a cabo en los distritos mineros conocidos.

#### **5.1.1 Geología y geoquímica de las minas de esmeraldas de Gachalá, Cundinamarca (Escovar, 1975)**

Escovar (1975, 1979), dentro del trabajo del PNUD (1975) realiza una exploración geoquímica detallada en el área de Gachalá, Cinturón Oriental, en rocas de la Formación Calizas del Guavio, especialmente sus miembros inferiores compuestos por conglomerados con algunas intercalaciones de areniscas, limolitas y arcillositas, y un miembro de lutitas, y en rocas de la Formación Lutitas de Macanal. En esta área también hay expuestos sedimentos cuaternarios compuestos por mezclas de material coluvial con suelos de gran espesor. En este trabajo se colectaron y analizaron 299 muestras de roca, 590 de suelos y 14 de sedimentos activos. Estas muestras se analizaron por absorción atómica para los elementos Na, Li, K, Sr, Ba, Cu, Pb, Zn, Ni, Mo y Be. Se analizó 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 una segunda fase, 1 km a cada lado. 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 para cubrir la segunda fase, en el área de la mina Las Cruces. 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. Esto se hizo con el objeto de tener una base de comparación para establecer diferencias dentro y fuera del área de mineralización. Se hizo un muestreo en tres zonas, así, sitios mineralizados con berilo, área de mina (1 km de la falla) y fuera del distrito minero. Las muestras se agruparon de acuerdo a las características litológicas. Se determina que un elemento será un buen indicador local si

muestra un contraste al comparar 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 (Escovar, 1975, 1979). Geoquímicamente, se establece que los procesos de albitización favorecen la formación de esmeraldas. Los resultados de este análisis se pueden leer en el capítulo de Controles de la Mineralización y Guías de Exploración.

### **5.1.2 Determinación de nuevos prospectos esmeraldíferos en el sector de Gachalá – Guavio – Chivor, Departamentos de Cundinamarca y Boyacá (Carrillo, 1989)**

Carrillo (1989) realiza un estudio para delimitar zonas potencialmente favorables para contener mineralizaciones esmeraldíferas en el sector de Gachalá – Chivor con base en características geológicas y geoquímicas. Este estudio realizó un ensayo emanométrico en una zona al occidente de la Mina de San Martín que buscaba determinar zonas de fractura, posiblemente, favorables para albergar mineralizaciones de esmeraldas. Se realizó un perfil en una malla con retícula de 25m por 25m. Los puntos que cuantitativamente (en los conteos por minuto) fueron considerados altos en el campo, fueron detallados con la realización de una malla de 12.5 por 12.5 m. Se anota que en las mallas de control efectuadas alrededor de puntos de conteos altos no se obtuvieron valores especialmente significativos pero en cambio el conteo general se encuadra por encima de los valores promedio. Los resultados de la prueba de emanometría, aunque aparentemente parecen reflejar zonas anómalas que coinciden con las proyecciones geológicas, para la Falla del Garabato no fueron determinantes.

### **5.1.3 Prospección geológica y geoquímica, Aporte 1228, Guavio – Chivor (Arboleda, 1991)**

Arboleda (1991) prepara un resumen de las actividades realizadas por MINERALCO en el área del Aporte 1228 (Guavio – Chivor) que consisten en estudios de geología, geoquímica y geofísica ejecutados por el Departamento de Geología de MINERALCO o por trabajos de tesis de grado de la Universidad Nacional. Este informe indica que se han realizado tres trasversas geológicas que han empleado la misma nomenclatura de Ulloa & Rodríguez (1979) y Escovar (1979). Las trasversas realizadas fueron las de los ríos Sucio, Negro y Chivor.

El estudio geoquímico de algunas áreas del Aporte 1228 se realizó de manera regional y detallada. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en trabajos anteriores se utilizó el muestreo y análisis de rocas, complementado con ocasionales muestras de sedimentos y suelos. Todas las muestras de roca fueron analizadas por absorción atómica para Na, Li, K, Cr y por espectrografía para 33 elementos y las muestras de suelo por absorción atómica para Na y K. Los resultados fueron representados en mapas de contornos y diagramas tridimensionales. El perfil geoquímica comparativo Be-Na/K para 70 muestras indica que el contenido de berilio disminuye apreciablemente en los puntos donde la relación Na/K es anómalamente alta.

#### **5.1.4 Exploración y evaluación de nuevas áreas potencialmente esmeraldíferas en el Cinturón oriental y occidental (Profesionales Asociados, 1996)**

Profesionales Asociados (1996) realiza un estudio para la exploración y evaluación de áreas potencialmente esmeraldíferas en el Cinturón oriental, área de Páez - 220 km<sup>2</sup>, y el Cinturón occidental, área de Florián 120 km<sup>2</sup>, trabajo ejecutado por una empresa consultora. La exploración en las áreas de Páez y Florián se realizó mediante geología, geoquímica y geofísica. Con base en el estudio fotogeológico y el análisis estructural se inició la investigación regional, obteniéndose un mapa fotogeológico de cada área, a escala 1:25.000, y con el reconocimiento de campo se identificaron y delimitaron las unidades geológicas estructurales, potencialmente esmeraldíferas. La correlación de la información geológica, con la geoquímica de los sedimentos activos permitió seleccionar las áreas para la investigación de semidetalle.

La prospección geoquímica regional se realizó mediante la toma y análisis de sedimentos activos para análisis de absorción atómica de Na y K, de acuerdo a las bases del UN (1975). Durante esta fase, en el área de Páez, se colectaron 86 muestras y se analizó la fracción menor de malla 80. Además de los sedimentos activos, se tomaron muestras de roca, de cantos rodados de calcita y de vetas de calcita. Se seleccionaron tres muestras de las vetas de calcita y se hicieron análisis de inclusiones fluidas, microtermometría, difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido y espectroscopia de absorción en el infrarrojo (laboratorio de la Universidad de Sao Paulo). Las tres muestras de calcita del área de Páez dieron temperaturas entre 92.5°C y 116°C, valores bajos comparados con las temperaturas de la formación de las esmeraldas – 230 y 350°C. Si bien, ésta es una buena técnica para conocer la temperatura de formación de los minerales, está sujeta a la densidad de muestras disponibles para el análisis dado que se trata de un análisis de tan sólo tres muestras con lo cual no se puede ser concluyente.

Las zonas seleccionadas para la cartografía de semidetalle, a escala 1:10.000, tienen un área cada uno de 5 km<sup>2</sup>. En estas áreas seleccionadas se realizó una investigación de semidetalle con el muestreo sistemático de suelos, rocas y vetas mineralizadas. Paralelamente, se levantaron columnas estratigráficas y se realizó el análisis microtectónico de superficie. Se practicaron análisis de absorción atómica, espectrografía, secciones delgadas y difracción de Rayos X. El método de trabajo empleado en esta investigación se fundamentó en el trabajo del PNUD (1975). La investigación de semidetalle se adelantó en áreas seleccionadas en la primera fase del estudio de investigación regional y se realizaron actividades de campo relacionadas con cartografía geológica, levantamiento de columnas estratigráficas, geología estructural con medidas de fracturamiento, inventario minero, trincheras y destapes, identificación mineralógica a nivel macro en venas y material rodado, geofísica (SEV) y muestreo geoquímica. En la fase de oficina se procesó la información de campo, así como los resultados de los análisis de laboratorio tales como absorción atómica, espectrografía, difractometría, petrografía de secciones delgadas, análisis de diaclasas e interpretaciones estructurales, estratigráficas, geofísicas y geoquímicas.

Para el Área de Páez, Profesionales Asociados (1996) concluyen lo siguiente:

- Presencia de lutitas carbonosas calcáreas pertenecientes a la Formación Lutitas de Macanal.

- Estructuralmente, esta área se caracteriza por la presencia de fallas de cabalgamiento de bajo ángulo y pliegues superficiales.
- La prospección geoquímica regional hecha con base en sedimentos activos reportó dos muestras con valores altos para la relación Na/K localizados en las quebradas Muchilero y El Salitre.
- Dentro de las áreas seleccionadas para la investigación de semidetalle se encontró un sector en la zona Upía I que muestra enriquecimiento en Na y Ca (albitización – carbonatación).
- La zona albitizada presenta bajas concentraciones de Pb, Ba, K, V, Cr y Mo, lo que también es visible en zonas ya patronadas para esmeraldas.

### **5.1.5 Proyecto de exploración de áreas potencialmente esmeraldíferas en un sector de Páez – Campohermoso – Macanal, Departamento de Boyacá (Cardozo & Leal, 2000)**

Cardozo y Leal (2000) realizan una revisión geológica y geoquímica en un área de, aproximadamente, 125 km<sup>2</sup>, en el Municipio de Macanal, Departamento de Boyacá, con el propósito de definir áreas potencialmente esmeraldíferas. Durante este trabajo se realizó la cartografía geológica a escala 1:25.000, con el fin de determinar niveles y estructuras que pudieran ser utilizados como guías de campo durante el desarrollo de un plan de exploración para yacimientos de esmeraldas. Con base en las observaciones de campo se plantea aquí la posibilidad de que el contacto entre la Formación Lutitas de Macanal y el Grupo Farrallones corresponda a una discordancia y no a una falla, como ha sido descrito en la literatura.

Se levantaron dos columnas estratigráficas, una a lo largo de la nueva carretera Las Juntas – Santa María de Batá, a escala 1:10.000, y otra a lo largo de la vía que de la vereda Peña-blanca conduce al Alto La Punta, a escala 1:5.000. Así mismo, se elaboraron 4 corte geológicos en dirección N30W con base en la información geológica de superficie compilada en campo, con el fin de observar el comportamiento de las estructuras.

Se hicieron análisis de espectrofotometría de absorción atómica para 100 muestras de roca con el objeto de determinar la distribución de Na en porcentaje en peso. Como apoyo de las observaciones de campo sobre la petrografía de la roca encajante, las venas y las zonas con alteración metasomática, se describieron y analizaron 28 secciones delgadas al microscopio. Una vez determinados los valores anómalos de Na, se elaboró un mapa de distribución de la concentración de Na y se definieron polígonos regulares en los sectores de concentración anómala, determinando así, áreas promisorias para el desarrollo de una segunda fase de exploración más detallada.

### **5.1.6 Otros trabajos de exploración**

Varios trabajos de pregrado de Geología han sido elaborados en la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

Zafra (1996) realiza una prospección geoquímica en la región del Guavio – Chivor en muestras de rocas mineralizadas de la explotación esmeraldífera para patronar Na y K y la relación Na/K en el sector sureste del Cinturón Oriental con el objetivo de caracterizar a las

mismas para extrapolar los resultados a las lutitas negras y grises que presenten alteración hidrotermal.

Según Romero (2001), la distribución de Na se presenta como anómala con una tendencia alineada SW-NE. También se presenta una superposición de esta zona con el eje del anticlinal de Tropepuerco, resultando de notorio interés el costado SE del área. La distribución de contenidos de Ba están alineados SW-NE y muestran relación directa con los ejes de los anticlinales cartografiados.

Cardozo (2000) realiza tres etapas de campo en 60 km<sup>2</sup> del municipio de Macanal en donde estudia zonas albitizadas, brechas y venas que están asociadas a las mineralizaciones de esmeraldas. La neoformación de albita es responsable de anomalías geoquímicas en Na, lo cual se refleja en los respectivos análisis de suelos y rocas.

Guerrero (1988) hace un estudio de la Mina “El Toro”, localizada en el municipio de Gachalá. La prospección geoquímica permite detectar varios sitios anómalos para Be, Cr, Na, K, Mo, Ca y Mg, íntimamente relacionados con la ocurrencia de esmeraldas.

Guelvez & Villamizar (1991) realizan una prospección geoquímica en 18 Km<sup>2</sup> en los municipios de Ubalá y Almeida, Cinturón Oriental, en 105 muestras para análisis de absorción atómica de Na, K y semicuantitativo de espectrografía de emisión para 33 elementos.

## **5.2 CINTURÓN ESMERALDÍFERO OCCIDENTAL**

Los principales trabajos adelantados en este cinturón fueron los siguientes:

### **5.2.1 Algunos rasgos geológicos y geoquímicos del distrito Muzo – Coscuez (Beus & Mineev, 1972)**

La distribución de los elementos que forman las rocas y los elementos trazas dentro y fuera del área mineralizada sugiere una lixiviación hidrotermal. La lixiviación significativa desde la “zona tectónica” está probada por K, U, Th, *REE* (Elementos de las tierras raras), Mo, Sn, Li, Rb, Cs, V y Cr. De este grupo, sólo los elementos de las tierras raras están precipitados y forman minerales específicos en las venas. Na, Ca, Mg, CO<sub>2</sub> y S están concentrados en shales negros alterados metasomáticamente y en venas en comparación con las rocas localizadas fuera de la “zona tectónica”. En este estudio no se encontró ninguna evidencia de lixiviación o redistribución de berilo.

Teniendo en cuenta la distribución regional de ocurrencias de esmeraldas y los rasgos geoquímicos de los fenómenos metasomáticos relacionados con la formación de esmeraldas, los autores apoyan la hipótesis de una fuente profunda para las soluciones contenedoras de berilo.

Se sugiere el uso de la relación K/Na en sedimentos de corriente como guía de exploración en las zonas de esmeraldas.

Beus & Mineev (1972) establecen que la asociación mineral en las minas de esmeraldas de la Cordillera Oriental de Colombia es típica de depósitos de berilo de baja temperatura. Esta asociación comprende calcita, dolomita, cuarzo, albita, barita, pirita, calcopirita, fluorita, apatito, parisita, codazita y berilo (esmeralda). Los autores hacen una descripción de cada uno de estos minerales y presentan una composición química de dolomitas, parisita, esmeraldas.

Beus & Mineev (1972) determinaron la composición química de siete muestras de shales negros representativos de la zona de Muzo con diferente grado de alteración hidrotermal localizadas dentro y fuera de la zona mineralizada de berilo. Se determinó que la composición de lutitas negras tomadas fuera de la zona tectónica difiere significativamente de los shales promedio. Los shales negros están enriquecidos en sílice y tienen valores muy bajos de Mg, Ca y K. Los shales negros del interior de la “zona tectónica” están enriquecidos en CO<sub>2</sub>, Ca, Na, Mg, Mn y S. Puede notarse, también, algo de enriquecimiento de F y P. La carbonatación y la albitización de shales fue seguida de la lixiviación de K, Si y Al. La alteración metasomática de los shales negros fue, también, acompañada por su deshidratación parcial. Es interesante comentar que los shales negros metasomáticamente alterados que representan la zona productiva de esmeraldas no difieren en su composición química de los otros shales carbonatados y albitizados de la principal zona tectónica.

La extrema lixiviación de K y la notable concentración de Na en las rocas alteradas de la “zona tectónica” están claramente reflejadas en la composición de los sedimentos activos en las corrientes que drenan las áreas mineralizadas.

En este trabajo no se encontró ninguna evidencia de concentración de algún elemento traza en rocas afectadas por la actividad hidrotermal. Los elementos trazas analizados fueron U, Th, U, Sc, Y, TR, Be, Sn, Mo, Pb, Zn, Cu, Y, Ni, Co y Cr.

### **5.2.2 Prospección de esmeraldas en los departamentos de Boyacá y Cundinamarca (PNUD, 1975)**

El proyecto realizado por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo – PNUD e INGEOMINAS (1975) constó de cuatro etapas: (1) Reconocimiento geoquímico de las minas de Muzo; (2) programa de exploración regional en la zona de prueba situada al sur de Muzo; (3) exploración detallada de las anomalías descubiertas; (4) exploración detallada de las minas de esmeralda de Gachalá.

#### **5.2.2.1 Prospección geoquímica en la zona de Muzo**

Tuvo como finalidad establecer procedimientos de exploración en la prospección de esmeraldas, que se aplicarían en una fase posterior en reconocimientos semirregionales y regionales. Se llegó a la conclusión de que el uso de la relación potasio- sodio (Na/K) en los sedimentos aluviales era un procedimiento útil para la prospección de esmeraldas. Además, se comprobó que en las zonas de mineralización se habían lixiviado diversos elementos y se

sugirió que estas comprobaciones se deben aplicar en la prospección regional y semirregional. Se tomaron 440 muestras de rocas, tierras y sedimentos.

El objeto del estudio fue continuar el trabajo de Beus & Mineev (1972) y definir métodos de prospección de esmeralda aplicables en la zona esmeraldífera de Colombia por medio de geología, geoquímica y geofísica. La prospección geoquímica se realizó para controlar la influencia de la albitización en la zona o la variación en la relación K/Na en rocas y sedimentos de corrientes y para considerar la posibilidad de usar dicha relación como un método de prospección regional para esmeraldas y para conocer si otros elementos, cerca o dentro de la zona mineralizada indican factores de enriquecimiento o lixiviación de interés para el uso de tales elementos como indicadores de la mineralización esmeraldífera.

Los trabajos realizados fueron los siguientes:

- Muestreo de sedimentos de corrientes en el río Itoco y todas las quebradas cercanas a las minas. El intervalo del muestreo fue de 100 m.
- Muestreo de suelos en una trocha de 3.600 m de longitud atravesando el área mineralizada.
- Muestreo de rocas en tres minas productivas.
- Cartografía geológica y prospección geoquímica de suelos y rocas.
- Se colectaron 440 muestras, se hicieron análisis químicos para 7 elementos y 55 análisis espectrográficos para 33 elementos.
- Todas las muestras fueron analizadas por absorción atómica para K, Na, Li, Pb, Mo, Ni y Co. Los suelos se analizaron para Mo, Cu, Zn, Pb, Ni y Co. Algunas rocas fueron analizadas para Na, K, Li, Mo, Pb, Zn y Co. Además, se analizaron por espectrografía 55 muestras (30 rocas, 14 suelos y 11 sedimentos de corriente)

Las conclusiones de este trabajo fueron las siguientes:

- El enriquecimiento de Na y el simultáneo empobrecimiento de K en las lutitas negras de la zona mineralizada significa una disminución considerable en la relación K/Na en estas rocas y también en los sedimentos de corrientes de los tributarios que las drenan.
- Se justifica la utilización de la relación K/Na en sedimentos de corrientes como guía de prospección para esmeraldas, como lo sugieren los resultados obtenidos en el área de Muzo.
- Como resultado de la “actividad hidrotermal”, varios elementos fueron removilizados cerca de las vetas mineralizadas. El Mo parece ser el elemento que sufrió una removilización completa.
- Los valores para Mo en la zona mineralizada son más bajos que aquellos valores en zonas no mineralizadas; esta conclusión es válida tanto para rocas como para los suelos que cubren la zona mineralizada.
- Los valores bajos para el Mo coinciden con valores bajos en la relación K/Na, en rocas.

#### 5.2.2.2 Exploración Regional al sur del distrito Muzo - Coscuez

A fin de verificar la validez de los criterios propuestos en la conclusión del estudio de la región de Muzo (enriquecimiento en sodio y lixiviación de otros elementos en zonas de mineralización de esmeraldas), se llevó a cabo un estudio en el área piloto de 900 km, en la con-

tinuación sur del cinturón de esmeraldífero Muzo-Coscuez, consistente en un muestreo de sedimentos de corrientes a escala regional y la elaboración de mapas geológicos. Las zonas anómalas que se encontraron en la primera fase se estudiaron posteriormente con mayor detalle. En un área de 900 km<sup>2</sup> del área piloto se colectaron 1.307 sedimentos activos lo que representa una densidad de muestreo de 1,5 muestras por km<sup>2</sup>.

