

Evaluación magnetométrica, radiométrica y geoelectrica de depósitos esmeraldíferos

LUIS HERNÁN OCHOA GUTIÉRREZ

Grupo de investigación en Geofísica, Departamento de Geociencias,
Universidad Nacional de Colombia: Bogotá. lhochoag@unal.edu.co

RESUMEN

Se realizó la caracterización geofísica de los depósitos esmeraldíferos en el municipio de Chivor y zonas de interés en el municipio de Macanal, ubicados en el departamento de Boyacá-Colombia, mediante los métodos de radiometría, emanometría, magnetometría, geoelectrica y electromagnetismo. Se desarrolló la exploración geofísica de las áreas preseleccionadas en la exploración geoquímica llevada a cabo por Cardozo y Leal (2000) en el trabajo de grado "Evaluación geológica y geoquímica de nuevas áreas potencialmente esmeraldíferas en el sector de Macanal (departamento de Boyacá)".

Se dividió el trabajo en dos fases. En la primera fase se utilizaron métodos radiométricos y magnetométricos que ofrecen mayor rendimiento en campo, y por tanto, logran un mayor cubrimiento en el menor tiempo posible.

En la segunda fase se emplearon métodos de electromagnetismo y resistividad eléctrica en zonas de interés preseleccionadas en la fase I. Estos últimos métodos son más lentos pero permiten una mejor resolución. En ambas fases se recorrieron tanto las zonas de minería activa como las de presencia de anomalías geoquímicas sin explotación minera actual.

Los resultados obtenidos mediante la exploración geofísica fueron comparados con las anomalías geoquímicas y con el modelo geológico de la zona, encontrando una muy buena coincidencia entre todos los modelos.

Con base en los resultados obtenidos en la Fase II, se recomendaron los sitios de interés para la exploración directa mediante apiques, perforaciones o túneles, con el fin de determinar si las anomalías encontradas son productivas o no, las cuales hacen parte de las recomendaciones de actividades futuras por realizar en el área de estudio.

PALABRAS CLAVE: EMERALDAS, GEOFÍSICA, PROSPECCIÓN, CHIVOR, MACANAL, COLOMBIA

ABSTRACT

This paper presents the results of the Geophysical exploration of the emerald deposits in the town of Chivor and interesting areas in the town of Macanal, located in the Department of Boyacá (Colombia), using a combination of radiometric, emanometric, magnetometric, geoelectric and electromagnetic methods. The geophysical exploration was made in the areas selected by the geochemical exploration done by Cardozo and Leal (2000) in their research (Cardozo *et al.*, 2000).

The field work was divided in two steps. In the first, radiometric and magnetometric methods allowing fast field data acquisition.

In the second, electromagnetic and resistivity methods were applied. These methods are slower but have higher resolution than the first one.

The two steps were applied both in the active mines areas and in the probably productive zones where the mineralization are covered by colluvial deposits defined by geochemical anomalies.

The obtained results with the geophysical exploration were compared with the geochemical and geological models with a high correlation between all them.

A direct exploration zones were recommended, based on the results of phase 2, by direct drilling, tunnels and open pit works in order to determine if the geophysical anomalies are productive or not. This jobs has to be made in the future as part of mining prospects develop.

KEYWORDS: EMERALD, GEOPHYSICS, PROSPECTING, CHIVOR, MACANAL, COLOMBIA

INTRODUCCIÓN

Las minas han sido encontradas en su mayoría por la exposición de la zona de metasomatismo (albitizada), ocasionada por fenómenos naturales aleatorios o por acciones antrópicas tales como construcciones de vías.

Una opción para encontrar zonas de mineralización la brinda la geoquímica, mediante la cual es posible seleccionar zonas de anomalías de sodio (Na), calcio (Ca) y potasio (K). Sin embargo, hasta el momento no se ha desarrollado un programa de investigación más allá de la geoquímica, salvo Kutterink (1975) quien realizó una prospección de esmeraldas empleando métodos magnéticos, y las investigaciones llevadas a cabo por Ingeominas y Naciones Unidas (1976).

En este trabajo se describen los métodos geofísicos utilizados en la evaluación geofísica de zonas potencialmente esmeraldíferas en el municipio de Macanal, departamento de Boyacá-Colombia, realizados por la Universidad Nacional de Colombia, bajo el marco del Convenio con Minercol, durante los meses de febrero a diciembre de 2000.

