

MINERALOGÍA, GEOQUÍMICA Y ALGUNOS ASPECTOS GENÉTICOS DE LA MINA EL DIAMANTE- NARIÑO (COLOMBIA).

Molano, J.C.¹ and Shimazaki, H.²

RESUMEN

La mina El Diamante, localizada en la parte Suroccidental de Colombia, se encuentra compuesta por venas cuarzosas enriquecidas en oro. Análisis de inclusiones fluidas, han permitido establecer que el fluido asociado con la mineralización tiene un rango que varía entre 1.7 a 5.8 NaCl equivalente en peso, con un rango de temperatura de homogeneización entre 228-340°C.

Los valores de $\delta^{34}\text{S}_{\text{pyrite}}$ obtenidos con Isótopos estables de -7.1 a -5.3‰ y el valor de $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}} = -5.7\%$ indican para el azufre un origen mixto: sedimentario y magmático. Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $d\text{D}$ de los fluidos fluctúan entre 7.6 a 9.6‰ y -74 a -83‰ respectivamente. Los datos de isótopos e inclusiones fluidas sugieren que la mineralización aurífera de la mina El Diamante se desarrolló a partir de la mezcla de aguas meteóricas con aguas magmáticas, y posiblemente relacionada a la intrusión del Stock de Piedrancha de edad Mioceno Tardío. La deposición del oro es atribuida a la desestabilización del complejo bisulfuro, como resultado de la disminución de actividad del azufre a través de la deposición y/o pérdida de H_2S .

ABSTRACT

The Diamante mine is located in the southwestern part of Colombia on the west flank of the Occidental Andes Cordillera. The fluid associated with gold mineralization has a range of salinity between 1.7 to 5.8 wt % NaCl equivalent. Densities vary from 0.58 to 0.92 g/cc. Homogenization temperature averages range between 228-340°C. $\delta^{34}\text{S}_{\text{pyrite}}$ values of -7.1 to -5.3‰ and $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}} = -5.7\%$ suggest a mixing of sulfur with sedimentary and magmatic origin. The $\delta^{18}\text{O}$ and $d\text{D}$ values for the fluids are 7.6 to 9.6‰ and -74 to -83‰, respectively. The isotopic and fluid inclusion data of ore fluids suggest that the gold mineralization at the Diamante mine may have evolved from mixing of magmatic and meteoric fluids possibly related to intrusion of the nearby Piedrancha Granodiorite of late Miocene age. The gold deposition is attributed to destabilization of the bisulfide complex as a result of decrease of the sulfur activity, through sulfide deposition and/or H_2S loss.

¹Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, Dpto. de Geociencias, Bogotá D. C.
Correo electrónico: jcmolano@ciencias.unal.edu.co; juanca32@hotmail.com.,

²Universidad de Tokio, Instituto Geológico. 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113 Japón.
Correo electrónico: caw40120@pop21.odn.ne.jp

INTRODUCCIÓN

La mina El Diamante está localizada en la parte suroccidental de Colombia, en inmediaciones del Municipio de Guachavez en el departamento de Nariño. El área minera del Diamante fue estudiada desde 1980 hasta 1983 como parte de un proyecto de cooperación llevado a cabo por el Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear (INGEOMINAS) y la Agencia Minera Metálica del Japón (MMAJ). Posteriormente entre 1993-1996 se realizó un proyecto en la misma área con el fin de establecer los métodos de tratamiento metalúrgico más adecuados para esta mena.

El Diamante es clasificado como un depósito de venas tipo mesotermal alojado en una secuencia cretácica, con características similares a otros depósitos mesotermales, como los de Corea (Shelton *et al.*, 1988) y algunos depósitos cordilleranos canadienses (Nesbitt y Muehlenbachs, 1989).

Para poder estudiar este depósito, fueron tomadas muestras representativas de minerales de mena y ganga del depósito de (15) perforaciones realizadas por INGEOMINAS y MMAJ entre 1981-1983. Estas muestras suministran la información de una investigación enfocada sobre la paragénesis de las

venas, temperatura, salinidades y estado físico de los fluidos deducido de los estudios de inclusiones fluidas. Las composiciones isotópicas de oxígeno en cuarzo, azufre en piritita y esfalerita, e hidrógeno en inclusiones fluidas fueron determinadas para interpretar la génesis de los fluidos formadores de mena

Ambiente geológico

La mina el Diamante está localizada en el flanco oeste de la Cordillera Occidental (FIGURA 1). En esta área, rocas volcánicas, shales y chert pertenecientes al sistema cretácico están ampliamente distribuidas. Esta secuencia se encuentra intruida por el denominado Stock de Piedrancha, cuerpo de composición curazodiorítica a diorítica, Arango *et al.*, (1982), que genera una aureola de metamorfismo de contacto en las rocas adyacentes.

Las rocas cretácicas mencionadas son correlacionadas como se describe a continuación: shales y chert al Grupo Dagua, Cretácico Medio, Nelson (1962) y Barrero (1979), y las rocas volcánicas a la Formación Volcánica, Cretácico tardío, Millward *et al.* (1984). Tres lineamientos tectónicos NE-SW, NW-SE y N-S son dominantes en el área, y un cuarto E-W, puede ser observado.