Procedimientos de campo y laboratorio fueron los siguientes:

- Las fracciones menores de malla 80 de los sedimentos fueron analizadas por absorción atómica para Na, K, Be, Li, Mo, Cu, Pb, Zn y Ni, y en algunos casos para Ba y Sr.
- Los resultados analíticos para Na y K se expresan en porcentajes y para los demás elementos en ppm.
- Las muestras fueron localizadas sobre mapas topográficos a escala 1:25.000 y luego sobre mapas topográficos 1:100.000.
- En este mapa se incorporaron los resultados analíticos y se prepararon mapas separados para cada elemento analizado junto con los contactos geológicos según el mapa geológico de la plancha K-10, Villeta.

Las conclusiones fueron las siguientes:

- La mineralización de esmeraldas está restringida a las características litológicas de las rocas. Las lutitas negras parecen ser la unidad litológica más favorable para la mineralización.
- La mineralización está fuertemente vinculada a zonas de fallamiento entrecruzado entre fallas longitudinales inversas y fallas transversales de rumbo. Donde ocurre mineralización de esmeraldas la roca está intensamente fracturada y brechificada, comúnmente, con un alto contenido de albita-oligoclasa.
- La fracturación intensa es el resultado de la ocurrencia de fallas de rumbo en zonas de flexión de fallas inversas longitudinales en la intersección con otros lineamientos. Las zonas de intersección se manifiestan en la topografía como zonas “colapsadas” tectónicamente y son fácilmente reconocibles en las fotografías aéreas.
- La mineralización de esmeraldas va siempre acompañada por un enriquecimiento de sodio y la lixiviación de otros elementos diversos.
- El contenido de sodio en sedimentos activos es una guía para la exploración regional.
- En la prospección semidetallada y en la detallada se empleó, exitosamente, como guía el elevado contenido de sodio y el bajo contenido de litio y plomo de las tierras de las anomalías.

### **5.2.3 Exploración zona de reserva nacional para esmeraldas Muzo-Coscuez, Boyacá, área suroriental (Mendoza P.G.A., 1991)**

Mediante la aplicación de técnicas geológicas, geoquímicas y mineralógicas e interpretación geoestadística se establecieron las principales características de la mineralización esmeraldífera, seleccionándose seis sectores potencialmente mineralizados. Las actividades de la prospección tuvieron una duración de siete meses iniciados el 15 de enero de 1991. El informe detalla los estudios de fotogeología, estratigrafía, geología estructural, geoquímica,

petrografía y mineralogía. Los resultados permiten caracterizar y definir áreas que muestren condiciones favorables para el emplazamiento de mineralizaciones esmeraldíferas.

La prospección se realizó en un área de 90 Km<sup>2</sup>, entre el Alto El Chirchir al sur de las minas de Muzo y Quipama y el extremo norte de las minas de Coscuez, el río Minero al oriente y la cuchilla Tapaz al occidente. El trabajo regional se realizó sobre una base topográfica a escala 1:25.000, el trabajo en semidetalle a escala 1:10.000 y a detalle a escala 1:5.000 en las áreas seleccionadas como prioritarias.

La prospección geoquímica se fundamentó en los resultados de los trabajos de PNUD (1975) y se hizo un muestreo sistemático de rocas, suelos, sedimentos y aguas que permitió establecer áreas de interés aplicando la relación Na/K y los contenidos de Be, La, Ga, Mo y otros. Se estudiaron en detalle varias áreas específicas que cumplieran con los objetivos propuestos para los cuales se dan recomendaciones de desarrollo de trabajos futuros.

En la fase semidetallada y detalla se colectaron más de 1000 muestras de roca, 58 muestras de sedimentos activos, 1030 muestras de suelo y 49 muestras de agua.

#### **5.2.4 Exploración y evaluación de nuevas áreas potencialmente esmeraldíferas en el Cinturón oriental y occidental (Profesionales Asociados, 1996)**

Profesionales Asociados (1996) realizó una prospección regional y una exploración en semidetalle en el área de Florián, localizada en el departamento de Santander, límites con el departamento de Boyacá, en una extensión de 120 km<sup>2</sup>. El objetivo primario de esta fase es la selección de áreas promisorias para una investigación de semidetalle, e incluye la ejecución de actividades para la obtención de la cartografía geológica a escala 1:25.000, en la que se identifiquen y delimiten las unidades geológicas que las conforman, sus relaciones estratigráficas y la disposición estructural. Como resultado de estos productos se define la identidad morfoestructural de las áreas, delimitándose las diferentes provincias o dominios estructurales existentes y los patrones de fracturación de cada una de las zonas identificadas.

Para la obtención de los objetivos propuestos se realizaron las actividades revisión bibliográfica, fotointerpretación, geomorfología, estratigrafía, geología estructural y tectónica, geología histórica, geoquímica a nivel regional, identificación de las unidades litoestratigráficas potencialmente productoras y, finalmente, selección de áreas.

La geoquímica a nivel regional se centró en la toma y análisis de los sedimentos activos, su interpretación, con miras a la selección de zonas anómalas. Teniendo en cuenta los conceptos definidos hasta la fecha por varios investigadores, las zonas anómalas corresponden a relaciones altas de Na/K, valores tomados del análisis por absorción atómica.

Para el análisis geoquímico regional se tomaron muestras de sedimentos activos para análisis de absorción atómica de Na y K, criterio seguido con base en las recomendaciones de UN (1975). En esta fase se colectaron en el área de Florián 52 muestras de corriente y se analizó la fracción menor de malla 80.

Además de los sedimentos activos, se tomaron muestras de roca, de cantos rodados de calcita y vetas de calcita. De éstas últimas se seleccionaron tres muestras y se hicieron análisis de inclusiones fluidas, microtermometría, difracción de Rayos X, microscopía electrónica de barrido y espectroscopia de absorción en el infrarrojo. Estas tres muestras se colectaron dentro de las formaciones Cumbre, Rosablanca y Paja. Las temperaturas obtenidas fueron 137.7°C y 144.2°C, valores bajos comparados con las temperaturas de formación para las esmeraldas, fijadas entre 230 y 350°C. Se aclara que esta densidad de muestreo no permite ser concluyente (Romero, 1996).

De acuerdo a los criterios litológicos, estructurales y geoquímicos se seleccionaron cuatro zonas para realizar trabajos en semidetalle en el área de Florián de la siguiente manera: Río Minero-Buenavista, Quebrada Río Bamba-Quebrada San Roque, Aguafría y el Sector de la Quebrada Ibacapí, aguas arriba de las quebradas Guaduas y El Loro. En estas zonas afloran las formaciones Rosablanca y Paja, afectadas por estructuras de rumbo general NE y E-W. Las zonas escogidas para cartografía en semidetalle, a escala 1:10.000, tienen cada una un área aproximada de 5 km<sup>2</sup>.

En el trabajo de semidetalle se realizaron actividades de campo relacionadas con cartografía geológica, levantamiento de columnas estratigráficas, geología estructural con medidas de fracturamiento, inventario minero, trincheras y destapes, identificación mineralógica a nivel macro en vetas y rodados, prospección geofísica (SEV) y muestreo geoquímico. Se realizaron análisis de absorción atómica, espectrografía, difractometría, petrografía de secciones delgadas, análisis de diaclasas e interpretaciones estructurales, estratigráficas, geofísicas y geoquímicas. La prospección geoquímica en semidetalle, escala 1:10.000, se tuvo en cuenta lo efectuado en trabajos anteriores y, en general, se siguió el método de trabajo de PNUD (1975).

El análisis DRX reportó la presencia de calcita, dolomita, cuarzo y feldespato. El análisis petrográfico muestra la presencia de dolomita, albita, pirita, cuarzo y calcita fibrosa y romboédrica. Este conjunto mineralógico hace parte de la asociación mineralógica relacionada con la formación de esmeraldas.

### **5.2.5 Programa de exploración geológica en zonas promisorias para la exploración de esmeraldas en Yacopí, Cundinamarca, y Coscuez – Peñas Blancas – San Pablo de Borbur, Boyacá, Colombia (Castañeda, 1996)**

En el distrito minero de Yacopí, Cundinamarca, se realizó un muestreo de rocas teniendo en cuenta el tipo de mineralizaciones asociadas a las unidades litoestratigráficas, patrones estructurales de fallamiento definidos por brechas de falla, vetas, venas y venillas, algunas de estas brechas presentan alto grado de meteorización química, sitios que fueron tenidos en cuenta en la fase de muestreo. Se tomaron 53 muestras de roca a lo largo de cauces de agua, caminos carretables y túneles de labores mineras. Los muestreos de roca se hicieron con un espaciamiento entre 30 y 40 m en una extensión aproximada de 150 Ha.

El tratamiento de los datos geoquímicos se realizó con base en el análisis de anomalías positivas para los valores en concentración de Na y anomalías negativas para los valores en concentración de K, en muestras de rocas, anomalías negativas para los valores en concentración de Na y anomalías positivas para los valores en concentración de K en muestras de suelo. Esto permitió seleccionar varios sectores promisorios para la explotación de esmeraldas. Se observó que estas zonas también corresponden a sectores de intersección de sistemas de fallas y a litologías de lodolitas negras carbonosas y lodolitas negras silíceas.

Respecto al uso del método emanométrico, se tiene que en los puntos de muestreo localizados en las zonas de fracturas, brechas y en donde aún no han sido removidos los suelos, se presentan los mayores valores de lectura. Los puntos muestreados en suelos o material de roca suelta no retienen el Radón pues las lecturas no son representativas. Las lecturas realizadas en suelos asociadas a diferentes litologías permiten establecer indirectamente el tipo de roca en el cual el método arroja mejores resultados, siendo los niveles arcillosos de las lodolitas grises las que tienen esta propiedad física de atrapar gases como el Radón.

#### **5.2.6 Exploración y evaluación de nuevas áreas potencialmente esmeraldíferas, sector Útica – La Palma (Exploraciones y Ensayos, 1997)**

En la zona de Útica – La Palma se realizó una prospección a escalas 1:25.000 y se delimitaron zonas que luego fueron estudiadas a 1:10.000 mediante estudios geológicos y mineralógicos, en éstos últimos se emplearon las técnicas de microtermometría en inclusiones fluidas, plasma inducido en carbonatos, análisis para grafitoides y absorción atómica para Na y K en sedimentos activos, Na y K por absorción atómica y espectrografía de 33 elementos en suelos. Los estudios permitieron definir la presencia de un fluido mineralizante con composición química semejante a la encontrada en zonas esmeraldíferas, así mismo, permitieron establecer que las condiciones de presión y temperatura en que se formaron las esmeraldas colombianas son muy equivalentes a las determinadas en el área de trabajo. Los estudios geoquímicos sugieren estar dentro de una zona con anomalías geoquímicas positivas muy semejantes a las reportadas en el distrito de Muzo.

En la fase de campo, la mayoría de las muestras se recolectaron durante los trabajos de reconocimiento y se analizaron durante la fase de geoquímica de sedimentos activos, 15 cristales de silicatos asociados a mineralizaciones hidrotermales escogidos para estudios microtermométricos; 20 muestras para roca tipo lutitas negras para estudios de grafitoides y 15 de carbonatos para estudio de plasma inducido. Tales muestras se recogieron en áreas de interés (minas, cruce de fallas y zonas de brechamiento). Los análisis geoquímicos realizados incluyeron estudios por absorción atómica para 100 muestras de sedimentos activos utilizando malla 80. Para su muestreo se tuvo en cuenta el método propuesto por Beus & Mineev (1972). Se analizaron 212 muestras de suelo del horizonte C para estudios de espectrografía para 33 elementos y absorción atómica de Na y K de las mismas.

La prospección geoquímica de sedimentos activos permitió definir dos áreas para realizar un muestreo geoquímico en suelos que siguió las recomendaciones de PNUD (1975). Las áreas fueron la región Pinzaima en rocas de la Formación Murca (contenido arenoso-

lutítico) y la región de Murca con rocas lutítico-carbonosas, en ocasiones calcáreas, con gran similitud con la Formación Paja del área de Muzo – Coscuez.

Los estudios microtermométricos, isotópicos, espectrométricos (ICP) y geoquímicos en carbonatos, esmeraldas, cuarzos y shales negros de algunas muestras colectadas en áreas mineralizadas y no mineralizadas de la región “Útica – La Palma” muestran la existencia de un fluido mineralizante con temperaturas mínimas entre 150 y 271°C y presiones máximas de aprisionamiento en la faja de 540 y 1350 bares. Una alta concentración de todos los elementos de tierras raras se presenta dentro de toda la zona de estudio. La materia orgánica en algunas muestras se encuentra parcialmente alterada lo que indica la migración de un fluido hidrotermal de baja – media temperatura. Los elementos involucrados en la formación de la esmeralda se encuentran en altas concentraciones en varias localidades muestreadas. Un fuerte enriquecimiento en  $\delta^{18}\text{O}$  ( $\text{H}_2\text{O}$ ) se presenta en los materiales estudiados. Los fluidos isotópicos analizados y comparados con los datos de los mismos encontrados en la literatura indican un origen sedimentario.

Este trabajo presenta las siguientes conclusiones:

- Las inclusiones fluidas son bifásicas y trifásicas con fase sólida compuesta por halita, una solución acuosa tipo salmuera que ocupa la mayor parte de la inclusión, además de una fase de vapor.
- Las inclusiones trifásicas presentan las mismas características (morfología, comportamiento microtermométrico, gases e iones) que las inclusiones fluidas de las esmeraldas colombianas. Sus condiciones termodinámicas de formación también son semejantes.
- Los estudios en carbonatos, colectados en venas mineralizadas, muestran altas concentraciones de cromo, flúor, berilio y vanadio. Todos ellos originados, posiblemente, a partir de la roca encajante.
- El comportamiento del espectro de las tierras raras es semejante al reportado en Muzo, sin embargo, su concentración es muchísimo mayor en la zona de trabajo.
- El comportamiento isotópico de los cuarzos indica un origen sedimentario, semejante al presentado en los distritos esmeraldíferos.
- Todos los resultados de análisis de laboratorio indican un ambiente geológico similar a las regiones de Muzo-Coscuez-Yacopí.
- Se reconfirma el origen sedimentario de los fluidos generadores de las esmeraldas.
- Se encontraron esmeraldas en la zona de Guadualito.

### **5.2.7 Otros trabajos de exploración geoquímica**

López y Uribe (1989) realizan una exploración geoquímica corroborando la fórmula para la prospección geoquímica regional de Escovar (1975).

Aranguren & Rendón (1998) hacen una caracterización mineralógica y geoquímica del yacimiento de Coscuez. Los patrones de comportamiento de Be, Cr, V, Ni, Ga, Mo, Mn, Cu, Y, Ba en las lutitas encajantes de la mineralización fueron correlacionados con los aspectos geológicos evidenciando barreras geoquímicas que pueden ser interpretadas como el límite entre la zona mineralizada y la zona estéril.

Guerrero y García (1986), en su trabajo en la mina El Indio, Municipio de Muzo, corroboran la relación Na/K como indicadora de mineralización pues esta relación coincide con el sector de la mina.

## 6. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

Los trabajos de geofísica que se han realizado en los cinturones esmeraldíferos en Colombia han sido de carácter detallado, en áreas específicas, previamente definidas a partir de estudios geológicos, geoquímicos y mineros. Los métodos geofísicos utilizados han sido muy variados, dependiendo de la variable geofísica a medir y de las características geológicas del sitio mineralizado. Sin embargo, aún se requieren más investigaciones al respecto para seleccionar los métodos geofísicos más adecuados, los cuales puedan ser utilizados como herramientas indirectas eficaces en la exploración de los yacimientos esmeraldíferos.

### 6.1 CINTURÓN ESMERALDÍFERO ORIENTAL

Los trabajos geofísicos realizados en este sector son los siguientes:

#### 6.1.1 Prospección de esmeraldas en los departamentos de Boyacá y Cundinamarca (PNUD, 1975)

En el proyecto de esmeraldas adelantado por el PNUD – INGEOMINAS (1975), se emplearon varios métodos geofísicos como guías indirectas en algunas zonas esmeraldíferas con el fin de escoger el más útil en la búsqueda de zonas estructurales que se suponen que están controlando la mineralización esmeraldífera. Se adelantó magnetometría, espectrometría de rayos gamma y electromagnetismo de muy baja frecuencia, encontrándose este último como el más exitoso. El método electromagnético de muy baja frecuencia (VLF-EM), se utilizó en las áreas de Gachalá, Playa Grande, Tavares - Monitos y Pacho, en un intento de detectar y trazar las estructuras regionales y locales. Adicionalmente en Gachalá se utilizó espectrometría de rayos gamma y en Playa Grande magnetometría. El método VLF-EM resultó muy útil en trabajos detallados, aunque para los sedimentos carbonáceos y amplias zonas de fractura se encontró que este método puede tener aplicación regional. Una sinopsis de los trabajos geofísicos realizados en las áreas mencionadas anteriormente se presenta en la tabla 1:

TABLA 1. Geofísica adelantada por el PNUD (1975)

AREA	KILOMETROS-LINEA	METODO GEFISICO
Gachalá	9,2	VLF-EM (detallada)
	2,2	SPEC (detallada)
Playa Grande	15,3	VLF-EM (detallada)
	1,2	MAG (detallada)
Tavares-Monitos	6,5	VLF-EM (detallada)
Pacho	203,4	VLF-EM (Regional)

En el área de Gachalá se realizaron estudios de VLF-EM y espectrometría de rayos gamma en las minas de Las Cruces, El Diamante y El Toro, situadas a 8 km de la población de Gachalá. En este sector se detectaron varias anomalías estrechamente relacionadas con la Falla dominante de San Fernando, así como otras estructuras que no se habían notado anteriormente y que se encuentran aproximadamente perpendiculares a esta zona. Las intersecciones de estas estructuras coinciden bien con las respuestas geoquímicas y en un caso con un área de producción esmeraldífera.

En Playa Grande se observaron indicaciones de una probable estructura a lo largo de las crestas de las sierras, contrario a las concepciones originales de la geología. Sin embargo, el levantamiento de mapas tectónicos detallados confirma la fuente estructural de algunas de estas respuestas del VLF-EM.

En el área de Tabares se llevó a cabo un estudio piloto con el método electromagnético de muy baja frecuencia (VLF-EM), el cual dio como resultado algunas indicaciones estructurales significativas, que sugerían un trabajo más detallado.

En los alrededores de Pacho se utilizó el VLF-EM a escala regional, empleándose los caminos disponibles como transversas y haciendo lecturas a intervalos de 0,2 kilómetros por toda el área; los resultados fueron distorsionados por zonas de lutitas carbonosas, interferencia de cables eléctricos, insuficiencia de accesos y áreas fracturadas dentro de los sedimentos, lo cual no permitió que el estudio regional fuera exitoso.

### **6.1.2 Prospección geológica y geoquímica, Aporte 1228, Guavio – Chivor (Arboleda, 1991)**

Con el fin de establecer y delimitar zonas de alto fracturamiento favorables para contener mineralizaciones de esmeraldas se realizó un programa de orientación para el uso de emanometría de gas Radón, aprovechando el conocimiento que se tiene de anomalías de uranio dentro del Grupo Farallones, lo cual permite pensar en flujos detectables de Radón a través de los espacios abiertos. Se seleccionó un área con fallamientos comprobados durante los trabajos de campo situada al oriente de la Inspección de Policía de Santa Rosa de Ubalá, sobre la confluencia de los ríos Guavio y Sucio y entre las quebradas Negra y La Esperanza, en rocas de la Formación Lutitas de Macanal afectadas por la Falla de Garabato y otras menores transversales a ella. Relacionadas a estas rocas se presentan las mineralizaciones conocidas como Providencia, Palacio y San Martín. En este trabajo se utilizó un equipo detector Pylon, modelo 1003 y se trazaron líneas de muestreo con dirección N30W con separación de 25 m entre líneas, y puntos de muestreo cada 25 m.