LOCALIZACIÓN

El área general de estudio se encuentra localizada en el territorio colombiano, municipio de Macanal (Boyacá), figura 1.

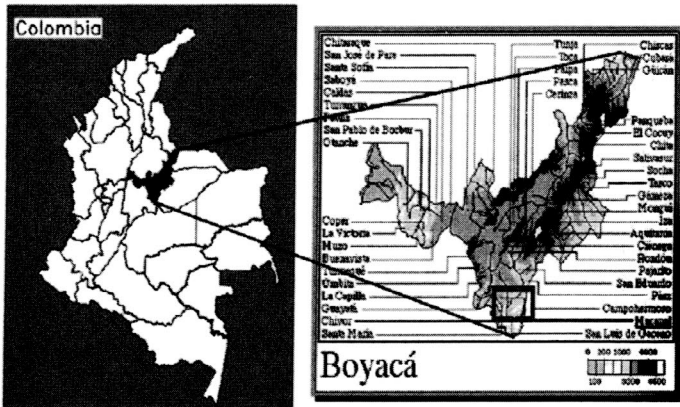


Figura 1. Localización área de estudio.

En este municipio se seleccionaron mediante una exploración geoquímica realizada por Cardozo y Leal (2000), de la Universidad Nacional de Colombia, unas áreas de interés en las cuales se emplearon los métodos geofísicos de prospección. Sin embargo, la prospección geofísica no se limitó únicamente a estas áreas, con el fin de establecer anomalías que no pudieron ser detectadas debido a limitaciones en el muestreo geoquímico, en parte por la ausencia de afloramientos de roca en una buena parte de la región.

ASOCIACIONES MINERALÓGICAS

Con base en la observación directa de áreas productivas, se infiere la presencia de contrastes de propiedades físicas entre los sitios mineralizados y la roca encajante, susceptibles de ser medidos por métodos geofísicos. Esto indica que existe la posibilidad de la detección de zonas potencialmente productoras, por el contraste de propiedades físicas de los materiales.

Los depósitos de esmeraldas están íntimamente relacionados con la presencia de piritita asociada a zonas productivas de esmeraldas en las minas de Chivor y otras (Giuliani, 1995), de manera que es posible detectar anomalías asociadas a este mineral.

Los depósitos de esmeraldas colombianos no tienen una conexión con fenómenos magmáticos, sino que pueden ser considerados como depósitos de piritita alojados en venas de carbonatos con la esmeralda como mineral accesorio (Giuliani, 1996).

Es posible detectar zonas de mineralización mediante la medición de propiedades físicas del subsuelo y relacionarlas con las zonas de mineralización. Se realizaron muestreos adicionales de geoquímica para integrar las respuestas geofísicas y geoquímicas de los sitios anómalos asociados a la presencia de depósitos de esmeraldas.

ESTUDIO MAGNETOMÉTRICO

Se ubicaron en total cinco bases de magnetometría en todo el municipio, para medir la variación diurna del campo magnético con estaciones separadas cada 10 m; se llevaron a cabo 7.320 mediciones, de las cuales se seleccionaron 5.580 de campo total (en NanoTeslas o nT), distribuidas en 13 líneas o secciones, así como 2.200 de gradiente vertical.

Como se puede observar en la figura 2, se obtuvo un modelo con franjas muy definidas de anomalías magnéticas que sugieren la presencia de tendencias estructurales relacionadas a fallas en zonas centrales de pliegues que pueden estar mineralizadas en dirección N35E en promedio. En el mapa geológico se observa cómo en la cartografía de campo se mapearon dichos plegamientos en la zona SW del mapa de anomalías, sobre la zona del embalse de la Esmeralda y algunos al sur del alto La Punta. Se halló que las anomalías magnéticas positivas coinciden bien con lo observado en la cartografía geológica. Estas estructuras no se pudieron continuar cartografiando en campo totalmente hacia la parte NE de la zona porque se encontraban cubiertas por coluviones. Sin embargo, la magnetometría permitió proyectar el trazado de las estructuras a lo largo de la zona, aun en sectores en donde están enmascaradas por los depósitos cuaternarios, debido a las anomalías observadas y a la correlación de éstas con las observaciones estructurales de campo.

ESTUDIO RADIOMÉTRICO

Se estudió la radiactividad natural emitida por todos aquellos materiales terrestres que dentro de su composición contienen elementos

que emiten radiaciones gamma. Los perfiles se trazaron transversales al rumbo de las estructuras.