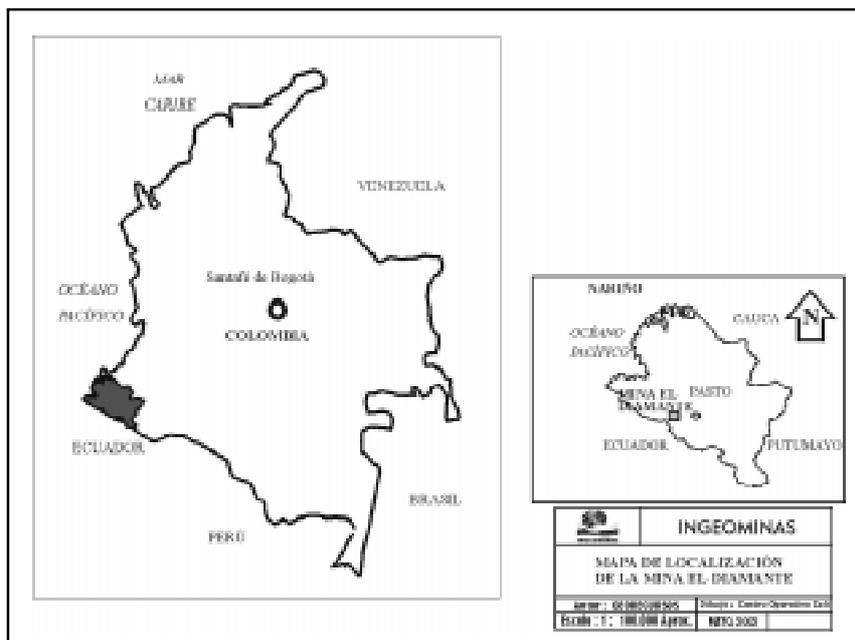


FIGURA 1. Mapa de localización.

Entre 1981 a 1984 La Agencia Minera Metálica del Japón (MMAJ) y la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) realizaron el reconocimiento geológico del área el cual fue dado a conocer en cuatro reportes. (MMAJ y JICA, 1981, 1982, 1983, 1984).

Depósito El Diamante

El Depósito esta compuesto por tres venas subparalelas de cuarzo enriquecidas en oro, cercana una a la otra, con una dirección predominante N50-60°W y buzamientos de 60°NE. Las venas tienen espesores variables, siendo la de mayor espesor, la denominada la gruesa, con 10 metros. La zona mineralizada de la vena principal se extiende por 1200 metros en la horizontal y 200 metros en la vertical (MMAJ y JICA, 1983). Las venas cuarzosas enriquecidas en oro se presentan en rocas andesíticas, aglomerados y tobas brechadas. Un importante rasgo en las venas es la presencia de bolsones o “oreshoots”. Los “oreshoots” están compuestos por texturas complejas de cuarzo (“ribbon”, “comb”, “buck” y “breccia”) y “gouge”.

Las texturas de relleno de espacios abiertos no son predominantes, el promedio de espesor de estos “oreshoots” está entre 5-15 metros. Los diferentes tipos de cuarzo y “gouge” presentes parecen estar reflejando diferentes episodios de fallamiento y deposición de cuarzo.

El patrón de alteración hidrotermal en el depósito esta caracterizado por la presencia de asociaciones argílicas, dominadas por caolinita y esmectita en la zona arcillosa “clay seam” y por la presencia de asociaciones propilíticas, dominadas por la presencia de carbonatos y epidota hacia fuera de la zona arcillosa. Estas son similares en estilo a las zonas de alteración hidrotermal presentes en otros tipos de depósitos de mena enriquecidos en Au-Ag descritos por Bonorino (1959) y Meyer *et al.*, (1968). Las asociaciones argílicas podrían indicar que la solución fue claramente ácida, y la propilítica podría reflejar una relación mas baja agua/roca o un incremento en el pH a casi condiciones neutras (Reed, 1983). Los análisis realizados en muestras de la zona arcillosa a diferentes profundidades del depósito, muestran que las

asociaciones argílicas son predominantes en los diferentes niveles.

Mineralogía y paragénesis

Secciones Pulidas, delgadas pulidas y delgadas fueron preparadas a partir de material de las venas auríferas y de la roca de caja provenientes de 102 fragmentos de los corazones de perforación y de especímenes colectados en el túnel principal de la mina El Diamante.

El estudio petrográfico estuvo complementado con análisis realizados en una sonda electrónica microanalizadora (S.E.M.A.) “EPMA” marca JEOL modelo 733mkII con un espectrómetro de longitud de onda de dispersión, a una aceleración de voltaje de 25kV.

Los minerales de mena más comunes presentes en este depósito son: pirita, arsenopirita, calcopirita y galena, en cantidades menores, electrum, tetrahedrita (freibergita), pirita arseniosa, pirargirita, hesita, proustita, argentita y polibasita. La ganga está constituida principalmente por cuarzo y en menor cantidad dolomita.