Al correlacionar los perfiles levantados con los resultados obtenidos en las tres líneas, tomando los valores de cuenta neta por minuto (CNPM) se pudo comprobar la existencia de una zona anómala comprendida en un segmento de 250 m, aproximadamente, la cual corresponde a la zona de influencia de las fallas de Providencia y Garabato, con rumbo general SW-NE, con las cuales se han relacionado las mineralizaciones conocidas en esta re-

gión. Los valores bajos obtenidos en varios segmentos se interpretan como sectores ocasionados por la correspondencia con suelos removidos para su uso en cultivos.

### **6.1.3 Exploración y evaluación de nuevas áreas potencialmente esmeraldíferas en el Cinturón oriental y occidental (Profesionales Asociados, 1996)**

La prospección geofísica llevada a cabo en el área de Páez se programó y ejecutó en razón a las características litoestratigráficas encontradas en las zonas clasificadas para realizar la investigación de semidetalle (escala 1:10.000), como es la zona de Upía I. En el área de Páez se efectuaron cinco sondeos eléctricos verticales (SEV) hasta profundidades de 200 m. Los SEV se efectuaron en la zona de Upía I, hacia la parte superior e inferior de la Falla de Upía, sobre sedimentos de la Formación Lutitas de Macanal. De la correlación de los SEV con la geología de la zona se elaboraron varios cortes o perfiles geoeléctricos del subsuelo, los cuales muestran la posición de la Falla de Upía y la correlación de las diferentes medidas geoeléctricas, en donde un bloque superior se compone de areniscas y el inferior de lutitas. Los valores bajos de resistividad también se pueden relacionar con el material brechoide encontrado en la zona fallada. En razón a la baja densidad de medida ocasionada a la compleja topografía, gran parte de la interpretación indicada se ha soportado con la tectónica cartografiada en la zona.

La geofísica permitió observar que en cercanías a la zona de la Falla de Upía se presenta el un subsuelo una mayor conductividad eléctrica, producto de una mayor concentración química en el fluido de saturación y/o una mayor mineralización en el material yacente hasta la máxima profundidad medida en la prospección que fue de 200 m. Lo anterior es concordante con los aspectos litológicos y estructurales definidos para el área mencionada, donde en cercanía de la Falla de Upía se ha cartografiado el material brechoide y, adicionalmente, la tectónica en la zona de falla origina una mayor permeabilidad secundaria en la roca, con una mayor vía de conducción de posibles fluidos hidrotermales.

### **6.1.4 Evaluación de espectros magnéticos de posibles zonas de mineralización asociadas a esmeraldas, en el Municipio de Macanal, Boyacá (Vásquez, 2003)**

La Universidad Nacional de Colombia dentro de la línea de profundización en Prospección Geofísica, ha llevado a cabo algunos trabajos de investigación en esmeraldas. La información base para adelantar estos estudios geofísicos fue adquirida dentro del marco del convenio de cooperación técnica, entre MINERCOL y la Universidad Nacional de Colombia, durante el desarrollo, en 2000, de un Proyecto de Evaluación Geofísica en zonas potencialmente esmeraldíferas, con una extensión aproximada de 60 km<sup>2</sup> en el Municipio de Macanal (Departamento de Boyacá), el cual presenta datos del Campo Magnético Total, junto con otros métodos tales como Radiometría, Resistividad y Electromagnetismo.

Vásquez (2003) llevó a cabo un análisis espectral del campo magnético total, el cual permitió detectar en profundidad varias fuentes magnéticas dentro de las cuales se deduce la presencia de minerales diamagnéticos y paramagnéticos, asociados al ambiente de formación de las esmeraldas, en el área de Macanal. Las fuentes superficiales se estimaron situadas entre los 40 y los 150 m de profundidad, otras fuentes más profundas se estimaron localiza-

das entre los 200 y 500 m de profundidad aproximadamente, y un tercer grupo de fuentes entre 800 y 2000 m de profundidad aproximadamente. Las fuentes diamagnéticas usualmente se asocian con sales tales como yeso o anhidrita y calcita. Las fuentes paramagnéticas se relacionan con sulfuros de hierro tales como pirita. Tanto la asociación mineral como la profundidad de localización estimada de las fuentes, están de acuerdo con las condiciones geológicas de formación de las esmeraldas en la Cordillera Oriental colombiana.

### **6.1.5 Evaluación magnetométrica, radiométrica y geoelectrica de los depósitos esmeraldíferos del distrito minero de Chivor, Departamento de Boyacá– Colombia (Ochoa, 2003)**

Ochoa (2003) realizó en los municipios de Chivor y Macanal una caracterización geofísica de algunos yacimientos esmeraldíferos y zonas de interés mediante los métodos de radiometría, emanometría, magnetometría, geoelectrica y electromagnetismo, en áreas previamente seleccionadas por geoquímica (Cardozo & Leal, 2000).

El estudio geofísico se dividió en dos fases; la primera denominada de cobertura rápida, se emplearon métodos magnetométricos y radiométricos de cubrimiento rápido, los cuales permitieron seleccionar áreas más pequeñas donde trabajos más detallados pueden definir con mayor precisión las estructuras de interés. En la segunda Fase o de cobertura lenta, se emplearon métodos de cubrimiento lento pero con mayor resolución, tales como electromagnetismo, geoelectrica y emanometría, en las zonas de interés previamente seleccionadas en la Fase I. Los métodos geofísicos fueron patronados en las zonas con actividad minera y posteriormente se aplicaron en los sitios de interés sin actividad minera, recomendándose su utilización en forma conjunta y no de manera individual para optimizar la interpretación y minimizar los costos.

La aplicación de estos métodos geofísicos permitieron identificar tres corredores correlacionables con sistemas de falla; así mismo, se definieron varias anomalías magnéticas significativas en las secciones realizadas entre:

- Cuernavaca – La Punta
- Quebrada La Negra – Quebrada Honda – Quebrada Minas.
- Quebrada Negra - Medianía

Con base en las consideraciones anteriores, se planteó una metodología indirecta de exploración para esmeraldas con herramientas geofísicas, que fueran útiles en la región de Macanal (Boyacá) y que además sirvieran como base para la exploración o prospección en otras regiones supuestamente de interés dentro de los cinturones esmeraldíferos colombianos, con un entorno geológico similar. Se sugiere tener en cuenta el método conocido como Geo-Radar, el cual con base en ondas electromagnéticas es posible detectar bajo ciertas condiciones específicas, las características de porosidad, conductividad, humedad y de fracturamiento en suelos y rocas hasta aproximadamente 100 m de profundidad.

Para futuros trabajos de prospección esmeraldífera en Colombia, se recomienda involucrar en los trabajos de exploración detallada, algunos de los métodos geofísicos mencionados anteriormente, los cuales utilizados conjuntamente con la información geológica, tectónica, geoquímica y minera, permitirían detectar zonas potencialmente esmeraldíferas, donde se

podrían iniciar inmediatamente desarrollos mineros, mediante apiques, trincheras, perforaciones o túneles, con el fin de determinar la productividad de estas áreas.

### **6.1.6 Otros trabajos de exploración**

López y Uribe (1989) emplean emanometría de gas radón con el objeto de implementar un nuevo método geofísico para encontrar fallas y fracturas, estructuras favorables para albergar las mineralizaciones de esmeraldas. Las fallas de Garabato y Providencia son inversas (en emanometría los valores menores de cuenta total corresponden a estas fallas y son causadas por el tipo de esfuerzos compresivos que tiende a sellar el plano de falla impidiendo, así, el movimiento de los gases).

Noriega (1995) hace una propuesta de experimentación para la prospección de esmeraldas por medio de la activación neutrónica, una de las aplicaciones de los métodos de sondeo geofísico de pozos. El análisis por activación neutrónica permite determinar en forma no destructiva el contenido de berilio en las rocas.

Cardozo (2000), en un trabajo realizado en el sector de Macanal concluye que se debe desarrollar además una segunda fase de la prospección geofísica en la cual se implemente un programa de adquisición de datos de resistividad eléctrica y electromagnetismo de los sitios más favorables obtenidos a partir de los métodos geofísicos. Al igual que en el caso de los métodos de magnetometría, espectrografía y emanometría, los perfiles de adquisición deben orientarse en dirección perpendicular a las estructuras geológicas y el diseño específico de adquisición será establecido con base en los resultados de perfiles de calibración de los métodos mencionados en las zonas de minería activa de la región. Con la aplicación de estos métodos se pretende modelar contrastes en resistividad eléctrica y/o conductividad que permitan definir la presencia de mineralizaciones de sulfuros y alteración hidrotermal asociadas a las mineralizaciones de esmeraldas en las brechas (Branquet et al., 1999a) o en los “ceniceros”, término utilizado por los mineros de la región.

Romero (2001) en su trabajo en los alrededores de Chivor concluye que después de conocer realmente las mejores áreas, se podrían implementar allí estudios geofísicos, para determinar la presencia de fracturas y venas que puedan estar relacionadas con la mineralización de esmeraldas, estos deben buscar plantear un modelo de contrastes de susceptibilidad magnética y delimitar sectores con anomalías de concentración de minerales radioactivos que puedan estar relacionados con zonas de fractura, para este fin se podrían aplicar programas de adquisición de datos de magnetometría y espectrografía en cada una de las áreas que sean seleccionadas.

## **6.2 CINTURÓN ESMERALDÍFERO OCCIDENTAL**

En este cinturón los trabajos geofísicos no han sido tan numerosos como en el cinturón oriental, destacándose los siguientes:

### **6.2.1 Report on exploration geophysics at the emerald mines near Gachalá, Cundinamarca (Kutterink, 1975)**

Dos métodos geofísicos fueron probados en las minas de esmeralda cerca de Gachalá en un intento por examinar algunos de los aspectos geológicos asociados a la mineralización. Los métodos, Electromagnetismo de muy baja frecuencia (EM-VLF) y Espectrometría de rayos gamma, fueron escogidos para complementar la exploración geoquímica en un esfuerzo por identificar la estructura geológica con el primer método, y cartografiar la distribución de elementos trazas radioactivas con el segundo. El objetivo del programa geofísico fue detectar y delinear estas indicaciones estructurales dentro y adyacentes a las zonas mineralizadas con esmeraldas utilizando EM-VLF. Como resultados se tiene que el método EM-VLF ha demostrado ser útil en la localización y definición de la estructura que controla el emplazamiento de esmeraldas dentro de las áreas de la mina así como los de un carácter más regional. Por lo tanto, se sugiere que los programas futuros de exploración hagan uso estas capacidades en la asociación cercana con métodos geoquímicos y cartografía geológica. El método de espectrometría de Rayos Gamma no ha producido el tipo de respuesta prevista, pero debería ser considerado si se desea un análisis *in situ* de la alteración potásica en un área limitada.

### **6.2.2 Exploración y evaluación de nuevas áreas potencialmente esmeraldíferas en el Cinturón oriental y occidental (Profesionales Asociados, 1996)**

Profesionales Asociados (1996) realiza una prospección geofísica en semidetalle, a escala 1:10.000, en el área de Florián utilizando métodos de Resistividad eléctrica con 12 SEV. Las medidas geoelectricas se llevaron hasta profundidades de investigación máxima de 100 m con el objeto de definir en profundidad la correlación litológica de las diferentes capas de interés geológico y la mineralización característica del subsuelo, en las veredas Santa Helena, Buenavista e Ibacapí-La Peña.

De la prospección geofísica se establece que las medidas geoelectricas se ejecutaron en áreas donde afloran rocas de las formaciones Paja y Rosa Blanca, algunas de estas áreas se ubican en zonas falladas. Varios SEV muestran una zona del subsuelo con muy bajos valores de resistividad (menores de 3 ohm/m) los cuales se correlacionan con una zona de alta alteración hidrotermal.

### **6.2.3 Exploración y evaluación de nuevas áreas potencialmente esmeraldíferas, sector Útica – La Palma (Exploraciones y Ensayos, 1997)**

Exploraciones y Ensayos (1997), en un trabajo para MINERALCO, emplea como método indirecto en la exploración de esmeraldas los sondeos eléctricos verticales. Esta técnica geoelectrica permitió observar que en cercanía de la zona fallada, Falla de Upía, se presenta en el subsuelo una mayor conductividad eléctrica producto de una mayor concentración química en el fluido de saturación y/o una mejor mineralización en el material yacente hasta la máxima profundidad medida en la investigación, que fue de 200 m.

## 7. QUÍMICA DE LAS ESMERALDAS

Análisis microtermométricos, Sonda Raman y SEM demuestran la presencia de sales ricas en H<sub>2</sub>O-NaCl-KCl-CaCl<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> incluidas en esmeraldas (Ottaway, 1991; Ottaway *et al.*, 1994), carbonato y pirita (Giuliani *et al.*, 1990a, c, d; Cheilietz *et al.*, 1994). La composición de los fluidos encontrados en estos minerales es homogénea y similar para las zonas esmeraldíferas oriental y occidental. Determinado por las edades <sup>40</sup>Ar/ <sup>39</sup>Ar, el modelo de subsidencia de la Cordillera Oriental y en el supuesto de presión litostática confinada, mediante extrapolaciones isocóricas se obtienen valores de presión y temperatura estimados en 1.1 kb y 290° a 360°C para la depositación de esmeraldas. Estudios de isótopos de oxígeno y carbono en cuarzo y carbonatos en todos los depósitos indican aguas de formación de la cuenca como origen de los fluidos mineralizantes (Giuliani *et al.*, 1992a, 1992b); resultados que posteriormente fueron confirmados por Ottaway *et al.* (1994) para la mina Quipama – Muzo.

### 7.1 VALORES DE $\delta^{34}\text{S}$

El origen de las soluciones fue investigado mediante estudio isotópico del azufre de la pirita sincrónica con la esmeralda (Giuliani *et al.*, 1993; 1995a). Los valores de  $\delta^{34}\text{S}$  de H<sub>2</sub>S en solución en equilibrio con pirita de seis depósitos de esmeraldas varían entre +14.8 a 19.4‰ mientras que pirita sedimentaria de los shales negros dan un  $\delta^{34}\text{S}$  de -2.4‰. El rango estrecho en  $\delta^{34}\text{S}$  entre los diferentes depósitos sugiere una fuente única y uniforme para los sulfuros. El valor alto de  $\delta^{34}\text{H}_2\text{S}$  sugiere la ausencia de participación de fuentes sulfurosas magmáticas o de shales negros del Cretácico temprano. Inyecciones salinas ocurren en las áreas esmeraldíferas y la explicación más probable para los valores altos de  $\delta^{34}\text{S}$  involucran la reducción de sulfatos evaporíticos sedimentarios marinos a sulfuros hidrogenados por la interacción con estratos ricos en materia orgánica. (Giuliani *et al.*, 1995a, b).

### 7.2 ESTUDIOS DE INCLUSIONES FLUIDAS

La composición química de inclusiones fluidas primarias en cristales de esmeraldas de la Mina Vega de San Juan (Distrito esmeraldífero de Gachalá) fueron estudiadas por microtermometría, con las técnicas SEM y Raman. Las inclusiones fluidas son de tres fases (Tipo 1) o inclusiones sólidas multifases (Tipo 2). El Tipo 1 corresponde a la asociación de fases halita, salmuera y gas. El Tipo 2 está constituido por salmuera y gas y los minerales hijos principalmente halita; las sales de cloruro de Ca-Fe y el KCl.CO<sub>2</sub> están ausentes en ambos tipos. El análisis Raman en las fases sólidas del Tipo 2 determinaron compuestos carbonáceos y de calcita. La presencia de salmueras CaCl<sub>2</sub>-NaCl está claramente eviden-

ciada por SEM y por las temperaturas eutécticas que van desde  $-56,1^{\circ}$  hasta  $-31,6^{\circ}\text{C}$ . Los rangos de halita  $T_f$  ( $T_{f_h}$ ) están entre  $284^{\circ}$  y  $326^{\circ}\text{C}$ . La temperatura de homogenización líquido-vapor está entre  $215^{\circ}$  y  $330^{\circ}\text{C}$ . La combinación de  $T_{f_h}$  y  $T_{mi}$  permitió la estimación de la salinidad total del fluido:  $(\text{H}_2\text{O})_{55}-(\text{NaCl})_{30}-(\text{CaCl}_2)_{15}$ . La constante  $T_{f_h}$  mostró que el fluido fue esencialmente homogéneo en la temperatura de cierre. Mientras que varios  $T_{f_h} > 300^{\circ}\text{C}$  para  $T_h = 250^{\circ}\text{C}$  indica que la solución estuvo en el límite de la saturación. En este caso, se puede admitir que  $T_{f_h}$  puede ser la temperatura real de formación de la inclusión ( $T = 300^{\circ} - 350^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 1,3 - 1,5 \text{ Kb}$ ). La presencia de salmueras de NaCl-CaCl<sub>2</sub> en las inclusiones fluidas primarias de los cristales de esmeraldas sugiere para los fluidos hidrotermales un origen de lixiviación de los niveles evaporíticos subyacentes (Giuliani et al., 1991)

Estudios de fluidos en cristales de esmeralda, cuarzo y fluorita de los depósitos de Yacopí, Coscuez, Cincho y Pava en el cinturón occidental y Aranado, Chivor y Gaudi, en el cinturón oriental, han sido realizados por Banks *et al.* (1995, 2000). Microtermometría de inclusiones primarias en esmeralda, cuarzo y fluorita han mostrado que las inclusiones fluidas tienen una salinidad aproximada de 40% en peso de NaCl y puede contener cantidades significativas de Ca, K, Fe y Mn. Minerales del mismo grupo, tales como halita, calcita, dolomita, parisita, siderita, pirita, esfalerita y silicatos también han sido identificados (Kozlowski *et al.*, 1988; Giuliani *et al.*, 1993). Las muestras provienen de los últimos estados de mineralización cuando la esmeralda fue precipitada junto con la fluorita, mientras que la mayoría de cuarzo se formó posteriormente. No hay diferencia sistemática entre las muestras de las zonas oriental y occidental. Sin embargo, las inclusiones en cuarzo sí tienen mayores concentraciones de Ca, Ba, Li, Fe, Mn, Pb, Zn, Cu y Br mientras que las esmeraldas tienen mayores valores de Na, Mg y SO<sub>4</sub> (Banks *et al.*, 1995, 2000).

Sobre la base de los halógenos, Banks *et al.* (1995) sugiere que hubo dos tipos de fluidos distintos presentes: el fluido E (inclusiones en esmeralda y fluorita) fue relativamente oxidante y dominado por Na, Cl y SO<sub>4</sub> con bajos niveles de otros cationes. El fluido Q (inclusiones en cuarzo) fue más reductor y estuvo dominado por Na, Ca, Cl con altos niveles de Fe, Pb, Zn, Ba, Sr etc., pero con bajo SO<sub>4</sub> o F. El fluido E reaccionó con los shales negros causando un blanqueamiento por la oxidación termoquímica de la materia orgánica por SO<sub>4</sub> para producir sulfuro reducido y CO<sub>2</sub> y liberar metales como Cr, V, Be, etc., dentro de la solución (Cheilletz & Giuliani, 1996). Este fluido fue dominante durante la precipitación de esmeralda y su subsiguiente interacción con el fluido Q, probablemente, haya sido la causa de la depositación de fluorita, pirita, dolomita y parisita (Banks *et al.*, 1995, 2000).