Como se puede observar en la figura 3, se definieron dos zonas de anomalías donde resalta la curva iso-radiométrica de 80 cps, que establece claramente una separación de zonas que sugiere la presencia de dos regiones con un comportamiento geológico diferente. Por un lado, se tienen las anomalías mayores a 80 cps, donde se establece la presencia de afloramientos de roca con mayores valores de radiactividad producidos probablemente por la presencia de potasio (K) en las lutitas de Macanal. Los valores menores de radiometría corresponden a zonas de lutitas cubiertas por coluviones que enmascaran la radiactividad de las lutitas, señalando de manera evidente la presencia de dichos coluviones. Las gamas de valores obtenidos sugieren los diferentes espesores de coluvión que se pueden encontrar en la región. Sin embargo, la radiometría es un método geofísico que no tiene penetración; por tanto, es una excelente herramienta para apoyar la cartografía geológica, ya que los contrastes entre valores obtenidos deben ser explicados a partir de la distribución de las litologías aflorantes.

Las anomalías radiométricas mayores a 80 cps coinciden de buena manera con la presencia de afloramientos de las lutitas de Macanal, confirmada con las observaciones de campo en los lugares cartografiados. Se observa que las zonas de coluvión (parte central) coinciden con valores bajos de radiometría. De esta manera podemos determinar las zonas donde se tiene la mayor cercanía de las lutitas, para su posterior evaluación económica a la hora de determinar la explotación de los depósitos. La cartografía de campo solamente nos informa de los sitios con presencia de depósitos cuaternarios, pero la radiometría no ayuda a definir mejor estos cuerpos.

Es importante anotar que existe una muy buena correlación entre los sitios de minería activa, con los sitios de anomalía radiométrica mayor a 80 cps. En la zona SW encontramos la mina de Quebrada Negra, con minería activa en este momento, que coincide muy bien con el tren de anomalías mayores. Podemos observar hacia la parte NE del área dos zonas de minería, una de yeso (inactiva en el momento) y otra de esmeraldas, que forman parte de otra zona de anomalía radiométrica mayor de 80 cps.

ESTUDIO GEOELÉCTRICO

Se realizaron sondeos eléctricos verticales (SEV) con los cuales se determinaron las profundidades de las unidades de interés, y a la vez se estimó el espesor de la cobertura asociada por lo general a depósitos cuaternarios. De esta manera se escogieron los sitios para la exploración más detallada mediante perfiles eléctricos con el método Dipolo-Dipolo, y así se modelaron las posibles variaciones laterales entre zonas mineralizadas y roca encajante.

Con el fin de confirmar la relación que existe entre las anomalías radiométricas y las profundidades de los coluviones, se

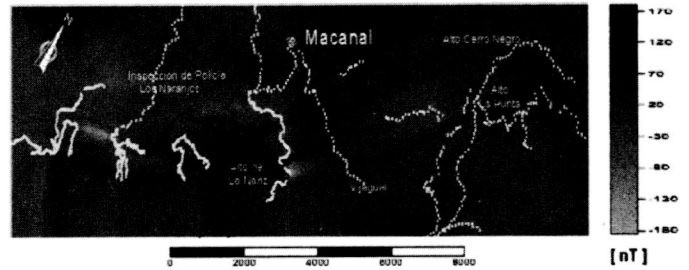


Figura 2. Resultados de la interpolación de las anomalías magnéticas.

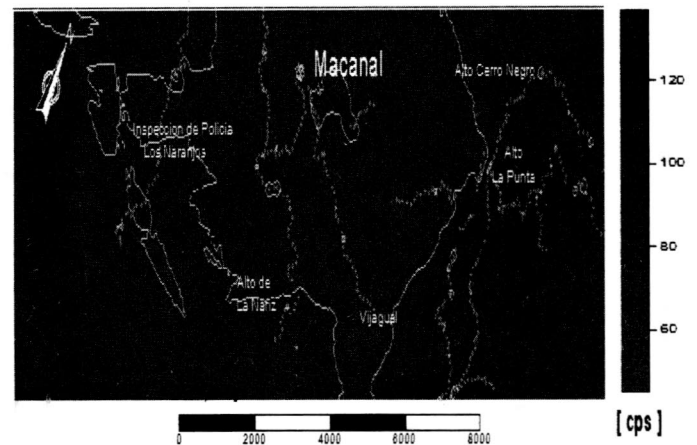


Figura 3. Resultados de la interpolación de las anomalías radiométricas.