De otro lado, Romero & Hernández (1999) concluyen que las esmeraldas de San Antonio de Yacopí presentan características mineralógicas similares a las de otros distritos mineros como Chivor, Muzo, Pacho y Coscuez, las cuales fueron originadas a partir de un mismo fluido mineralizante, con temperaturas máximas entre  $300-350^{\circ}\text{C}$  y presiones mínimas de confinamiento entre 900 y 1000 bares, sugiriendo una cristalización en niveles de la corteza cercanos a la superficie. El comportamiento micrométrico y las fases presentes de iones en la parte líquida de las inclusiones fluidas permiten sugerir que el fluido mineralizante que generó las esmeraldas presentó iones disueltos en la fase acuosa, incluyendo K<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup>, Cl<sup>-</sup>, Fe<sup>+3</sup>, Mg<sup>++</sup>, Al<sup>+3</sup>, entre otros, lo que es común para todas las localidades esmeraldíferas de Colombia.

### 7.3 VALORES DE $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta\text{D}$

Los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  (delta del isótopo oxígeno 18) y  $\delta\text{D}$  (delta del isótopo  $^2\text{H}$  o Deuterium) para los carbonatos de los depósitos del cinturón esmeraldífero oriental varían de +17.7 ‰ y -61.7 ‰, respectivamente para la depositación de calcita fibrosa (estado no mineralizado), y +18.2 y -49.6, respectivamente para la calcita romboédrica y dolomita (estado mineralizado). La esmeralda tiene valores para  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$  de +17.2 y -27.8, respectivamente. El  $\delta^{18}\text{O}$  de los diferentes carbonatos y esmeraldas varía sobre un rango de 1 ‰ y tiene características de aguas de formación provenientes de la cuenca (Giuliani *et al.*, 1995b, 2000, Cheilletz, 1997).

Los análisis de  $\delta^{18}\text{O}$  hechos en muestras de esmeraldas representativas de 62 depósitos y ocurrencias de 19 países del mundo, a excepción de USA y Ucrania, han permitido definir tres grupos de oxígeno isotópico correspondientes a tres grupos de  $\delta^{18}\text{O}$  (Giuliani *et al.*, 1998), de la siguiente manera:

- Esmeraldas del primer grupo con valores de  $+6.2 < \delta^{18}\text{O} < 7.9$  ‰, corresponde a depósitos en Brasil (Cuadrilátero Ferrífero y Distritos de Anagé), Austria (Habachtal), Australia (Poona) y Zimbabwe (Sandawana).
- Esmeraldas del segundo grupo con valores de  $+8.0 < \delta^{18}\text{O} < 12.0$  ‰, corresponde a la mayor parte de los depósitos del mundo, como los de Zambia, Tanzania, Rusia, Madagascar, Pakistán (Kaltharo), y Brasil (Carnaíba y Socotó).
- Esmeraldas del tercer grupo con valores de  $\delta^{18}\text{O} > 12.0$  ‰, incluye los depósitos de Brasil (Santa Teresina de Goiás), Afganistán, Pakistán (Distrito de Swat – Mingora) y Colombia.

Las esmeraldas colombianas tienen las más altas composiciones de oxígeno isotópico encontradas en el mundo y su rango  $\delta^{18}\text{O}$  permite distinguir fácilmente las esmeraldas del Cinturón Oriental (Media =  $+16.8 \pm 0.1$  ‰) de las esmeraldas del Cinturón Occidental (Media =  $+21.2 \pm 0.5$  ‰) (Giuliani *et al.*, 1998).

### 7.4 ELEMENTOS MAYORES Y MENORES

La alteración hidrotermal de los shales se caracteriza por el desarrollo de albitización y carbonatación. La geoquímica de elementos mayores y menores de las zonas hidrotermales exhiben la lixiviación de  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y otros elementos trazas como Ba, Rb, Cr, V, Th. El análisis de REE en esmeralda o cuerpos y rocas encajantes muestra: - una importante lixiviación de REE de las lutitas negras acompañada por una redistribución parcial en carbonatos hidrotermales de REE como parisita y codazzita. - En el sistema hidrotermal, los REE fueron altamente móviles con altas relaciones agua/roca y los aniones carbonatos parecen incrementar la solubilidad de los REE pesados. - Anomalías negativas de Europio y positivas de Cerio en los minerales hidrotermales se interpretan como resultados del crecimiento de cristales en condiciones reductoras (Giuliani *et al.*, 1990d).

Blanco y Vargas (1993) realizan análisis químicos con microsonda para 10 elementos menores ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  y  $\text{Cl}$ ) y tres óxidos primordiales de la esmeralda ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{BeO}$ ). Se encontró una mayor proporción de  $\text{MgO}$  con relación a los demás elementos analizados. Así mismo, se detectó escasez de  $\text{Na}_2\text{O}$  que fue detectado en pocas muestras y comienza a serlo sólo cuando la concentración de  $\text{MgO}$  es mayor a 0,8% en peso, especialmente en Coscuez. El  $\text{CaO}$  se encuentra en concentraciones cercanas o bajo el límite de detección de la microsonda (0,01% en peso) y se presenta, principalmente, en las esmeraldas de Chivor. Se confirma la influencia del contenido de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

## 8. DATACIONES ISOTÓPICAS

### 8.1 DATACIONES $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

Dataciones  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en moscovita verde ricas en Cr-V contemporáneas con la formación de las esmeraldas han dado como resultado una edad de  $36 \pm 3$  Ma para los depósitos de Coscuez y  $32 \pm 3$  Ma para el depósito de Muzo-Quipama (Cheilletz *et al.*, 1994).

Muestras de moscovitas de las venas de la fase 2 en los depósitos de El Porvenir, Klein, San Gregorio y Agua Blanca han sido datadas por K-Ar y  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  (Cheilletz *et al.*, 1993a, 1994, 1995). Las dos muestras de Porvenir y Agua Blanca muestran el más regular espectro  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  con edades *plateau* de  $65.0 \pm 1.9$  Ma y  $65.2 \pm 1.4$  Ma, respectivamente. La edad  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de  $65 \pm 3$  Ma constituye la edad de formación de los depósitos de esmeralda del Cinturón Oriental (Cheilletz *et al.*, 1997).

Estas edades implican que la mineralización de esmeraldas habría ocurrido en períodos diferentes dentro de la evolución estructural de la cuenca antes del episodio compresional Andino (Mioceno tardío – Plioceno). Estas edades corresponden a la aceleración de la tasa de convergencia entre las placas Nazca y Sur América que provocó los fuertes movimientos tectónicos en los diferentes segmentos de los Andes colombianos y particularmente, en la Cordillera Oriental (; Cheilletz *et al.*, 1997; Laumonier *et al.*, 1996; Branquet *et al.*, 2002)

### 8.2 DATACIONES $\text{Rb}^{87}/\text{Sr}^{86}$

De otro lado, los estudios geoquímicos de rubidio y estroncio realizados en esmeraldas colombianas (Romero *et al.*, 2000) indican que éstas poseen bajas concentraciones en dichos elementos químicos, unido a una dispersión suficiente de sus valores. Para determinar su edad se hizo necesario el uso de errocrónas con contenido geológico. Se establecieron dos errocrónas, una de 67 Ma para los depósitos del Cinturón Occidental y otra de 61 Ma para Chivor, en el Cinturón Oriental. En general, la razón isotópica inicial del material del Cinturón Occidental ( $\text{Sr}_i = 0,713$ ) es relativamente baja y podría indicar alguna interacción con estroncio marino; la misma razón en el otro cinturón ( $\text{Sr}_i = 0,746$ ) es alta, denotando claramente una influencia de materiales isotópicamente maduros, probablemente de origen continental.

Romero *et al.* (2000) comentan que como evidencia de que las edades de 32-38 Ma, determinadas por Cheilletz *et al.* (1991) no corresponden a la evolución isotópica del sistema Rb/Sr impresa en las esmeraldas colombianas, se calcularon los valores isotópicos de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  para diversas razones  $\text{Rb}^{87}/\text{Sr}^{86}$  asumiendo una edad de 33 Ma, considerando una

faja de valores iniciales  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ . Los valores de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  determinados en su estudio y los extraídos de Vidal *et al.* (1992) se mostraron mayores que los de la isocrona de referencia de 33 Ma, argumentando así que una edad más antigua, como 61-67 Ma puede ser justificada.

## **9. MODELOS GENÉTICOS PROPUESTOS PARA LA FORMACIÓN DE LOS DEPÓSITOS DE ESMERALDAS EN COLOMBIA**

### **9.1 TIPOS DE DEPÓSITOS EN EL MUNDO**

En el mundo hay dos tipos principales de yacimientos esmeraldíferos:

- Un tipo de alta temperatura que se caracteriza por la presencia de intrusiones graníticas y pegmatíticas, asociadas a rocas máficas y ultramáficas afectadas por las soluciones metasomáticas ricas en potasio y sodio. Este tipo de yacimiento es el más frecuente en el mundo. Los yacimientos de Brasil son de este tipo. La mineralización de esmeralda se encuentra dentro de diques pegmatíticos o vetas de cuarzo que cortan las secuencias volcano-sedimentarias precámbricas (Giuliani *et al.*, 1990b,f; Cheilietz, 1998)
- El tipo colombiano, de baja temperatura, asociado con lutitas negras del Cretácico Inferior, metasomatizadas por fluidos ricos en sodio y calcio. Este tipo es único en el mundo porque no está asociado con rocas magmáticas; aunque los depósitos de Afganistán presentan algunas similitudes con los colombianos (Sabot *et al.*, 2000). La mineralización está asociada con brechas tectónicas presentando un cemento que se compone de carbonatos (calcita y dolomita), de pirita y albita. También se puede encontrar la esmeralda dentro de brechas hidráulicas o vetas de carbonatos.

### **9.2 MODELOS DE GÉNESIS PARA LAS ESMERALDAS COLOMBIANAS**

#### **9.2.1 Modelo de Beus & Meneev (1972)**

Sobre la base de la información geológica y geoquímica existente los depósitos de esmeraldas de la región de Muzo-Coscuez son considerados como productos de una actividad de soluciones hidrotermales comparativamente de baja temperatura ricas en CO<sub>2</sub>, S, Na, Ca y Mg. Pequeñas cantidades de F también tomaron parte en el proceso de mineralización.

La ocurrencia de pequeñas cantidades de clorita y talco en los shales negros metasomáticamente alterados permite considerar que la temperatura de mineralización no excedió la temperatura inicial la cual es característica de la facies metamórfica de esquisto verde (300°C – 400°C).

La carbonatación de los shales negros dentro de la “zona tectónica” puede ser considerada, en general, como el proceso de “lixiviación carbonatada ácida” de baja temperatura. El amplio desarrollo del fenómeno de lixiviación es el principal rasgo geoquímico de este es-

tado de mineralización el cual resulta en la cristalización de minerales de carbonatos en shales alterados y en las fracturas de las rocas.

La alta actividad de Na en soluciones relacionadas a K puede tomarse como evidencia de que un incremento en la actividad ácida existió todavía en las soluciones durante el estado de albitización.

El transporte de Be en las soluciones formadoras de minerales ocurrió, muy probablemente, en las formas de compuestos de carbonatos de flúor. Un incremento de la alcalinidad y un decrecimiento de la presión de  $\text{CO}_2$  tienen una influencia negativa crucial en la estabilidad de estos compuestos en solución. Tales condiciones primero pudieron ocurrir como resultado de la interacción roca-solución en las fracturas que cruzan la foliación de los shales. Esto explicaría la asociación esmeralda-parisita dentro de la zona fracturada con delgadas venas de cuarzo.

El principal problema del origen de los depósitos de esmeraldas en la Cordillera Oriental de Colombia, en general, y en la región de Muzo-Coscuez, en particular es la fuente del berilo. No es difícil explicar las soluciones de actividad hidrotermal dentro de las formaciones sedimentarias mesozoicas de la Cordillera Oriental bajo la influencia de procesos de metamorfismo regional (Según Beus & Meneev, 1972). Sin embargo, sin evidencias concluyentes adicionales no se puede explicar la ocurrencia de berilo en tales soluciones.

Pensando que el berilo es el elemento típico de una estructura tectónica regional particular de la Cordillera Oriental, Beus & Mineev (1972) se inclinan a apoyar la hipótesis de una fuente profunda endógena para el berilo en la parte de Colombia.

### **9.2.2 Modelo del PNUD (1975)**

La formación de las esmeraldas para PNUD (1975) ha tenido lugar en la siguiente forma: Los sedimentos en la cuenca marina estuvieron sometidos a presión, en relación con el aumento de espesor. Debido a los movimientos orogénicos posteriores las soluciones de aguas connotas y/o meteóricas se movilizaron a lo largo de los intersticios y posteriormente por grietas, fisuras y, eventualmente, a lo largo de fallas. Cuando se pusieron en contacto con illitas y otros minerales arcillosos bajo condiciones favorables de temperatura y presión y si la concentración salina fue suficientemente alta, los minerales arcillosos se transformaron en albita y oligoclasa a baja temperatura. Los aniones que quedan después de esta interacción, es decir  $\text{Cl}^{-1}$  y  $\text{CO}_3^{-2}$  y, eventualmente, otros junto con cationes tales como Mo, Pb, Li y otros excluyendo Be, dejan su medio cristalográfico bajo una removilización general. En esta etapa y las siguientes, cada elemento se comporta en la solución durante el transporte de acuerdo con sus propiedades: Mo, Pb, etc. En diferente grado se retiran del área lixiviada. El Be se transporta en complejos de Cl,  $\text{CO}_3$  y F. Estos complejos son, solamente, estables en un estrecho rango de PH y se tornarán inestables después de una corta distancia, debido al contacto con las rocas circundantes. A continuación puede tener lugar el depósito de berilo y en el caso de las lutitas negras ricas en Cr, se forman las esmeraldas.

### 9.2.3 Modelo hidrotermal - sedimentario

En los últimos diez años se han estudiado las características y evidencias de algunos depósitos, y se han establecido varias hipótesis para un nuevo modelo genético de las esmeraldas colombianas en el cual salmueras calientes provenientes de la cuenca, fueron los fluidos originadores de la mineralización. Estas salmueras enriquecidas en sulfatos y sodio, reaccionaron con la materia orgánica de las lutitas negras durante la reducción termoquímica del sulfato. La hipótesis mejor planteada por ahora, corresponden al modelo hidrotermal-sedimentario propuesta, simultáneamente, por Giuliani et al. (1990a,c,d, 1991a,b, 1995a,b); Cheilletz *et al.*, 1994; Cheilletz & Giuliani (1996, 1997, 1998) and Ottaway (1991); Ottaway *et al.* (1994); Branquet *et al.*, 1999a,b y Giuliani *et al.*, 2000). Cheilletz & Giuliani (1996) presentan un modelo con las siguientes dos etapas:

En la Etapa inicial I la tectónica compresional condujo al desarrollo de niveles de despegue en los dos flancos de la cordillera Oriental, particularmente dentro de las secuencias de lutitas negras del Cretácico inferior. La infiltración de fluidos hidrotermales fue canalizada a lo largo de los planos de cabalgamiento. Estos fluidos fueron expelidos desde la cuenca sedimentaria donde habrían disuelto las capas evaporíticas. Los fluidos son alcalinos, altamente enriquecidos en Na, Ca y Mg, con gran capacidad de promover una fuerte interacción fluido-roca con los shales negros; interacción caracterizada por metasomatismo de Na y Ca, llegando incluso a reemplazar masivamente a las lutitas negras circundantes, transformándolas en horizontes o lentes blancos de albititas. El proceso de metasomatismo de sodio y calcio, desarrolló las capas albitizadas y carbonatizadas, y a la vez ocasionó la lixiviación de Be, Si, Al, Cr, V y elementos de las tierras raras. Todo ello acompañado de un amplio desarrollo de un enrejado de venas de extensión, rellenas con calcita fibrosa y pirita, venas predominantemente paralelas a la estratificación.

En la Etapa II, el acortamiento general a que es sometida esta porción de la cordillera se refleja en el desarrollo de brechas a lo largo de fallas inversas y en los anticlinales por cabalgamiento, con el consiguiente retrabajamiento y brechamiento de las estructuras de la etapa I, es decir las capas de albititas. En las zonas apicales de las estructuras plegadas se generan pliegues disarmónicos y brechas hidráulicas, resultado del incremento de presión de los fluidos hidrotermales. La transición de la etapa I a la etapa II puede corresponder con cambios en la geoquímica del fluido (por ejemplo, disminución de la alcalinidad) y la subsecuente precipitación de esmeraldas. En la etapa II el relleno del enrejado de venas extensionales es diferente; la calcita es rombohédrica, acompañada de albita, pirita, cuarzo y a veces esmeraldas. Sin embargo, no se conoce la edad de las capas evaporíticas, de donde se originaron las salmueras hidrotermales; las inyecciones de sal – yeso o anhidrita pudieron estar asociadas con las estructuras de cabalgamiento y por tanto, ser afectadas por procesos de despegue en la cubierta sedimentaria. En tal sentido, la coexistencia espacial de los distritos esmeraldíferos y los depósitos de sal, es demasiado evidente que podría utilizarse como guía en la prospección de nuevos depósitos.

Se han obtenido dos grupos diferentes de dataciones para la formación de los depósitos de esmeralda por el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en moscovitas contemporáneas a la mineralización en los cinturones occidental y oriental: el límite Eoceno – Oligoceno (38-32 Ma; Cheilletz *et al.*, 1991) para las minas de Coscuez – Muzo y el límite Cretácico – Paleoceno (65 Ma;

Cheilletz *et al.*, 1995) para las minas de Chivor – Macanal. Nuevos estudios estructurales conducidos por el consorcio CNRS – MINERALCO redefinieron este modelo y concluyeron que los depósitos de esmeraldas de la Cordillera Oriental de Colombia se formaron en dos marcos tectónicos diferentes: (i) Durante una fase tectónica compresiva en el límite Eoceno – Oligoceno para los depósitos del cinturón occidental, y (ii) Durante el límite Cretácico – Paleógeno, durante un evento tectónico extensional, tipo escama, relacionado a una disolución de evaporita para los depósitos del cinturón oriental (Branquet *et al.*, 1999b). Más tarde ocurrió el levantamiento, plegamiento y cabalgamiento de los depósitos de esmeraldas durante la orogenia andina (Mioceno Medio) sincrónica a la inversión de la cuenca de la Cordillera Oriental (Cooper *et al.*, 1995; Branquet *et al.*, 2002)

Según Romero *et al.* (2000) las edades de 32-38 Ma, determinadas por Cheilletz *et al.* (1991) en los depósitos del Cinturón occidental, no corresponderían a la evolución isotópica del sistema Rb/Sr impresa en las esmeraldas colombianas. Romero *et al.* (2000) consideran que una edad más antigua, como 61-67 Ma puede ser justificada.

## 10. CONTROLES DE LA MINERALIZACIÓN Y GUÍAS DE EXPLORACIÓN

De manera general, un control litológico se deduce al observar que las mineralizaciones de esmeraldas conocidas suelen encontrarse en sedimentitas que hacen parte de secuencias de lutitas (shales) negras calcáreas, con altos contenidos de materia orgánica, y con menos frecuencia, en delgadas intercalaciones de lutitas negras en horizontes de calizas tabulares y lenticulares (Maya *et al.*, 2003). También es significativo el hecho de que las zonas productivas se encuentren haciendo parte o en cercanías a secuencias de evaporitas.

Desde el punto de vista control estratigráfico, las rocas encajantes de las mineralizaciones de esmeraldas (también de ocurrencias de plomo, zinc y cobre), corresponden con secuencias de rocas de edad Cretácico inferior.

La frecuente asociación entre mineralización de esmeralda, con zonas de milonitas y brechas en las que predomina una lutita bituminosa - grafitica y sistemas de fallas mineralizados, demuestra control estructural para las salmueras mineralizantes. En las zonas albitizadas (feldespatizadas) la orientación de los feldespatos en sentido paralelo a la foliación de las lutitas, el desarrollo de estructuras augen en albititas, es reflejo de condiciones de cristalización bajo grandes esfuerzos de cizallamiento (PNUD, 1975). Las condiciones estructurales permiten sugerir que la secuencia favorable a la mineralización, fue cabalgada a su actual posición, movimiento que fue seguido por los eventos mineralizantes. A nivel regional se reconocen estructuras que se pueden seguir por decenas de kilómetros y, aunque a nivel local se registren direcciones encontradas, en conjunto todo corresponde a un mismo cinturón tectónico.

El comportamiento de los elementos químicos presentes en las secuencias de lutitas negras demuestra control geoquímico que en las zonas favorables hay enriquecimiento de Na y lixiviación de Li, Pb, Mo y Sr. Así mismo se ha encontrado que no es necesario invocar el magmatismo como única fuente de Be para la formación de la esmeralda. Bajo condiciones apropiadas, aún con bajas concentraciones es posible extraer el Be de las lutitas negras, y en presencia de Cr y V, ser precipitado como esmeralda (Ottaway, 1991; Cheilietz & Giuliani, 1996). En todos los depósitos las venas con esmeraldas aparecen espacialmente asociadas con brechas estratiformes y albititas. La superposición de mapas tectónico-estructurales y mapas geoquímicos en los que se muestra el enriquecimiento en Na y lixiviación en los otros elementos, demuestra que algunos de los grupos de fallas quedan bien reflejados en los resultados geoquímicos (PNUD, 1975). El comportamiento de los elementos químicos presentes en el agua, sedimentos activos, suelos y rocas establece que la relación anómala de Na/K (mayor a 1.0) y aún las concentraciones anómalas de sodio y al-

gunos elementos de tierras raras constituyen un buen indicador a nivel regional y local para efectuar la exploración geoquímica (Mendoza, 1996).

A partir de los trabajos exploratorios regionales y detallados se han seleccionado diferentes tipos de controles de la mineralización y guías de exploración, los cuales se describen a continuación.

## **10.1 LITOLÓGICOS**

Las mineralizaciones se encajan en lutitas o shales negros del Cretácico Inferior. El modelo MINERALCO – CNRS indica que estas lutitas son ricas en materia orgánica, que presentan carácter calcáreo o que se intercalan o sobreyacen a capas o niveles (tabulares o lenticulares) de rocas carbonatadas y que en las zonas productivas o cerca de ellas se presentan depósitos de afinidad evaporítica. Para Carrillo (2001) no se tomarían en cuenta las secuencias del Cretácico medio y Superior, sin embargo, sería preferible no descartar tajantemente las secuencias sobreyacentes a los niveles esmeraldíferos, hasta tanto no se demuestre sus incapacidades físico químicas como rocas portantes o sus deficiencias químicas en los elementos primariamente relacionados con la génesis de las esmeraldas.

## **10.2 ESTRATIGRÁFICOS**

Las condiciones litológicas que caracterizan al entorno que contienen las mineralizaciones esmeraldíferas en Colombia corresponden a las unidades litoestratigráficas del Cretácico Inferior de la Cordillera Oriental. Al respecto, debe anotarse que, dado que las mineralizaciones de esmeraldas presentan un claro control estratigráfico, la cartografía 1:100.000 realizada por el INGEOMINAS en las zonas esmeraldíferas de Colombia presenta la validez suficiente para delimitar áreas que cumplan con este primer requisito exploratorio.

En el Cinturón Oriental, la Formación Calizas del Guavio se ha dividido en cinco miembros, a la base conglomerados, dos conjuntos de calizas y dos de lutitas. La Formación Lutitas de Macanal corresponde a una secuencia monótona de lutitas negras con esporádicas intercalaciones de calizas, areniscas y lentes de yeso.

En el Cinturón Occidental, la Formación Paja se ha dividido, de acuerdo a sus características litológicas, en cinco segmentos (A, B, C, D y E) permitiendo así, mejorar el conocimiento estratigráfico e identificar el nivel inferior A, junto con la parte superior de las Formación Rosablanca, como alojantes de la mineralización esmeraldífera. La Formación Rosablanca es predominantemente calcárea y la formación Paja corresponde en general con un conjunto de shales negros carbonosos portadores, en baja proporción de elementos cromóforos y del berilio, razón por la cual, esta asociación petroquímica favorece, según el modelo genético actualmente considerado como de mayor soporte, la formación de las esmeraldas, obviamente considerando factores físico químicos adicionales (Guerrero & Carrillo, 1997).

## **10.3 ESTRUCTURALES**

La sucesión de rocas del Cretácico Inferior presenta rasgos deformativos que sugieren un marcado control estructural y una fuerte deformación, evidenciada por la presencia de es-

estructuras de diferentes escalas, que podrían relacionarse a la generación de cabalgamientos por reactivación de fallas pre-existentes, a partir de las cuales se generan dos estilos tectónicos; uno tipo escama delgada que afecta únicamente rocas del Cretáceo, en el costado oriental del área y otra tectónica tipo escama gruesa, por la cual se genera la falla de La Salina al occidente del área y que afecta rocas precretáceas involucrando posiblemente el basamento (Guerrero & Carrillo, 1997).

Los distritos de Muzo, Quipama y Tequendama presentan las mismas estructuras con el cabalgamiento mayor de un conjunto superior que contiene el yacimiento sobre un zócalo de lutitas carbonosas silíceas. En ambas minas, los cabalgamientos (mayores y menores) son marcados por una brecha tectónica (cenicero). Estos cabalgamientos constituyen buenas guías porque cerca de ellos se presentan las estructuras trampas de la mineralización. Hay dos maneras de reconocerlos: (1) La presencia del “cenicero” que indica el plano por el cual los fluidos hidrotermales han sido drenados. La presencia de caolín indica, también, proximidad del cabalgamiento. (2) Cuando se presentan dos unidades que no tienen las mismas direcciones de estratificación se puede buscar el contacto para verificar si hay una brecha (cenicero) (López, 1995; Laumonier *et al.*, 1996)

Las estructuras trampas de la mineralización de esmeralda están conformadas por la fracturación hidráulica y las vetas de calcita romboédrica.

#### **10.4 ALTERACIÓN HIDROTHERMAL**

Diferentes trabajos han descrito la presencia de alteración hidrotermal. Para Pogue & Evanston (1916) la asociación de esmeralda, parisita, fluorita, apatito, albita y barita en una formación sedimentaria implica la introducción de material desde una fuente externa.

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 (PNUD, 1975)

La asociación mineralógica típica para las venas hidrotermales del yacimiento de Coscuez es calcita + albita. Los minerales accesorios en dicha asociación pirita, moscovita, cuarzo, dolomita. Durante el proceso hidrotermal se generaron dos fases de alteración metasomática sobre la roca encajante: carbonatación y albitización, los cuales pueden ser reconocidos en sectores específicos de la mina denominados El Amarillal y Zonas de Caolín, respectivamente (Aranguren & Rondón, 1998).

La roca encajante de la mineralización ha sufrido cambios importantes de sus características originales, debido al emplazamiento de ésta, siendo la albitización uno de los mas importante cambios que se puedan reconocer, y que además se encuentra directamente relacionado con los sectores productivos. Además de este proceso, también se reconocieron otros cambios como carbonatación, piritización, introducción de micas y pérdida o reemplazamiento de la laminación y del contenido de materia orgánica original de la roca, tam-

bién se pudo observar cloritización la cual corresponde a efectos diagenéticos. Según Romero (2000) no se encontraron características que indicaran efectos de metamorfismo; sin embargo, Beus (1979), Branquet (1999) y Branquet *et al.* (1999b) reportan la presencia de cloritoide en lutitas carbonosas silíceas.

## 10.5 INDICADORES GEOQUÍMICOS

Algunos elementos químicos presentes en sedimentos activos, suelos, rocas y aguas, tales como Na, LI, Ba, K, Pb, Mo, Zn, Cu, Sr y Ni, así como algunos elementos de Tierras Raras constituyen los mejores indicadores a nivel regional y local para detectar zonas mineralizadas. Los elementos guías son elementos que presentan un buen contraste al comparar su contenido en los sitios mineralizados con otros valores fuera de los distritos mineralizados, ya sea desde el punto de vista local o regional.

En el trabajo de prospección geoquímica local de Escovar (1975, 1979) realizado en el área de Gachalá, Cinturón Oriental, en rocas de la Formación Calizas del Guavio y de la Formación Lutitas de Macanal se presenta la siguiente síntesis sobre la distribución de los elementos en rocas y suelos:

### 10.5.1 Distribución de elementos en rocas

**Sodio.** Este elemento es el mejor indicador de mineralización tanto local como regional. 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 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 se sabe, productores de berilio. Esto es una prueba más del control de la alteración sobre la precipitación del berilio. La alteración metasomática 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 (Escovar, 1975, 1979)

**Litio.** Después del sodio, el litio es el elemento que mejor puede ser utilizado en la prospección de esmeraldas. 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 valores para los diferentes tipos de roca son más bajos en el área de minas que fuera del distrito minero. En conclusión, el litio muestra lixiviación en los sitios donde se ha comprobado mineralización de berilio, corroborando su utilidad como elemento indicador.

**Bario.** Después del sodio y el litio, el bario y el potasio son los mejores indicadores locales de mineralización, siendo notablemente lixivados en los lugares mineralizados. Los sitios mineralizados poseen los valores más bajos, seguido por las muestras de alteración. También, los valores en el área de minas son siempre más bajos que afuera del distrito minero.

**Potasio.** Este elemento muestra una gran lixiviación en los sitios mineralizados. Es por esto que se escogió junto con bario como un elemento indicador de berilio después del sodio

y el litio. Debido a que en muestras de alteración este elemento sufre mayor lixiviación fuera del distrito minero, este elemento 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.

**Plomo.** Después del sodio y litio, el plomo es el elemento que mejor se puede utilizar como indicador regional. 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 dado los buenos valores que presentan los factores de lixiviación, sirve como indicador regional. Especialmente las rocas alteradas dentro y fuera del distrito poseen un gran contraste en el contenido de plomo. Fuera del distrito minero existen manifestaciones de plomo.

**Berilio.** La utilidad de este elemento es mayor como guía para entender la génesis de estos depósitos y menor como guía de exploración. En los sitios mineralizados el contenido de Berilio en las rocas es menor que en los otros tipos de rocas que se presentan en el distrito minero, exceptuando los carbonatos los cuales normalmente tienen un bajo contenido de berilio. Esta lixiviación en las rocas es característica de las zonas mineralizadas. En las zonas alteradas hidrotermalmente fuera de los sitios mineralizados, existe una extrema lixiviación de berilio, sin embargo allí no se encuentran esmeraldas, lo cual puede ser explicado por la ausencia de sodio en las rocas producto de la alteración. En comparación con las rocas fuera del distrito minero, únicamente las lutitas negras en las zonas de minas se encuentran lixiviadas en berilio. Este hecho hace que el berilio no sea útil en la prospección regional de esmeraldas, teniendo mayor aplicabilidad como indicador detallado de la mineralización.

**Molibdeno.** 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, el sodio y el litio son considerados mejores indicadores. El molibdeno esta especialmente lixiviado en los sitios mineralizados, particularmente en las lutitas negras y en las rocas alteradas hidrotermalmente, que en las rocas fuera de las zonas de minas.

**Estroncio.** El comportamiento de este elemento es similar al bario y es útil como indicador regional más que local. Presenta buenos factores de lixiviación para lutitas y limonitas, materiales en los cuales puede ser utilizado como indicador regional de berilio.

**Zinc.** Tiene un comportamiento similar al del plomo; puede ser utilizado como indicador regional. Como el plomo, el zinc pose muy buenos valores de lixiviación, pero sus altos coeficientes de variación hacen que el plomo sea más utilizado en la exploración regional. Al igual que el plomo los contenidos de zinc en las zonas alteradas hidrotermalmente, dentro y fuera de las zonas de minas muestran un contraste muy significativo.

**Cobre.** Este elemento no parece ser útil en la exploración de berilio. Usualmente el cobre tiende a concentrarse en las zonas alteradas hidrotermalmente fuera del distrito minero; este fenómeno también se observa en los sitios mineralizados, aunque con una intensidad mucho menor.

### 10.5.2 Distribución de elementos en suelos

El mejor indicador de suelos es la relación Li/Na. Esta relación tiene, además, 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. En general, parece que las muestras de rocas son más representativas y mejores indicadores locales de mineralización que las muestras de suelo (Escobar, 1975, 1979).

En varios trabajos de exploración local se han aplicado estas fórmulas y se han sugerido otras. En los alrededores de la mina El Indio se propone el uso de la relación  $Be/(Be+Cr)$  en muestras de roca para delimitar áreas con posibilidades esmeraldíferas pues presentan buenos contrastes en su concentración. Las anomalías superpuestas en roca de Br, Cr, Mg coinciden en todos los sectores de la mina El Indio, con los valores altos obtenidos de las relaciones  $Br/(Be+Cr)$  y bajas de  $K \times 100/Na$ . La relación  $K100/Na$  en muestras de roca propuestas por Beus & Mineev (1972) y confirmada por Escobar (1975, 1979) se comprobó en la mina El Indio obteniendo buenos resultados en la prospección local de esmeraldas (Guerrero y García, 1986).

El comportamiento de los elementos químicos presentes en el agua, sedimentos activos, suelos y rocas establece que la relación anómala de Na/K (mayor a 1.0) y aún las solas concentraciones anómalas de sodio y algunos elementos de tierras raras constituyen el mejor indicador a nivel regional y local para efectuar la exploración geoquímica (Mendoza, 1996).

Al comentar sobre el comportamiento básico de los elementos químicos en las zonas mineralizadas y en las rocas encajantes, Giuliani *et al.* (1999) establecen que la lixiviación de casi todos los elementos mayores (K, Al, Si, Ti, Mg y P), elementos trazas (Ba, Be, Cr, Rb, Sc, U, V, B, C) y de las tierras raras de las lutitas negras está acompañada por su redistribución parcial dentro del relleno mineral de las venas.

Cheilletz *et al.* (1999) y Cheilletz & Royant (2001) utilizaron el método PCA en un estudio estadístico sobre una base de datos con 84 muestras colectadas en el depósito de Chivor y analizadas para elementos mayores y trazas por ICP-AES y ICP-MS. Ellos concluyeron que la fuerte interacción fluido/roca entre las sales basales y las lutitas negras cretácicas condujeron al metasomatismo sódico (albitización) y a intercambios catiónicos. Arriba del 80% (3 ppm) del contenido de Be original de las lutitas negras fue liberado y precipitado como esmeraldas. Adicionalmente, ellos proponen que el Be móvil de las lutitas negras está soportado por la fracción arcillosa (fase residual).

Según el PNUD (1975) el control geoquímico de la mineralización está marcado por los siguientes aspectos:

- La mineralización está acompañada por fuerte enriquecimiento en Na debido a la feldespaticización (oligoclasa – albita).
- Ocurre lixiviación en varios elementos.
- En el aspecto regional, los sedimentos de corriente muestran una buena relación entre valores anómalos para Na (alto), y valores anómalos para Li (bajo) y Pb (bajo).

- En la prospección semidetallada y detallada las muestras de suelos tienen una buena correlación entre los valores anómalos de Na (alto) y valores anómalos para Li (bajo), Pb (bajo), K (bajo), Sr (bajo) y Mo (bajo).
- El Be está lixiviado de las rocas y suelos en las zonas mineralizadas. La ocurrencia de esmeraldas se presenta como una redepositación de este elemento.

## 11. ÁREAS PRIORITARIAS PROPUESTAS

Los trabajos sobre prospección y exploración analizados en este documento presentan una serie de recomendaciones de áreas con interés para continuar con la exploración detallada en búsqueda de mineralizaciones esmeraldíferas.

### 11.1 CINTURÓN ORIENTAL

#### 11.1.1 Determinación de nuevos prospectos esmeraldíferos en el sector de Gachalá – Guavio – Chivor, departamentos de Cundinamarca y Boyacá (Carrillo, 1989)

Las siguientes áreas han sido catalogadas como zonas de prioridad II, o sea, sectores en los cuales, además de su ubicación cerca o dentro de zonas esmeraldíferas, se ha podido incrementar el grado de conocimiento geológico al punto de poder establecer factores litológicos, estratigráficos y estructurales favorables.

- Nazareth (4 km<sup>2</sup>)
- Las Mercedes (3.5 km<sup>2</sup>)
- Malacara (12 km<sup>2</sup>)
- Guácharos (4 km<sup>2</sup>)
- Floresta (2 km<sup>2</sup>)
- La Esperanza (10 km<sup>2</sup>)\*

(\* El trabajo original no muestra la localización de estas áreas).

#### 11.1.2 Prospección geológica y geoquímica, Aporte 1228, Guavio – Chivor (Arboleda, 1991)

Del análisis de la información geoquímica, estratigráfica y estructural, Arboleda (1991) en un trabajo de MINERALCO propone cuatro áreas prioritarias para estudios más detallados.

- Área IA. Localizada en la quebrada San Jorge muy cerca de la intersección de las fallas Garabato y San Jorge.
- Área IB. Ubicada sobre el río Rucio, cerca de las fallas Garabato y la Esperanza.
- Área IC. Localizada sobre la quebrada El Rosario en la zona de influencia de la Falla de Garabato.
- Área ID. Ubicado sobre un afluente de la quebrada El Rosario al sur de la zona IC.

### 11.1.3 Exploración y evaluación de nuevas áreas potencialmente esmeraldíferas en el Cinturón oriental y occidental (Profesionales Asociados, 1996)

Luego de integrar la información obtenida se postula que en el área de Páez se encontraron características geológicas y geoquímicas especiales que llevan a señalar una zona como de potencialidad para adelantar una futura exploración detallada de esmeraldas con trabajo de mayor detalle, correspondiente a la quebrada El Salitre en cercanías a la mina de yeso, Zona Upía, con coordenadas:

$$X_1=1.057.000, Y_1=1.116.000$$

$$X_2=1.056.000, Y_2=1.117.300$$

$$X_3=1.055.000, Y_3=1.115.000$$

$$X_4=1.054.800, Y_4=1.116.000$$

El área propuesta se ubica a unos 3 kilómetros al SE del casco urbano del municipio de Páez y por las características planteadas en el trabajo, reúne todas las condiciones necesarias para ser catalogada como un prospecto a tomar en cuenta en caso de realizar una exploración para esmeraldas.

### 11.1.4 Proyecto de exploración de áreas potencialmente esmeraldíferas en un sector de Páez – Campohermoso – Macanal, Departamento de Boyacá (Cardozo & Leal, 2000)

Cardozo y Leal (2000) realizan una revisión geológica y geoquímica en un área de, aproximadamente, 125 km<sup>2</sup>, en el Municipio de Macanal, Departamento de Boyacá. Las áreas anómalas definidas mediante la prospección geoquímica se presentan en la tabla 2, sin que el orden de éstas implique una cierta importancia.