realizaron SEV en las zonas de interés definidas mediante. Con estos sondeos se determinaron los espesores de tres unidades básicas: coluvión, lutitas de Macanal poco alteradas y lutitas de Macanal con alto grado de alteración. Estas unidades fueron establecidas asumiendo que las zonas de mayor interés, que corresponden a valores de menor resistividad, están asociadas a zonas de alteración arcillolítica y presentan posiblemente gran disseminación de sulfuros, en mayor medida que otros sitios poco alterados o menos mineralizados donde los valores de resistividad tienden a ser mucho mayores, sin llegar a tener valores tan altos como los que se pueden presentar en depósitos cuaternarios. Las características de resistividad de cada una de las unidades fueron: coluvión mayores a 200 ohm-m, lutitas de Macanal poco alteradas entre 80 y 200 ohm-m, lutitas de macanal muy alteradas menores a 80 ohm-m.

En la figura 4 tenemos los sondeos SEV-08 y SEV-07. Estos sondeos muestran resistividades características de las tres unidades principales de la zona. Tenemos en superficie resistividades muy altas, características de coluvión con espesor de 7m. A continuación tenemos resistividades del orden de 100 ohm-m correspondientes a lutitas de Macanal poco alteradas, que

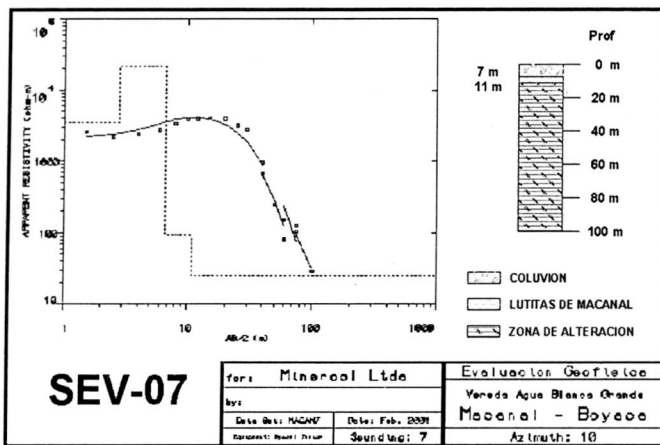
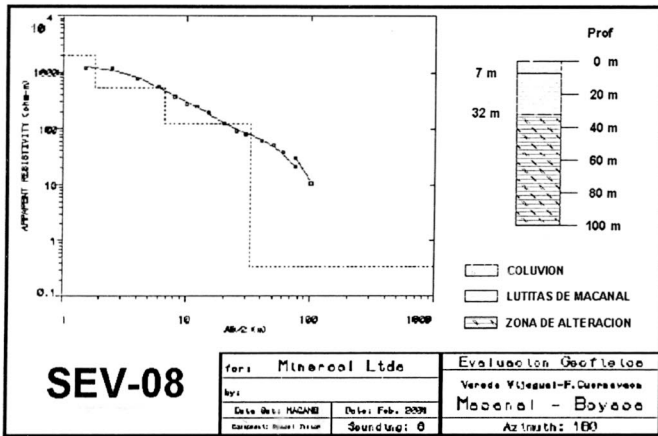


Figura 4. SEV. Coluvión - Lutitas - Zona de alteración.

posiblemente no tengan una mineralización importante con un espesor entre 25 y 6 m, y finalmente unas resistividades muy bajas entre 0.3 y 30 ohm-m, que indican la presencia de zonas con un mayor grado de alteración y que probablemente se encuentran mineralizadas. Esto indica que los fluidos hidrotermales no llegaron a alterar completamente las lutitas de Macanal y quedaron hasta cierta profundidad. Las zonas de alteración en estos sitios son más difíciles de detectar o encontrar de manera directa debido a que se encuentran cubiertas tanto por coluvión como por lutitas inalteradas.

Esto confirma la importancia de utilizar métodos geofísicos en la prospección de esmeraldas. El perfil DD-05 se realizó en el sitio del sondeo SEV-21, correspondiente a la mina de Quebrada Negra, directamente sobre zona de alteración. En la figura 5 se puede ver el resultado del perfilaje. En esta figura se puede observar claramente que las resistividades obtenidas para zona de alteración corresponden a valores menores a 80 ohm-m. El perfil está localizado totalmente sobre zona de alteración. Se presenta

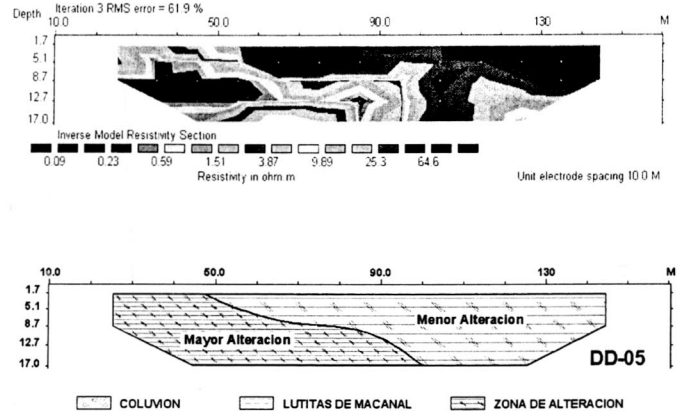


Figura 5. Resistividades obtenidas e interpretación Perfil DD-5. Mina Quebrada Negra.

una distribución de resistividades bajas, que sugieren dos zonas con diferentes niveles de alteración. En general se puede decir que la parte izquierda de la zona presenta mayor alteración y, por tanto, mayor posibilidad de mineralización, lo que hace más interesante esta parte de la mina.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente estudio, se pueden encontrar algunos indicadores de la efectividad y uso de los métodos propuestos.

Se definieron dos tipos de métodos geofísicos de acuerdo con la velocidad de aplicación y cubrimiento. Estos métodos son los de cobertura rápida y los de cobertura lenta.

Los de cobertura rápida, cuyos rendimientos oscilan entre 8 y 10 km de perfilaje diarios, se utilizan para caracterizar con mayor rapidez y cubrimiento las zonas de estudio, con el fin de establecer la localización de zonas de interés, a un costo menor, para luego emplear métodos más lentos y detallados. Tal es el caso de la magnetometría que se empleó para la ubicación ágil de las zonas de corredores de interés asociadas con alineamientos de fallas donde se produjeron las mineralizaciones que posteriormente fueron cubiertas por coluviones y depósitos recientes. También se encuentran en esta clasificación los métodos radiométricos, que se emplearon para obtener una caracterización geológica de superficie de manera ágil y eficiente, y como complemento a la cartografía geológica de la zona.

Los métodos de cobertura lenta, cuyos sondeos son puntuales y se realizan en el orden de 4 a 6 sondeos por día, se emplearon para detallar con mayor claridad las zonas de interés definidas con los métodos iniciales. Estos métodos empleados fueron geoelectrónica, electromagnetismo y emanometría. Los

dos primeros sirvieron para confirmar y ubicar de manera detallada los sitios de posible mineralización para posterior desarrollo de minería.

- En profundidad, entre 0 y 100 m, se detectaron, mediante perfilaje y electromagnetismo, zonas de muy baja resistividad, menores a 80 ohm-m, que son de interés para Esmeraldas, no solamente en los sitios previamente seleccionados mediante la geoquímica, sino también fuera de ellos y cubiertos con depósitos recientes.
- Los valores de resistividad calculados y menores a 10 ohm-m se relacionan con presencia de material semiconductor en el subsuelo. Tales características las presentan los sulfuros, y en particular la pirita, presente en cantidades abundantes en las zonas de afloramiento y en las zonas de mina alrededor de las zonas albitizadas.
- Se encontraron diferencias entre las resistividades obtenidas mediante geoelectrónica y electromagnetismo, lo que sugiere presencia de fenómenos de polarización, ocasionados por la presencia de sulfuros. Se propone la utilización de métodos de polarización inducida, que manejan frecuencias intermedias, comparadas con las de los métodos empleados en la investigación.
- Los valores de mayor intensidad magnética, (más de 32.360 nT) se relacionan con la presencia de minerales con mayor susceptibilidad magnética en el subsuelo. Esta característica la presenta la pirita, dentro de las zonas de interés mencionadas. Las anomalías encontradas son del orden de +/- 170 nT asociadas con los trenes de mineralización encontrados.
- Los valores de radón (mayores a 25 cps) se asocian con zonas de fractura o falla. Estos valores son bajos y permiten concluir que las estructuras asociadas con la presencia de las mineralizaciones corresponden a plegamientos fallados, donde la presencia de gas radón asociado con fallas profundas no es posible.
- Los valores anómalos de radiactividad (mayores a 200 cps) se relacionan con la presencia de minerales radiactivos asociados con zonas de mineralización, que están aflorando. El valor de 80 cps de radiometría se tomó como límite de afloramiento de lutitas de Macanal (valores mayores a 80 cps) y zonas cubiertas por depósitos recientes (menores a 80 cps).