Tabla 2. Áreas promisorias en el sector Páez – Campohermoso – Macanal

Áreas	Coordenadas E	Coordenadas N	Localización Geográfica	Observaciones
1	1.092.170 1.094.130	1.048.380 1.046.275	Vereda La Serranía	-
2	1.090.175 1.091.690	1.046.790 1.044.460	Vereda San Pedro Muceño	-
3	1.089.350 1.090.625	1.045.250 1.043.675	Vereda Aguablanca Grande	Mina de esmeraldas
4	1.087.720 1.089.505	1.043.110 1.041.555	Vereda Peñablanca	Mina de yeso
5	1.085.465 1.086.200	1.036.485 1.035.480	Túnel El Salitre Túnel El Polvorín	-

### **11.1.5 Otros trabajos de exploración**

López & Uribe (1989) concluyen que la utilización de la fórmula para prospección regional de esmeraldas dio como resultado los siguientes seis lugares aptos para la exploración: cerca de la mina de Providencia (cruce entre las fallas de La Negra y Providencia), mina de San Martín, mina de Montecristo y al sur de la mina de Montecristo, cerca a la quebrada Castalia. Otras áreas de menor importancia pero con posibilidades de contener esmeraldas son las siguientes: en la intersección entre las fallas de San Juanito y de Providencia y en la intersección entre las fallas de La Esperanza y Providencia. Los autores proponen zonas puntuales ubicadas pocos kilómetros al SE de las minas de Chivor, en sectores que son considerados en general, como de un gran potencial esmeraldífero.

Zafra (1996) identifica una anomalía de Na/K en la región del Guavio – Chivor entre las coordenadas  $X = 1.030.000$ ,  $Y = 1.078.000$ , y  $X = 1.032.000$ ,  $Y = 1.080.000$ . Los  $4 \text{ km}^2$  planteados se ubican unos 3 km. al NE de las minas de Chivor y en concepto de los autores presenta características promisorias para la prospección esmeraldífera. El planteamiento se enmarca dentro de la lógica circunstancial ya que el área corresponde a la prolongación de las mineralizaciones explotadas en Chivor.

Cardozo (2000) recomienda por prospección geoquímica dos zonas; la primera está situada hacia el costado nororiental de la esquina suroriental del embalse de Chivor, que tiene aproximadamente 1 km en dirección NS y 800 m en la dirección E-W. La segunda zona se localiza aproximadamente a 4 Km al oriente de Macanal y presenta 2 Km en la dirección E-W y 1,5 Km en la dirección N-S.

Gelvez & Villamizar (1991) definen cuatro zonas promisorias por medio de prospección geoquímica, en los municipios de Ubalá y Almeida, Cinturón Oriental, localizadas en la confluencia de la quebrada San Jorge con el río Sucio, parte baja del río Sucio, parte media de la quebrada El Rosario, y en la vertiente sur de la quebrada El Rosario.

## **11.2 CINTURÓN OCCIDENTAL**

### **11.2.1 Exploración zona de reserva nacional para esmeraldas Muzo-Coscuez, Boyacá, área suroriental (Mendoza P.G.A., 1991)**

Como resultado de la prospección en detalle (escala 1:5.000) se seleccionaron las siguientes áreas (para ser estudiadas a escala 1:1.000):

- Primera prioridad: Área Loma El Silencio, 56 Ha ubicadas en el sector de la loma del mismo nombre.

$X_1=1.113.200$ ,  $X_2=1.114.000$ ;

$Y_1=991.180$ ,  $Y_2=991.880$

- Segunda prioridad: Área La Culebrera, 40 Ha ubicada al occidente de la quebrada Desaguadero.

$X_1=1.112.700$ ,  $X_2=1.113.500$

$Y_1=990300$ ,  $Y_2=990800$ ).

Área El Almendro, 42 Ha ubicadas al oriente de la quebrada del Desaguadero.

$X_1=1.112.600$ ,  $X_2=1.113.200$

$Y_1=990.900$ ,  $Y_2=991.600$

- Tercera prioridad: Área El Triunfo, 162 Ha ubicadas en las inmediaciones de la quebrada La Terry).

$X_1=1113000$ ,  $X_2=1114000$ ;

$Y_1=991880$ ,  $Y_2=993500$

Área Sábripa, 165 Ha ubicadas sobre las inmediaciones de la quebrada Las Pavas.

$X_1=1.106.500$ ,  $X_2=1.107.500$

$Y_1=990.000$ ,  $Y_2=991.500$

- Cuarta prioridad: Área El Garabato, 100 Ha ubicadas cerca del caserío de Niaunza.

$X_1=1.103.000$ ,  $X_2=1.104.500$

$Y_1=993.500$ ,  $Y_2=994.500$

### **11.2.2 Programa de exploración geológica en zonas promisorias para la exploración de esmeraldas en Yacopí, Cundinamarca, y Coscuez – Peñas Blancas – San Pablo de Borbur, Boyacá, Colombia (Castañeda, 1996)**

Por análisis comparativo de Na/K se recomiendan las siguientes áreas:

- Zona al norte de la confluencia de la Quebrada La Mina y El Fraile
- Parte intermedia de la confluencia sur-norte de la Quebrada La Mina.

### **11.2.3 Exploración y evaluación de nuevas áreas potencialmente esmeraldíferas en el Cinturón oriental y occidental (Profesionales Asociados, 1996)**

En el informe final del área de Florián, Municipio de Florián departamento de Santander, las zonas más atractivas para desarrollar en un futuro trabajos detallados son las siguientes:

Zona de la Quebrada Río Bamba –Quebrada San Roque:

$X_1=1.130.000$ ;  $Y_1=1.005.000$

$X_2=1.130.500$ ;  $Y_2=1.005.500$  al sur

$X_3=1.131.325$ ;  $Y_3=1.006.600$

$X_4=1.131.325$ ;  $Y_4=1.006.750$  al norte.

Zona del Río Minero-Buenavista:

$X_1=1127650$ ;  $Y_1=1000400$

$X_2=1127500$ ;  $Y_2=1001000$

$X_3=1127300$ ;  $Y_3=1000000$

$X_4=1126600$ ;  $Y_4=1000600$ .

Utilizando la fotogeología se identificó una zona de brecha caracterizada por geomorfología que corresponde al segmento de Brecha de Buenavista, la cual está definida por las siguientes coordenadas:

X<sub>1</sub>=1.130.366; Y<sub>1</sub>=1.000.800 al norte

X<sub>2</sub>=1.128.585; Y<sub>2</sub>=1.000.000 al oeste

X<sub>3</sub>=1.129.000; Y<sub>3</sub>=1.001.563 al este

X<sub>4</sub>=1.126.552; Y<sub>4</sub>=1.000.557 al sur.

#### **11.2.4 Exploración y evaluación de nuevas áreas potencialmente esmeraldíferas, sector Útica – La Palma (Exploraciones y Ensayos Ltda., 1997)**

La prospección geoquímica de sedimentos activos permitió definir dos áreas para realizar un muestreo geoquímico en suelos que siguió las recomendaciones del PNUD (1975). Las áreas fueron la región Pinzaima en rocas de la Formación Murca (contenido arenoso-lutítico) y la región de Murca, parte norte del municipio de El Peñón, región sureste del municipio de La Palma y regiones aledañas, con rocas lutítico-carbonosas, en ocasiones calcáreas, con gran similitud con la Formación Paja del área de Muzo – Coscuez.

Respecto a la potencialidad se sugiere descartar las zonas de Nimaima – Útica y el sur del municipio de La Peña, por no presentar ninguna evidencia mineralógica ni geoquímica. En cambio, se recomienda continuar los trabajos de exploración con mayor detalle en la región de la Inspección de Murca, parte norte del municipio de El Peñón, región sureste del municipio de La Palma y regiones aledañas, pues en estas localidades los resultados de los trabajos sugieren la presencia de esmeraldas.

#### **11.2.5 Atlas Colombiano de Información Geológico-Minera para Inversión – ACIGEMI (INGEOMINAS, 2000)**

La definición del área de influencia para exploración de los cinturones esmeraldíferos, tanto al NE como al SW a partir de los distritos mineros conocidos, ya ha sido establecida por el INGEOMINAS mediante la elaboración del mapa de áreas potenciales para la exploración de esmeraldas a escala 1:500.000 (Plancha, 5-09) y de piedras preciosas en Colombia a escala 1:1.500.000. Las zonas potenciales para esmeraldas en los dos cinturones fueron seleccionadas con base en la ponderación de la información geológica, tectónica, geoquímica, inventario mineral y metalogénica, lo cual permitió establecer áreas potenciales con alto, medio y bajo grado. Con base en lo anterior se pudo establecer que el área de influencia del cinturón occidental es de 290 km de longitud por 50 km de ancho, mientras que el cinturón oriental presenta 270 km de largo por 35 km de ancho.

## 12. DISCUSION FINAL Y CONCLUSIONES

Según Branquet *et al.* (1997), aparte del proceso geoquímico formador de las esmeraldas (proceso hidrotermal – sedimentario) que básicamente fue el mismo para ambos cinturones, las dos zonas esmeraldíferas difieren en varios puntos: 1) en el Cinturón occidental los fluidos mineralizadores fueron generados en un nivel evaporítico localizado en algún lugar por debajo de los depósitos de esmeraldas, a partir del cual migraron hacia arriba convirtiéndose en fluidos sobrepresionados en las secuencias sedimentarias encajantes, en donde se desarrollaron brechas hidrotermales e intenso fracturamiento hidráulico a lo largo de planos de cabalgamiento y zonas de fallas por efecto de una tectónica compresiva. 2) En el Cinturón oriental todo el proceso geoquímico (fluidos) tuvo lugar dentro de la secuencia sedimentaria mineralizada, la cual contenía el nivel evaporítico con relación a una tectónica distensiva. 3) En el Cinturón oriental los depósitos esmeraldíferos se pueden considerar como autóctonos, mientras que en el Cinturón occidental los depósitos se pueden decir que son alóctonos, si se tiene en cuenta el origen de los fluidos mineralizadores. 4) En el Cinturón occidental las trampas para la mineralización son pequeñas, pero son estructuras compresivas complejas que se encuentran siguiendo fallas de desplazamiento horizontal (*tear faults*), mientras que los depósitos en el Cinturón oriental se encuentran dispersos a lo largo de un nivel brechado regional. 5) En los depósitos esmeraldíferos del Cinturón oriental como en el Cinturón occidental, espesas secuencias impermeables de lutitas (formaciones Macanal y Paja, respectivamente) han actuado como capa sellante para los fluidos hidrotermales.

La idea de una fuente magmática profunda sólo puede ser aceptada cuando se encuentre una relación clara entre la actividad magmática dentro de la región mineralizada con los depósitos esmeraldíferos. La idea contraria a esta hipótesis, que sugiere la posibilidad de que el berilio fuera lixiviado por aguas connatas ricas en  $\text{CO}_2$  y  $\text{SO}_4$  provenientes de las rocas que la rodeaban seguida por su reprecipitación en la forma de berilo (esmeralda) bajo influencia de los procesos hidrotermales (procesos metamórficos de presencia local<sup>1</sup>), parece una idea más atractiva. Esta hipótesis tiene credibilidad porque hay una lixiviación leve del berilio de las lutitas dentro de las zonas tectónicas mineralizadas y hubo, probablemente, abundancia de aguas connatas ricas en  $\text{NaCl}$  y  $\text{CaSO}_4$  durante el proceso mineralizador (metamorfismo<sup>1</sup>). Existe un número de domos de sal dentro y fuera de la región en esta parte de la Cordillera Oriental colombiana. Sin embargo, considerando el hecho de que no hay usualmente altos contenidos de Be (en comparación con su abundancia media en lutitas) en las rocas de la región con mineralización esmeraldífera, es necesario admitir que esta hipótesis de la lixiviación (metamórfica<sup>1</sup>) requiere una justificación adicional, la cual puede ser obtenida solamente en el curso de otros estudios geológicos y geoquímicos sistemáticos que se adelanten en la región esmeraldífera (Beus, 1979).

(<sup>1</sup>Términos y conceptos empleados por Beus, 1979. Nota de los autores de esta compilación).

A partir de los diversos estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos realizados en los cinturones esmeraldíferos se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Los depósitos de esmeraldas en Colombia están localizados en dos cinturones que hacen parte de los flancos oriental y occidental de la Cordillera Oriental. El cinturón oriental comprende los distritos de Gachalá, Chivor y Macanal; el cinturón occidental contiene los distritos de Peñas Blancas, Coscuez, Muzo, La Pita y Yacopí.
- Los depósitos de esmeraldas en Colombia han sido considerados, hasta los últimos años, únicos en el mundo y difieren drásticamente de los más conocidos, depósitos tipo esmeralda – esquistos verdes, los cuales se encuentran relacionados con ambientes de granito – pegmatita. (Giuliani *et al.*, 1995b). Sin embargo Sabot *et al.* (2000) reportan datos geológicos y geoquímicos que indican que los depósitos de esmeraldas de Afganistán, localizados en el Valle de Panjshir, se formaron por lixiviación de evaporitas, tal como es el caso de los depósitos de esmeraldas en Colombia.
- El reconocimiento de que los depósitos de esmeraldas de Colombia no son únicos ofrece la posibilidad de exploración para este nuevo estilo de depósito en áreas previamente no consideradas como probables blancos de exploración por los modelos clásicos de formación de esmeraldas (Sabot *et al.*, 2000)
- Los yacimientos colombianos corresponden a depósitos estratoconfinados, con un rango de temperaturas de aproximadamente 300°C (mesotermiales), formados en ambientes sedimentarios y producidos a través de reducción termoquímica de salmueras ricas en sulfatos y ácidos sulfurosos por interacción con estratos ricos en materia orgánica (Cheilletz & Giuliani, 1996).
- Las esmeraldas colombianas tienen las más altas composiciones de oxígeno isotópico encontradas en el mundo y su rango  $\delta^{18}\text{O}$  permite distinguir fácilmente las esmeraldas del cinturón oriental (Media =  $+16.8 \pm 0.1\%$ ) de las esmeraldas del Cinturón Occidental (Media =  $+21.2 \pm 0.5\%$ ) (Giuliani *et al.*, 1998).
- Dataciones  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en moscovita verde ricas en Cr-V contemporáneas con la formación de las esmeraldas en muestras del cinturón occidental han dado como resultado una edad de  $36 \pm 3$  Ma para los depósitos de Coscuez y  $32 \pm 3$  Ma para el depósito de Muzo-Quipama (Cheilletz *et al.*, 1991) y de  $65 \pm 3$  Ma para el depósito de Agua Blanca perteneciente al Cinturón oriental (Cheilletz *et al.*, 1995). De acuerdo a estas edades, la mineralización de esmeraldas habría ocurrido en períodos diferentes dentro de la evolución estructural de la cuenca antes del episodio compresional Andino (Mioceno tardío – Plioceno) (Cheilletz *et al.*, 1995). De otro lado, Romero *et al.* (2000) indican que las esmeraldas colombianas poseen bajas concentraciones en dichos elementos químicos, unido a una dispersión suficiente de sus valores. Romero *et al.* (2000) establecieron dos errocronas, una de 67 Ma para los depósitos del Cinturón Occidental y otra de 61 Ma para Chivor, en el Oriental.
- Los datos de inclusiones fluidas y de azufre isotópico soportan fuertemente un modelo hidrotermal-sedimentario para la mineralización de esmeraldas en Colombia (Giuliani *et*

*al.*, 1995b). El estudio de inclusiones fluidas ha revelado salmueras de cloro hipersalinas compuestas por Na-Ca-K. Los valores de  $\delta^{34}\text{S}$  en pirita de las venas de esmeralda corresponden con azufre isotópicamente pesado. La interpretación más probable involucra la reducción de sulfatos marinos sedimentarios de origen evaporítico.

- Los depósitos de Colombia producen parte de las esmeraldas de más alta calidad en el mundo y su producción es una de las mayores en el mercado internacional, aproximadamente el 60%. Esto le otorga una excelente posición en el mercado. Sin embargo, el hecho de no poseer, actualmente, un programa serio de exploración de nuevos depósitos impide el desarrollo de esta y una industria fuerte en la talla y engaste hace que las ganancias mayores queden fuera del país a través de compañías internacionales especializadas en estos procesos (UPME, 2000).
- La mineralización de esmeraldas está restringida a características litológicas muy bien definidas; las lutitas negras carbonosas parecen ser la unidad litológica más favorable para la mineralización.
- Todas las minas y zonas mineralizadas conocidas están situadas en las zonas de fallamiento entrecruzado; esta zona de intersección tiene una expresión topográfica de “zona colapsada” tectónicamente, aspecto que es fácilmente reconocible en fotografías aéreas. Estudios estructurales detallados en las principales minas de esmeraldas evidencian estructuras tectónicas (cabalgamientos, rampas, fallas) como trampas de la mineralización.
- Giuliani *et al.* (1999) y Cheillett & Royant (2001) establecen el comportamiento básico de los elementos químicos en las zonas mineralizadas y en las rocas encajantes así: la lixiviación de casi todos los elementos mayores (K, Al, Si, Ti, Mg, P), elementos traza (Ba, Be, Cr, Rb, Sr, U, V, B, C) y de las Tierras Raras de las lutitas negras es acompañada por su redistribución parcial dentro del relleno mineral de las venas.
- Las guías de exploración deben ser consideradas desde dos puntos de vista en los cinturones esmeraldíferos; uno es el aspecto regional y otro el aspecto local. A nivel regional se pueden tener en cuenta criterios de exploración que son comunes, mientras que a escala detallada las guías o criterios de exploración son muy específicos para un cinturón en particular.
- Finalmente, se concluye que la hipótesis mejor planteada por ahora, corresponde al modelo hidrotermal-sedimentario propuesto por Giuliani *et al.* (1990a), Ottaway *et al.* (1994) y Cheillett & Giuliani (1996). De acuerdo a esta hipótesis, salmueras calientes provenientes de la cuenca fueron los fluidos originadores de la mineralización. Estas salmueras, enriquecidas en sulfatos y sodio, reaccionaron con la materia orgánica de las lutitas negras durante la reducción termoquímica del sulfato y posterior formación de esmeraldas. Hasta ahora, el modelo hidrotermal-magmático no ha sido respaldado por los resultados de los estudios científicos.

### 13. RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones tienen como objetivo principal facilitar la prospección y exploración de áreas con potencial mineral, las cuales deben adaptarse de acuerdo con la escala de trabajo y características geológicas de la zona.