La cartografía geológica, realizada conjuntamente con la exploración geofísica, permite inferir la continuidad, bajo el depósito de ladera o coluvión, de tres corredores de fallas de tipo normal y con rumbo aproximado N50E que se pueden seguir desde el departamento de Cundinamarca, en las minas El Toro, La Guala y Buenos Aires, hasta la vereda Quebrada Honda, pasando por la vereda Quebrada Negra, en el municipio de Macanal (Boyacá). No obstante, existen muchas áreas cubiertas por el coluvión en donde se recomienda que el seguimiento debe ser realizado mediante la aplicación de métodos geofísicos. En los sectores aledaños a esas fallas se encuentran evidencias de mineralizaciones tales como calcita,

pirita, yeso y algunas otras como verdacho y morralla que corresponden a berilos o esmeraldas de baja calidad, que generalmente están asociadas con la presencia de esmeraldas.

Con los métodos geofísicos aplicados, se identificaron tres corredores que se pueden correlacionar con sistemas de falla; adicionalmente se encontraron anomalías magnéticas de interés en las secciones realizadas entre:

- Cuernavaca - La Punta
- Q. Negra - Q. Honda - Q. Minas
- Q. Negra - Medianía

La mayoría de estas anomalías se encuentran bajo el coluvión, el cual tiene un espesor variable entre 2 y 35 metros, de acuerdo con las mediciones geoelectrónicas hechas mediante SEV.

Las áreas seleccionadas como potencialmente esmeraldíferas tienen en común:

- La presencia de rasgos estructurales alineados en una dirección aproximada de N50E, desde la Quebrada Negra hasta el Alto de Mucaño
- Resistividades menores a 1 ohm-m.
- Baja radiactividad (menor a 60 cps) debido a la alteración de zonas potásicas a zonas albitizadas, y alta radiactividad por la presencia de minerales radiactivos asociados. Esta última de manera excepcional y eventual.
- Alta concentración de sodio (30,52%)
- Concentración anómala de radón (mayor a 30).
- Constituye aproximadamente el 2% del área del estudio.

En el mapa de la figura 3, denominado 03-zonas de interés, se resume la localización de los sitios en donde se recomienda realizar apiques o perforaciones en zonas dichas con el fin de atravesar el coluvión y encontrar la zona de mineralización.

Las dimensiones de 15 a 20 cm de ancho y 65 metros de longitud de las venas mineralizadas comparadas con las dimensiones de las zonas albitizadas o de alteración que pueden tener varios metros sugiere que no es factible detectar las venas con precisión, justificando la exploración de las estructuras favorables (fallas) y las zonas de alteración como primera fase prospectiva, debido a que para la escala del presente trabajo no se pretende detectar venas de dimensiones muy pequeñas, sino simplemente las manifestaciones de las zonas de mineralización.

La presencia de pirita, incluso en venas de zonas improductivas, hace que las anomalías encontradas originadas por la presencia de ésta no sean suficientes para la detección específica de las esmeraldas. La geofísica debe permitirnos encontrar las vetas, pero la exploración directa finalmente establecerá su capacidad productora.

A pesar de no formar parte de la presente investigación, sí se pudieron establecer directamente en campo los efectos nocivos sobre el medio ambiente que tienen prácticas tales como desmorres y tambres. Se recomienda evitar el uso de dichas técnicas

en las labores de exploración directa y explotación, cambiando dichas prácticas por otras tales como apiques o túneles. Los efectos nocivos son, entre otros, el deterioro de corrientes de agua, el efecto dañino para el paisaje, el cambio de condiciones ambientales de los ecosistemas de la zona. La desprotección de laderas origina deslizamientos de tierra, los depósitos no consolidados de escombros son muy inestables y pueden ocasionar deslizamientos de estos materiales, con consecuencias tales como pérdidas de vidas y pérdidas materiales o represamiento de corrientes de agua que pueden originar avalanchas de lodos y generación de suelo estéril poco apto para actividades agrícolas.