- La determinación de las concentraciones de sodio y potasio son importantes en la exploración regional y detallada de mineralizaciones esmeraldíferas, particularmente la de sodio. La relación Na/K manifiesta un claro control litológico en las unidades investigadas y puede considerarse como guía para cartografía en regiones con una estratigrafía complicada (PNUD, 1975).
- La Falla de la quebrada La Caco es un rasgo estructural importante en la interpretación del área. En términos geoquímicos, limita al norte una provincia oxidante, con relaciones elementales características de ambientes postmagmáticos alcalinos; al sur las asociaciones geoquímicas están relacionadas con efectos de alteración metasomática. Esta falla condicionó el movimiento de bloques precretáceos ejerciendo un control sobre la sedimentación y la posterior erosión de niveles mineralizados yacentes sobre la litología calcárea (Mendoza, 1996).
- Se sugiere el uso de la relación  $K_2O/Na_2O$  en sedimentos de corriente como guía de exploración en la “zona tectónica” mineralizada con esmeraldas en esta parte del cinturón de esmeraldas colombianas. En este caso la relación menor que 1.0 puede ser tomada como una indicación favorable de la presencia de algunos shales albitizados localizados en alguna parte del área drenada por la corriente muestreada (PNUD, 1975).
- La densidad de muestreo en los sedimentos activos debe ser de 1,5 muestras por  $km^2$ , para cubrir en lo posible todos los tributarios de la cuenca (PNUD, 1975).
- La prospección de esmeraldas por medio de la activación neutrónica es una de las aplicaciones de los métodos de sondeo geofísico de pozos que permitiría aumentar la eficiencia de la exploración y explotación del recurso esmeraldífero del país. El análisis por activación neutrónica permite determinar en forma no destructiva el contenido de berilio en las rocas (Noriega, 1995).
- Con el fin de determinar áreas favorables para una mineralización esmeraldífera, Mendoza (1996) considera importante tener en cuenta los siguientes parámetros:
  1. Presencia de nivel lutítico de facies calcáreo-carbonosa y estratificación fina, localizado hacia el techo de la Unidad de Lutitas calcáreas y base de la Unidad de Lutitas Carbonosas de edad Cretáceo Inferior.

2. Existencia de zonas de brechas y venas paralelas y/o cortando la estratificación con presencia de algunos de los minerales asociados a las esmeraldas.
3. Tectónica de tipo distensivo, con fracturamiento aproximado N60E y N40W, desarrollada dentro de un modelo compresivo regional.
4. Valores geoquímicos en rocas con la relación Na/K mayor a 1,0.
5. Interpretación de elementos trazas asociados a la génesis del yacimiento: Y, La, Be, Mo.
6. Procesos genéticos relacionados a actividad hidrotermal - neumatolítica, ausencia de metasomatismo potásico e influencia de aguas congénitas y meteóricas.

- El PNUD (1975) hace las siguientes recomendaciones para la prospección regional:

1. Interpretación fotogeológica para localizar zonas de intersección de fallas longitudinales y fallas de rumbo.
2. Cartografía geológica de las zonas anteriores para confirmar la existencia de las fallas, determinar si hay abundancia de lutitas negras en los alrededores.
3. Muestreo de sedimentos activos del área. La densidad de muestreo debe ser de 0,7 – 1,0 muestras por km<sup>2</sup> y se deben cubrir todos los tributarios y arroyos. Los valores anómalos para Na, Li y Pb indican áreas potencialmente favorables para esmeraldas.
4. Delimitación de las anomalías por medio de muestreos detallados de sedimentos activos y de suelos en una retícula de 100m por 100m. Al mismo tiempo, la cartografía geológica detallada y levantamientos geofísicos por el método electromagnético de muy baja frecuencia.
5. Para muestras de roca se puede establecer un patrón geoquímica de la anomalía utilizando la relación

$$(\text{Na}\%)^3$$

---


$$(\text{Li ppm}) (\text{K}\%) (\text{Ba ppm})$$

6. Con base en las anteriores etapas se hace la evaluación por medio de trabajos mineros de perforaciones. Se recomienda el uso de destapes y trincheras con el lavado del material recogido.

- Para la zona de Muzo el PNUD (1975) recomienda en la prospección geoquímica tener en cuenta los siguientes puntos:

1. Se recomienda el uso de la relación K/Na en sedimentos de corrientes como guía de prospección geoquímica regional.
2. Como método de prospección geoquímica detallada se recomienda el uso de los valores para Mo en suelos y la relación K/Na en rocas.

- Las Recomendaciones para la exploración dentro de las minas existentes son las siguientes (PNUD, 1975):

1. Se debe establecer un patrón geoquímico de las minas existentes con un muestreo de roca aplicando la fórmula combinada anteriormente mencionada.
2. Se deben realizar perforaciones y analizar los núcleos, y realizar cartografía de los patrones de fallamiento, vetas y brechas.
3. Se debe realizar un muestreo regional (a granel) de brechas y vetas en zonas con indicaciones positivas en relación con la fórmula combinada.

4. La prospección detallada de las zonas entre las minas de Muzo y Coscuez y las minas de Chivor y Gachalá se debe hacer, únicamente, si están relacionadas a indicaciones geológico-estructurales positivas.

5. El trabajo de muestreo regional (a granel) de las zonas anómalas para averiguar la existencia de mineralización se podría delegar a mineros locales dando las “concesiones exploratorias” para las cuales no se cobraría arrendamiento ni porcentaje sobre la producción por un tiempo de seis meses.

- Escovar (1975, 1979) recomienda tener en cuenta en la exploración geoquímica las siguientes fórmulas:

1. Para exploración regional:

$$M2 = \text{Log} (\text{Na}\%)^3 / (\text{Li ppm}) (\text{Pb ppm}) (\text{Mo ppm})$$

2. Para exploración local:

$$M1 = \text{Log} (\text{Na}\%)^3 / (\text{Li ppm}) (\text{K}\%) (\text{Ba ppm})$$

- En la exploración detallada de las áreas blanco, Carrillo (2001) se recomienda tener en cuenta las siguientes actividades:

1. Fotogeología del área para tratar de identificar todo tipo de geofomas, particularmente las relacionadas con zonas de brecha.

2. Realizar la geología detallada: cartografía, levantamiento de columnas estratigráficas y control estructural.

3. Efectuar perforaciones con el objetivo de controlar y caracterizar el sector brechado en profundidad mediante estudios petrográficos y geoquímicos.

4. Realizar un muestreo de sedimentos activos, esquilas de roca y suelos en una malla de 20 m x 20 m empleando una máquina hoyadora con un barreno de 1 m de largo. Las muestras deben ser analizadas con ICP para Na, Mo, Pb, Zn, K, Sr, Li, Ba, V, Be, Cr y Ni. Se debe analizar la utilidad de los elementos de Tierras Raras en la exploración de las esmeraldas.

5. Es importante hacer túneles exploratorios orientados a encontrar las vetas que seguramente están relacionadas con las zonas de brecha.

6. Debido a la gran cubierta vegetal que se presenta en algunos sitios se recomienda hacer destapes con bulldózer para obtener una mejor exposición de los segmentos interesantes relacionados con la mineralización esmeraldífera.

## 14. REFERENCIAS<sup>1</sup>

- Arhan, T, 1993. *Etude structurale des gisements à émeraude de la vordure Est de la Cordillère orientale de Colombie. Mémoire DEA, Nancy, INPL, 73.*
- Aranguren, D.A. & Rendón, C., 1998. Evaluación mineralógica y geoquímica del yacimiento esmeraldífero de Coscuez, Departamento de Boyacá. Tesis. Univ. Nal. de Col., Fac. de Ciencias. 110.
- Banks, D.A., Yardley, B.W.D., Cheillett, A., Giuliani, G. & Rueda, F., 1995. *Chemistry and source of the high temperature brines in the Colombian emerald deposits. In: Pasava, Krisek, Zak (eds) Mineral Deposits; Balkema, Rotterdam, 557-560.*
- Banks, D.A., Giuliani, G., Yardley, B.W.D. & Cheillett, A., 2000. *Emerald mineralization in Colombia: fluid chemistry and the role of brine mixing. Mineralium Deposita, 35: 699-713.*
- Barriga, A.M., 1953. Estructura de las esmeraldas de Muzo. *Revista de la Acad. Col. Cienc. Exactas, Físico-químicas y naturales. Vol. IX (33 y 34): 37-43*
- Bernauer, F., 1922. Las llamadas maclas múltiples de esmeralda de Muzo y sus anomalías ópticas. En: *Compilación de los estudios geológicos oficiales en Colombia 1917 – 1933. Comisión Científica Nacional. 199 - 222.*
- Beus, A.A. & Mineev, D.A., 1972. *Some geological and geochemical features of the Muzo Coscuez emerald zone, Cordillera Oriental, Colombia. INGEOMINAS, Inf. 1689. 50.*
- Beus, A.A., 1979. *Sodium – a geochemical indicator of emerald mineralization in the Cordillera Oriental, Colombia. J. Geochem. Explor., 11:195-208.*
- Bergt, W., 1899. *Geologische Studien in der Republik Colombia. II Petrography. 2. Die älteren massegesteine, krystallinen Scheiffer und sediment. In Reiss und Stübel, Reisen in Südamerika, Berlin.*
- Blanco, O.F. & Vargas, M.N., 1993. Caracterización química de las esmeraldas colombianas por el método de microsonda y la relación con su mineralización. Tesis no publicada. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Fac. de Ciencias. 101.
- Branquet, Y., 1995. Estudio estructural de la mina de esmeralda de Coscuez, Colombia. MINERALCO, 19.
- Branquet, 1999. *Etude structurale et métallogénique des gisements d'émeraude de Colombie : contribution à l'histoire tectono-sédimentaire de la Cordillère Orientale de Colombie. Tesis de Doctorado (PhD). Institut National Polytechnique de Lorraine, Vandoeuvre-les-Nancy, France, 295.*
- Branquet, Y., Cheillett, A., Giuliani, G, Laumonier, B. & Blanco, O., 1999a. *Fluidized hydrothermal breccia in dilatant faults during thrusting: the Colombian emerald deposits.*

---

<sup>1</sup> Las referencias citadas en este documento están disponibles al público en la Biblioteca del INGEOMINAS, Diagonal 53, 34-53, Bogotá, Colombia, teléfono 57 (1) 2221811

- In: McCaffrey, K.J.W., Lonergan, L. & Wilkinson, J.J. (eds.) *Fractures, Fluid Flow and Mineralization*. Geological Society, London, *Special Publications*, 155, 183-195.
- Branquet, Y., Laumonier, B., Cheilletz, A. & Giuliani, G., 1999b. *Emeralds in the Eastern Cordillera of Colombia : Two tectonic settings for one mineralization*. *Geology*, v.27; no. 7; 597-600.
- Branquet, Y., Cheilletz, A., Laumonier, B. & Giuliani, G., 1999c. *Fluidization during tectonics : The hydrothermal breccias in Colombian emerald deposits*. *Journal of Conference- European Union of Geosciences, Strasbourg, France*. 618-618.
- Branquet, Y., Cheilletz, A., Laumonier, B. & Giuliani, G., 1999d. *Fluidization during tectonics : the hydrothermal breccias in Colombian emerald deposits*. In McCaffrey K. (ed) *Geological Society of London, Special Publication*.
- Branquet, Y., Cheilletz, A., Cobbold, P.R., Baby, P., Laumonier, B. & Giuliani, G., 2002. *Andean deformation and rift inversion, eastern edge of Cordillera Oriental (Guatque – Medina area), Colombia*. *Journal of South American Earth Science*, 15:391-407.
- Bürgl, H., 1955. Condiciones geológicas de las minas de esmeralda de Muzo (Boyacá). Servicio Geológico Nacional. Inf. 1094. 15.
- Bürgl, H. & Nicholls, E., 1959. Recomendaciones respecto a la explotación de esmeraldas en Muzo y Coscuez, Boyacá. Servicio Geológico Nacional. Inf. 1325. 10.
- Campbell, C.J. & Bürgl, M., 1965. *Section through the Eastern Cordillera of Colombia, South America*. *Geol. Soc. Am. Bull.* 76(5): 567-589.
- Cardozo, C.A., 2000. Evaluación geológica y geoquímica de nuevas áreas potencialmente esmeraldíferas en el sector de Macanal, Departamento de Boyacá. Tesis. Univ. Nal. de Col., Fac. de Ciencias. 100.
- Cardozo, C.A. & Leal, H., 2000. Proyecto de exploración de áreas potencialmente esmeraldíferas en un sector de Páez – Campohermoso – Macanal, Departamento de Boyacá. Universidad Nacional – MINERCOL. 50.
- Carrillo, V., 1989. Determinación de nuevos prospectos esmeraldíferos en el sector de Gachalá – Guavio – Chivor, Departamentos de Cundinamarca y Boyacá, Colombia. Empresa Colombiana de Minas – ECOMINAS. 35.
- Carrillo, V., 2001. Compilación y análisis de la información geológica referente a la exploración de esmeraldas en Colombia. Informe del contrato 124. INGEOMINAS. 147.
- Castañeda, 1996. Informe geológico final sector Yacopí, Cundinamarca, Colombia. Programa de exploración geológica en zonas promisorias para la exploración de esmeraldas en Yacopí, Cundinamarca, y Coscuez-Peñas Blancas – San Pablo de Borbur, Boyacá, Colombia, Sur América. MINERALCO. 42.
- Cheilletz, A., Féraud, G., Giuliani, G & Rodríguez, C.T., 1991.  *$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  laser-probe dating of the Colombian emerald deposits : metallogenic implications*. S.G.A. Meeting, 25 Years Anniversary, Nancy, 373-376.
- Cheilletz, A., Féraud, G., Giuliani, G. & Ruffet, G., 1993a. *Emerald dating through  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  step-heating and laser spot analysis of syngenetic phlogopite*. *Earth and Planetary Science Letters*, 120: 473-485.
- Cheilletz, A., Giuliani, G & Arhan, T., 1993b. *Late Eocene – Oligocene shortening episode in the Eastern Cordillera of Colombia viewed by emerald dating*. In: *Deuxième Symposium International de Géodynamique andine*. ISAG 93, Oxford, 21-23. *Edition de L'ORSTOM, Paris, Collection Colloques et séminaires*: 473-476.

- Cheilletz, A., Féraud, G., Giuliani, G & Rodríguez, C.T., 1994. *Time-pressure and temperature constraints on the formation of Colombian emeralds:  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  laser microprobe and fluid inclusion study.* *Economic Geology*, 89: 361-380.
- Cheilletz, A., Giuliani, J.L., Zimmermann, J.L. & Ribeiro-Althoff, A.M., 1995. *Ages, geochemical signatures and origin of Brazilian and Colombian emerald deposits: A magmatic versus sedimentary model.* In: *Mineral Deposits. In: Pasava, Krisek, Zak (eds) Mineral Deposits.* Balkema, Rotterdam, 569-572.
- Cheilletz, A. & Giuliani, G., 1996. *The genesis of Colombian emeralds: a restatement.* *Mineral Deposita*, 31:359-364.
- Cheilletz, A., 1997. *The genesis of Colombian emerald deposits; contribution of structural geology and geochemistry; impact of mining exploitation on environment.* *Rapport scientifique final. CNRS-INPL CEE DG XII – MINERALCO.* 18.
- Cheilletz, A. & Giuliani, G., 1997. *Comment se forment les émeraudes.* *La Recherche*, 303 :48-52.
- Cheilletz, A., Giuliani, G., Branquet, Y., Laumonier, B., Sánchez, A.J., Féraud, G. & Arhan, T., 1997. *Datation K-Ar  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  à  $65 \pm 3$  Ma des gisements d'émeraude du district de Chivor - Macanal : argument en faveur d'une déformation précoce dans la Cordillère orientale de Colombie.* *C.R. Acad. Sci., Paris, t.324, série II a*, 369-377
- Cheilletz, A., 1998. *La géologie des gisements d'émeraude.* In : *D. Giard, G. Giuliani, A. Cheilletz, E. Fritsch, E. Gonthier (eds) L'émeraude, connaissances actuelles et perspectives.* Association française de gemmologie (AFG), CNRS, ORSTOM, Paris, 33-42.
- Cheilletz, A. & Giuliani, G., 1998. *Cómo se forman las esmeraldas.* *Mundo Científico*, No. 186, Enero. 40-44.
- Cheilletz, A., Royant, J.C., Royer, J.J. & Branquet, Y., 1999. *Geochemical evidences for fluid-rock interactions in the Chivor emerald deposit, Colombia.*
- Cheilletz, A. & Royant, J.C., 2001. *The black shale-hosted Colombian emerald deposits : a synthetic genetic model with emphasis on the source of beryllium.* *Mineral Deposits at the Beginning of the 21<sup>st</sup> Century, Piestrzyński et al. (eds).* Swets & Zeitlinger Publishers Lisse.
- COINVERTIR, 1996. *Taller de expertos internacionales – Preparatorio del I Congreso Mundial de la Esmeralda.* MINERCOL, Bogotá. 50.
- Cooper, M.A., Adison, F.R., Álvarez, R., Coral, M., Graham, R.H., Hayward, A.B., Howe, S., Martínez, J., Naar, H., Penas, R., Pulham, A.J., Taborda, A., 1995. *Basin development and tectonic history of the Llanos basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia.* *AAPG Bull.* 79(10):1421-1443.
- Domínguez, R., 1965. *Historia de las esmeraldas de Colombia.* Graf. Ducal, Bogotá, 297.
- Escovar, R., 1975. *Geología y geoquímica de las minas de esmeralda de Gachalá (Cundinamarca).* INGEOMINAS, Inf. 1684. 42.
- Etayo, F., Barrero, D., Lozano, H., Espinosa, A., González, H., Orrego, A., Ballesteros, C., Forero, H., Ramírez, C., Zambrano, F., Duque, H., Vargas, R., Núñez, A., Álvarez, J., Ropaín, C., Cardozo, E., Galvis, J., Sarmiento, L., Albers, J., Case, J., Singer, D., Bowen, R., Berger, B., Cox, D. & Hodges, C., 1983. *Mapa de Terrenos Geológicos de Colombia.* Publicaciones Geológicas Especiales del INGEOMINAS - No. 14-I, 235.
- Escovar, R., 1979. *Geología y geoquímica de las minas de esmeralda de Gachalá (Cundinamarca).* INGEOMINAS, Bol. Geol. 22(3):116-153.
- Exploraciones y Ensayos Ltda., 1997. *Exploración y evaluación de nuevas áreas potencialmente esmeraldíferas sector Útica – La Palma.* MINERALCO. 135.

- Fabre, A., 1987. *Tectonique et génération d'hydrocarbures: un modèle de l'évolution de la Cordillère Orientale de Colombie et du bassin des Llanos pendant le Crétacé et le Tertiaire*, Arch. Sc. Genève, 40(2): 145-190.
- Forero, H., 1987. Esmeraldas. En: Recursos Minerales de Colombia, Tomo II. Publicaciones Geológicas Especiales del INGEOMINAS. Tomo 2: 567-605.
- Forero, G; Maya, M., González, H.; Ferreira, P.; Nivia, A.; Núñez, A.; Martínez, J.; Clavijo, J.; Acosta, J; Cepeda, H.; Cardozo, E., 1997. Atlas Geológico Digital de Colombia. INGEOMINAS. 252 p.
- Fritsch, E., Rondeau, B., Notari, F., Michelou, J.-C., Devouard, B., Peucat, J.-J., Chalain, J.P., Lulzac, Y., De Narváez, D. & Arboleda, C., 2002. *Les nouvelles mines d'émeraude de La Pita (Colombia), 2<sup>e</sup> partie*. Revue de Gemmologie, no. 144, Février, 13-20.
- Gélvez, A., G. & Villamizar, J., 1991. Evaluación geológica y geoquímica de un sector al suroriente de la zona esmeraldífera de Chivor – Aporte 1228 – ECOMINAS. Tesis. Univ. Industrial de Santander, Fac. Ciencias Físico-Químicas. 187.
- Gil, S & Munive, L., 1996. Diseño de un modelo preliminar de explotación para esmeraldas en las minas de Coscuez, Boyacá, Colombia. 25.
- Gilles, V.A., 1966. The geology of the Chivor emerald mine. Sixth Field Conference – January 14-16, Colombian Society of Petroleum Geologists and Geophysicist. 161-196.
- Giuliani, G., Cheillett, A., Dubessy, J. & Rodríguez, C.T., 1990a. *Chemical composition of fluid inclusions in Colombian emerald deposits. Proceedings of the Eight Quadriennial IAGOD Symposium, Ottawa, Canada*. 159-168.
- Giuliani, G., Cheillett, A. & Rodríguez, C.T., 1990b. *Gênese das jazidas de esmeraldas da Colombia e do Brasil. Résumé 36 Congresso Brasileiro de Geologia, Natal, Brasil*. 130-131.
- Giuliani, G., Cheillett, A. & Rodríguez, C.T., 1990c. Emerald deposits from Colombia: *Chemical composition of fluid inclusions and origen. Résumé 8<sup>th</sup> IAGOD Symposium, Ottawa, Canada, 12-18*.
- Giuliani, G., Cheillett, A. & Rodríguez, C.T., 1990d. New metallogenic data on the emerald deposits of Colombia. *Résumé 8<sup>th</sup> IAGOD Symposium, Ottawa, Canada*, 185-186.
- Giuliani, G., Rodríguez, C.T. & Rueda, F., 1990e. *Les gisements d'émeraude de la Cordillère Orientale de la Colombie : nouvelles données métallogéniques*. Mineral. Deposita. 25:105-111.
- Giuliani, G., Silva, J.H.D. & G.P., 1990f. *Origin of emerald deposits of Brazil. Mineralium Deposita*. 25: 57-64.
- Giuliani, G., Cheillett, A., Dubessy, J. & Rodríguez, C.T., 1991. H<sub>2</sub>O-NaCl-CaCl<sub>2</sub>-bearing fluids in emeralds from the Vega San Juan Mine, Gachalá district, Colombia. Plinius, 5:90.
- Giuliani, G., Sheppard, S.M.F. & Cheillett, A., 1992a. *Fluid inclusions and <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O, <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C isotope geochemistry contribution to the genesis of emerald deposits from the Oriental Cordillera of Colombia*. C.R. Acad. Sci. Paris, 314, Série II: 269-274.
- Giuliani, G., Sheppard, S.M.F. & Cheillett, A., Rodríguez, C., 1992b. *Contribution de l'étude des phases fluids et de la géochimie isotopique <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O, <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C à la genèse des gisements d'émeraude de la Cordillère orientale de la Colombie*. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 314, Série II, 269-274.

- Giuliani, G., Cheilletz, A., Shepperd, S.M.F. & Arboleda, C., 1993. *Geochemistry and origin of emerald deposits of Colombia*. 2<sup>nd</sup> Biennial SGA Meeting, Rotterdam: Balkema. 105-108.
- Giuliani, G., Cheilletz, A., Arboleda, C., Carrillo, V., Rueda, F. & Baker, J.H., 1995a. *An evaporitic origin of the parent brines of Colombian emeralds: fluid inclusion and sulphur isotope evidence*. *Eur. J. Mineral.* 7:151-165.
- Giuliani, G., Cheilletz, A., Rueda, F., Féraud, G & France-Lanord, C., 1995b. *The genesis of Colombian emerald deposits: an unique example of beryllium mineralization developed in a black shale environment*. In: Pasava, Kribek, Zak (eds). *Mineral Deposits*, Balkema, Rotterdam, 943 – 946.
- Giuliani, G., France-Lanord, C., Zimmermann, J.L., Cheilletz, A., Arboleda, C., Charoy, B., Coget, P., Fontan, F. & Giard, D., 1997. *International Geology Review*. v.39, 400-424.
- Giuliani, G., France-Lanord, C., Coget, P., Schwarz, D., Cheilletz, A., Branquet, Y., Giard, D., Martin-Izard, A., Alexandrov, P & Piat, D.H., 1998. *Oxygen isotope systematics of emerald: relevance for its origin and geological significance*. *Mineralium Deposita*, Springer – Verlag, 33: 513-519.
- Giuliani, G., Cheilletz, A., Arboleda, C., Rueda, F., Carrillo, V. & Cheppard, S.M.F., 1999. *Geoquímica y origen de los depósitos de esmeraldas en Colombia*. *Boletín de Geología, Bucaramanga, Colombia*. 21(36):7-13.
- Giuliani, G., France-Lanord, C., Cheilletz, A., Branquet, Y. & Laumonier, B., 2000. *Sulfate reduction by organic matter in Colombian emerald deposits: Chemical and stable isotope (C, O, H) evidence*. *Economic Geology*. v.95, 1129-1153.
- Grosse, E., 1935. *Acerca de la geología del sur de Colombia*. Informe rendido al Ministerio de Industrias sobre un viaje por la Cuenca del Patía y el Departamento del Nariño. CEGOG. Tomo II, 139 – 231.
- Guerrero, A.H., 1988. *Estudio geológico y geoquímica de la mina de esmeraldas “El Toro”*, Gachalá, Cundinamarca. Tesis. Univ. Nal. de Col., Fac. de Ciencias. 165.
- Guerrero, J.R., 1986. *Cartografía geológica y prospección geoquímica en la mina de esmeraldas El Indio, Muzo, Boyacá*. Tesis. Univ. Nal. de Col., Fac. de Ciencias. 140.
- Guerrero, J.R. & Carrillo, G., 1997. *Actualización cartográfica de unidades litoestratigráficas encajantes de mineralizaciones esmeraldíferas en el Cinturón Occidental de la Cordillera Oriental, Colombia*. Tesis. Univ. Nal. de Col., Fac. de Ciencias. 150.
- Guerrero, J.R. & García, A., 1986. *Cartografía geológica y prospección geoquímica en la mina de esmeraldas “El Indio”, Muzo, Boyacá*. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia, Fac. Ciencias, Bogotá.
- Hall, M., 1976. *Mineralogía y Geoquímica de las vetas esmeraldíferas de Muzo, Departamento de Boyacá con implicaciones en la prospección futura de esmeraldas en otras partes de Colombia*. Universidad Nacional. Bogotá. 326.
- Hall, M., 1993. *Mineralogía y Geoquímica de las vetas esmeraldíferas de Muzo, Departamento de Boyacá con implicaciones en la prospección futura de esmeraldas en otras partes de Colombia*. *Compilación de los estudios geológicos oficiales en Colombia*. Tomo XIII. 1-326.
- Hubach, E., 1956. *Exploración de nuevos yacimientos esmeraldíferos en Muzo, Boyacá*. INGEOMINAS. Inf. 1188. 4.
- INGEOMINAS, 1986. *Mapa de Terrenos Geológicos de Colombia*. Publ. Esp. No 14. 235p.

- INGEOMINAS, 2000. Atlas Colombiano de Información Geológico-Minera para Inversión – ACIGEMI. Escala 1:500.000.
- Karsten, H., 1886. *Geologie de l'ancienne Colombia bolivarienne: Venezuela, Nouvelle-Grenade et Ecuador*, Berlin.
- Kozlowski, A., Metz, P & Jaramillo, H., 1988. *Emeralds from Somondoco, Colombia: Chemical composition, fluid inclusions and origin*. *N. Jb. Mineral. Abh.* 159:23-49.
- Kutterink, J.A., 1975. *Report on exploration geophysics at the emerald mines near Gachalá, Cundinamarca. United Nations Development Programme.* 12.
- Laumonier, B., Branquet, Y., Lopes, B., Cheilletz, A., Giuliani, G. & Rueda, F., 1996. *Mise en évidence d'une tectonique compressive Eocene – Oligocene dans l'ouest de la Cordillère orientale de Colombie, d'après la structure en duplex des gisements d'émeraude de Muzo et de Coscuez*. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 323 (IIa) :705-712.
- Leguizamón, J.R., 1998. Correlación petrográfica entre las minas de esmeraldas en Coscuez y Muzo. Tesis, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Escuela de Ingeniería Geológica. Sogamoso.
- León, A., Padilla, L. & Marulanda, N., 1973. Geología, Recursos Minerales y Prospección Geoquímica de la parte NE del Cuadrángulo O-5 (El Bordo). Ingeominas. Popayán. Inf. 1652.
- López, B., 1995. Estudio estructural de las minas de esmeralda de Muzo. MINERALCO. 31.
- López, C.D. & Uribe, E., 1989. Estudio geológico y geoquímico en el Cinturón esmeraldífero oriental al sur de Chivor, Boyacá. Tesis. Univ. Nal. de Col., Fac. Ciencias. 215.
- MacLaughlin, D. & Arce, M., 1971. Recursos minerales de parte de los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Meta. Boletín Geológico, INGEOMINAS, 19(1):1-102.
- María, A., 1947. Apuntes sobre las esmeraldas. *Rev. Acad. Col. Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Vol. VIII, 27: 324-327.
- Maya, M., Mendoza, H. & Celada, C.M., (En prensa). Gemas de Colombia. En: Gemas de Iberoamérica (Mendes, J.C., ed.). CYTED – Universidad Federal de Ouro Preto. 450.
- Medina, L.F., 1970. Consideraciones sobre la génesis de los yacimientos esmeraldíferos de los alrededores de Muzo, Colombia, Sudamérica. Empresa Colombiana de Minas – ECOMINAS. 16.
- Mendoza Parada Geólogos Asociados, 1991. Exploración zona de reserva nacional para esmeraldas Muzo – Coscuez, Boyacá, Área Suroriental. MINERALCO. 169.
- Mendoza, J.E., 1996. Anotaciones geoquímicas para explotación de esmeraldas en la región Muzo-Coscuez con base en la relación Na/K y elementos traza. *Geología Colombiana*, 21: 89-98.
- MINERALCO, 1996. La esmeralda: Mineral básico de exportación. 25.
- MINERALCO, 1997. Los sectores de la esmeralda y de la joyería en Colombia: Propuesta para la creación de un plan de desarrollo. Bogotá. 18.
- MINERCOL, 2000. Análisis de los mercados nacional e internacional de la esmeralda. Minerales de Colombia. 20.
- Murcia, A. & Pichler, H., 1986. Geoquímica y Dataciones Radiométricas de las Ignimbritas Cenozoicas del SW de Colombia. *Revista CIAF* 11:246-363.
- Murcia, A. & Soler, J.R., 1989. Cartografía geológica y análisis estructural de Itoco – Itoco norte (Quipama, Boyacá). Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia, Fac. de Ciencias, Bogotá.

- Mutis, V., 1959. Exploración en busca de esmeraldas. División Nacional de Minas. Inf. 260. 28.
- Oppenheim, V., 1948. *The Muzo emerald zone, Colombia, S.A. Economic Geology*. Vol. XLIII (1): 31-38.
- PNUD, 1975a. Proyecto Esmeraldas. Informe Técnico final. Inf. 1683. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. INGEOMINAS
- PNUD, 1975b. Proyecto Esmeraldas. Conclusiones y recomendaciones. Inf. 1735. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. INGEOMINAS. 15.
- NACIONES UNIDAS, 1976. Prospección de Esmeraldas en los Departamentos de Boyacá y Cundinamarca, Colombia. Conclusiones y Recomendaciones DP/UN/COL-72-004/9.
- Noriega, E., 1995. Utilización de la activación neutrónica en la prospección de esmeraldas de Colombia. Prointegral Ltda.
- Ochoa, L., 2003. Evaluación Magnetométrica, Radiométrica y Geoeléctrica de los depósitos esmeraldíferos del distrito minero de Chivor, departamento de Boyacá – Colombia. Tesis Maestría en Geofísica, Fac. Ciencias, Univ. Nacional de Colombia. 130.
- Olson, D.W., 2001. *Gemstones. US Geological Survey*. 23.
- Ottaway, T.L., 1991. *The geochemistry of the Muzo emerald deposit, Colombia. MSc thesis, University of Toronto*.
- Ottaway, T.L., Wicks, F.J., Bryndzia, L.T., Kyser, T.K. & Spooner, E.T.C., 1994. *Formation of the Muzo hydrothermal emerald deposit in Colombia. Nature*, 369: 552-554.
- Pereira, F., 1906. Correspondencia. Anales de Ingeniería, 23 (155): 203. Bogotá.
- Pinilla, C. E., 1997. Caracterización geológica y geoquímica de las unidades litoestratigráficas aflorantes en la mina de San Pedro en el municipio de Chivor y sectores aledaños, enfocada a la prospección de esmeraldas. Tesis, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Escuela de Ingeniería Geológica. Sogamoso. 124.
- Pratt, S. *et al.*, 1961. The Muzo emerald mine. Second Annual Field Conference – March 25-26. Colombian Society of Petroleum Geologist and Geophysicists. 33-64.
- Profesionales Asociados, 1996. Exploración y evaluación de nuevas áreas potencialmente esmeraldíferas en el Cinturón oriental y occidental. Áreas de Páez y Florián. MINERALCO.
- Pupo, J. & Rodríguez, J., 1989. Mineralogía y petrografía del yacimiento esmeraldífero de Coscuez (Bogotá). Universidad Nacional de Colombia. Tesis.
- Restrepo, H., 1958. Reconocimiento de las minas de esmeraldas de Muzo, Departamento de Boyacá. Servicio Geológico Nacional. Inf. 1309. 20.
- Restrepo, H., 1959. Reconocimiento de las minas de esmeraldas de Muzo, Departamento de Boyacá. Servicio Geológico Nacional. Vol. VII. Nos. 1-3, 61-84.
- Romero, F.H., Bello, R.M., Svisero, D.P., Fuzikawa, K & Schultz-Gütter, R., 1992. *Inclusões fluidas nas esmeraldas de Muzo, Pacho e San Antonio de Yacopí, Colombia. Boletín IG-USP, Publicacao especial*, 12:83-85.
- Romero, F.H., 1993. *Mineralogía, inclusões fluidas e gênese de esmeraldas das jazidas de Chivor, Coscuez, Muzo, Pacho e Yacopi, Colombia. Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências /USP*, 134.
- Romero, F.H., Rocha, B.E., Bello, R.M, Fuzikawa, K & Svisero, D.P., 1994a. *Inclusões cristalinas e fases sólidas associadas as inclusões fluidas em esmeraldas da Colombia. Revista Escola de Minas de Ouro Preto / UFOP*. 47(2): 128-133.

- Romero, F.H., Schultz-Güttler, R & Svisero, D.P., 1994b. *Fluid inclusion data of colombian emeralds: Total homogenization by SALT dissolution. 16<sup>th</sup> general meeting, International Mineralogical Association, Pisa, Italy*, 310.
- Romero, F.H., 1996. Mineralogía, inclusiones fluidas, difracción y espectrometría de las muestras de Páez, Boyacá y Florián, Santander, Colombia. Informe mineralógico, Número F3C, presentado a la firma colombiana Profesionales Asociados S.C. 30.
- Romero, F.H. & Hernández, O., 1999. Características mineralógicas e inclusiones fluidas de las esmeraldas del Municipio de San Antonio de Yacopí, Cundinamarca, Colombia. *Geología Colombiana*, 24: 149 – 158.
- Romero, F.H., Schultz-Güttler, R.A. & Kawashita, K., 2000. Geoquímica del Rubidio-Estroncio y edad de las esmeraldas colombianas. 25:221 – 239.
- Romero, J.G., 2001. Caracterización mineralógica de las esmeraldas de la región de Chivor y evaluación geológica y geoquímica del sector suroriental del municipio de Macanal, Boyacá. Tesis. Univ. Nal. de Col., Fac. de Ciencias. 130.
- Royo y Gómez, J., 1942. La cuenca del río Mayo y su formación granatífera (Departamento de Nariño). *Compilación oficial de estudios geológicos de Colombia*. Tomo V. 181 – 314.
- Sabot, B., Cheilletz, A., De Donato, P., Banks, D., Levresse, G. & Barrès, O., 2000. *Afghan emeralds face Colombian cousins. Emeralds: pourquoi les gisements afganis peuvent rivaliser avec ceux de Colombia? Chronique de la Recherche Minière*, No. 541, 111-114.
- Scheibe, R., 1916. Informe geológico sobre la mina de esmeralda de Muzo. En: *Compilación de los estudios geológicos oficiales en Colombia 1917 – 1933*. Comisión Científica Nacional. 169 – 199.
- Scheibe, R., 1922. Informe sobre las minas de esmeralda de Nemocón. Inf. 546. Servicio Geológico Nacional. 8.
- Scheibe, R., 1933. Informe sobre las esmeraldas de Nemocón. En: *Compilación de los estudios geológicos oficiales en Colombia 1917 – 1933*. Comisión Científica Nacional. 223 - 228.
- Schwartz, D., 1987. *Inclusoes in Gemas. Universidad Federal de Ouro Preto. Brasil*.
- Schwartz, D., 1992. *The chemical properties of colombian emeralds. The Journal of Gemmology*. 23(4):225-233.
- Simandl, G.J., Paradis, S. & Birkett, T., 1999. Colombia-type emeralds; in *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles*, Vol. 3, Industrial Minerals, G.J. Simandl, Z.D. Hora and D.V. Lefebure, Editors, British Columbia Ministry of Energy and Mines, Open File 1999-10.
- Stutzer, O., 1934. Sobre la geología de la parte media del Valle del Magdalena. *Compilación de estudios geológicos oficiales en Colombia*. Tomo 2. 183 – 209.
- Suárez, C.F., 1999. Prospección de esmeraldas de El Pital en el distrito minero de Yacopí – Cundinamarca. Tesis, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Escuela de Ingeniería Geológica. Sogamoso. 120.
- Ulloa, C., 1978. Ambiente geológico de los yacimientos esmeraldíferos en Colombia. *INGEOMINAS*. Inf. 1753. 19.
- Ulloa, C. & Rodríguez, E., 1979. Geología del Cuadrángulo K-12, Guateque. Inf. 1701. *Bol. Geol. del INGEOMINAS*. 22 (1): 1-55.
- Ulloa, C., 1980. Ambiente geológico de los yacimientos esmeraldíferos en Colombia. *Bol. Soc. Geol. Perú*, 65:157-170.

- Upegui, D., Aspectos estructurales relacionados con la génesis de las esmeraldas en el área de Chivor. Informe interno. MINERCOL. 19.
- UPME, 2000. Minerales Estratégicos para el Desarrollo de Colombia. UPME–MINERCOL – INGEOMINAS. 135.
- Vásquez, L., 2003. Evaluación de espectros magnéticos de posibles zonas de mineralización asociadas a esmeraldas, en el Municipio de Macanal, Boyacá. Tesis Master en Geofísica. Fac. Ciencias, Univ. Nacional de Colombia. 65.
- Vidal, P., Lasnier, B. & Poirot, J., 1992. *Determination of the age and origin of emeralds using Rubidium – Strontium análisis. The Journal of Gemmology*, 23(4): 198-200.
- Wokittel, R. & López, J., 1953. Estudios mineros y geológicos de la región del Guavio y los Farallones de Medina, Departamento de Cundinamarca. Servicio Geológico Nacional. Inf. 919.
- Wokittel, R. & Mutis, V., 1954. Yacimientos esmeraldíferos de los municipios de Ubalá, Gachalá, Almeida, Macanal y Somondoco. Servicio Geológico Nacional. Inf. 1150. 28.
- Wokittel, R., 1957. Recursos minerales en el Territorio Vásquez, Departamento de Boyacá. Servicio Geológico Nacional. Inf. 1240. 4.
- Zafra, M.G., 1996. Estudio geológico y geoquímica de un área en el sector sureste del Cinturón esmeraldífero, departamentos de Cundinamarca y Boyacá. Tesis. Univ. Nal. de Col., Fac. Ciencias. 70.
- Zapateiro, J. & Rodríguez, J.C., 1985. Mineralogía y petrografía del yacimiento esmeraldífero de Coscuez, Boyacá. Tesis. Univ. Nal. Colombia, Fac. Ciencias. 200.