También se pueden tener perjuicios desde el punto de vista económico al depositar los materiales removidos sobre zonas potencialmente prospectivas, sin ningún control.

BIBLIOGRAFÍA

- BRANQUET, Y., LAUMONIER, B., CHEILLETZ, A., GIULIANI, G. 1999. Emeralds in the Eastern Cordillera of Colombia: two tectonics settings for one mineralization. *Geology*, Vol. 25, No. 7, pp. 597-600.
- BANKS, D. A., YARDLEY, B. W. D., CHEILLETZ, A., GIULIANI, G., RUEDA, F. 1995. Chemistry and source of the high temperature brines in the Colombian Emerald deposits. *Mineral Deposits*, Pasava, Kribek, Zak (eds.), Balkema, Rotterdam, pp. 557-560.
- CARDOZO, C. LEAL, H. 2000. Estudio geológico y geoquímico de un área potencialmente esmeraldífera al NE de Macanal (Boyacá). Cinturón esmeraldífero oriental colombiano. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia.
- CHEILLETZ, A., GIULIANI, G. 1997. El doble origen de las esmeraldas. Traducción de Carlos M. Arrieta.
- _____. 1995. The formation of Emeralds in a sedimentary basin: the key role of alkaline brines and thermo chemical sulphate reduction. *European Union of Geosciences*, 8, Strasbourg, 9-12 April, Terra Nova No. 7, p. 203.
- _____, RUEDA, F., FERAUD, G., FRANCE, C., LANORD. 1995. The Genesis of Colombian Emerald Deposits: An unique example of beryllium mineralization developed in a black shale environment. *Mineral Deposits*, Pasava, Kribek, Zak (eds). Balkema, Rotterdam, pp. 943-946.
- _____. 1995. The Genesis of Colombian Emeralds: A restatement. *Mineralium Deposita* No. 31, pp. 359-364.
- CORNELIUS, S., HULBURT, J. R., CORNELIS, K. 1992. *Manual de mineralogía de Dana*, tercera edición, Editorial Reverte S.A.
- EDWARDS, R., ATKINSON, K. 1985. *Ore Deposits Geology*, Ed. Chapman and Hall.
- FORERO, H. 1987. Esmeraldas. Recursos minerales de Colombia. Tomo II, segunda edición, Publicaciones Geológicas Especiales, Ingeominas, pp. 567-605.
- GIULIANI, G., CHEILLETZ, A., ARBOLEDA, C., CARRILLO, V., RUEDA, F., BAKER, H. 1995. An evaporitic origin of the parent brines of Colombian Emeralds: Fluid inclusion and sulphur isotope evidence. *Europ. J. Mineral*, Vol. 7, pp. 151-165.
- GIULIANI, G., CHEILLETZ, A., SHEPPARD, S. M. F., ARBOLEDA, C. 1993. *Geochemistry of the Emerald deposits of Colombia*.
- GIULIANI, G., CHEILLETZ, A., CARRILLO, L., RUEDA, F., ARBOLEDA, C., SHEPPARD, S. 1993. *Geoquímica y Origen de los depósitos de Esmeraldas en Colombia*.
- GIULIANI, G., SILVA, D., COUTO, P. 1990. Origin of Emerald deposits of Brazil. *Mineralium Deposita* Sranger Verlag.
- GIULIANI, G., CHEILLETZ, G., FRANCE-LANORD, C., RUEDA, F. 1996. The role of organic matter in high temperature hydrothermal regimes. *Third ISAG, St. Malo (France)*, 17-19/09/1996, pp. 683-686.
- KUTTERINK. 1975. Report on exploration geophysics at the Emerald mines near Gachalá, Cundinamarca. Ingeominas.
- MINERALCO S. A. 1996. Génesis de los depósitos de Esmeraldas en Colombia e impacto ambiental de las explotaciones esmeraldíferas. Bogotá, Ministerio de Minas y Energía, p. 1-21.
- MORSE, J. G., RANA, M. D. H., MORSE, L. 1982. Radon Mapping as indicators of subsurface oil and Gas. *Oil & Gas Journal*, pp. 227-246.
- ROMERO, F., HERNÁNDEZ, O. 1999. Características mineralógicas e inclusiones fluidas de las esmeraldas del municipio de San Antonio de Yacopí, Cundinamarca, Colombia. *Geología Colombiana*. No. 24, pp. 149-158.