Ocurrencia del oro

En las secciones analizadas fueron encontrados 52 granos de oro, con tamaños que varían entre 3 a 180 mm en la longitud máxima. El oro está asociado principalmente a sulfuros como; arsenopirita, pirita arseniosa, pirita y en menor cantidad con galena, esfalerita y a cuarzo como mineral de ganga.

Los granos de oro son principalmente anhedrales, excepto en los casos que reemplaza arsenopirita y asume morfología subhedral a euhedral.

Usando una sonda electrónica microanalizadora 142 análisis de oro fueron realizados, los resultados muestran que todo el oro corresponde a Electrum, aleación Au-Ag con una composición mayor al 20 % en peso de Ag (Bates and Jackson, 1980). El contenido de oro Au % en peso varía entre 53 a 79 %, con la principal moda en 79 %.

Este patrón es similar a los datos que Shikazono y Shimizu (1988) encontraron para el electrum de depósitos de venas hipo a mesotermal en la península de Corea. La relación Au/Ag encontrada en el Diamante, de 1.12 a 3.97 es también similar al rango para depósitos mesotermiales de la Cordillera Canadiense, dado por Nesbitt et al. (1986).

Los análisis obtenidos con SEMA no muestran una tendencia clara acerca de las variaciones de contenido de Au en los granos de Electrum con la profundidad. Sin embargo los análisis de absorción atómica de Au y Ag realizados por MMAJ y JICA en 1984, muestran algunas variaciones en el depósito. La cantidad de oro se incrementa en profundidad hasta el nivel 2450 m, y hay una estrecha relación con el incremento de As en el contenido de la mena. Esta correlación es observada en los análisis petrográficos realizados en este estudio, la ocurrencia del electrum en la mena, es principalmente asociado a arsenopirita y a pirita arseniosa.

Secuencia paragenética

La secuencia es resumida cronológicamente en las siguientes etapas: (I) Pirita-Arsenopirita-Pirita arseniosa y Electrum, (II) Esfalerita-Calcopirita-Galena-Electrum-Tetrahedrita, (III) Pirita-Marcasita (IV) Argentita-Pirargirita.

Proustita. Entre II y III hay un movimiento que brecha los minerales. En la secuencia el oro está estrechamente asociado con arsenopirita, pirita arseniosa y pirita en la etapa inicial. Los análisis de SEMA muestran que el electrum temprano que coexiste con sulfuros es más rico en contenido de Au, que el relativamente posterior que reemplaza y rellena algunas fracturas en arsenopirita. Esta variación es de cerca de 12 % en peso, variando entre 68 y 78 % en Contenido de Au.

Estudios de inclusiones fluidas

Trescientas cuarenta y ocho inclusiones (348) fueron examinadas en doce (12) muestras de cuarzo (hialino y lechoso) tomadas de corazones de perforación y a partir de muestras de las tres venas en el túnel principal

de la mina El Diamante. 289 se calentaron y 59 se congelaron. El estudio fue realizado para definir las paleocondiciones de P-V-T-X del fluido formador de mena. La extensión horizontal de las zonas muestreadas es de 725 metros y en la vertical aproximadamente 220 metros.

Se efectuaron medidas microtermométricas usando un equipo tipo USGS. Los duplicados de las mediciones efectuadas muestran una reproducibilidad de 2.0 °C a temperaturas de cerca de 360 °C. Los datos reportados de salinidad están basados en el punto de congelamiento en el sistema H₂O-NaCl (Potter et al., 1978). El tamaño de las inclusiones varía entre 5-40 mm en diámetro, las inclusiones primarias se encuentran dispersas en el mineral, y no tienen relación con estructuras que hicieran suponer que hubo salida o ingreso de gas o líquido secundario al mineral. La clasificación de las inclusiones está basada en el número de fases presentes a temperatura ambiente (25 °C) y en enfriamiento a (-15 °C) (Roedder, 1984).

Tipos de inclusiones

Las muestras examinadas contienen sólo inclusiones primarias ricas en líquido de acuerdo con la clasificación dada por Nash y Theodore (1971). Estas inclusiones contienen dos fases: una líquida y otra compuesta por pequeñas burbujas de vapor que ocupan entre un 5 a 40 % del volumen total de cada inclusión a 25°C. Las inclusiones no contienen otros minerales y homogeneizan a fase líquida cuando se calientan. Ni CO₂ líquido ni Caltrato CO₂ fue observado durante el congelamiento, dando indicios que las inclusiones pueden ser interpretadas como del tipo H₂O-Sal.

Temperaturas de homogeneización

Un total de 216 inclusiones en 11 muestras tomadas de núcleos de perforación y de la Vena No. 2 en el túnel principal de la mina El Diamante, fueron calentadas hasta lograr la homogeneización. Los resultados muestran temperaturas entre 150 a 375 C, con una distribución bimodal con modas en 260 y 320°C (FIGURA 2).

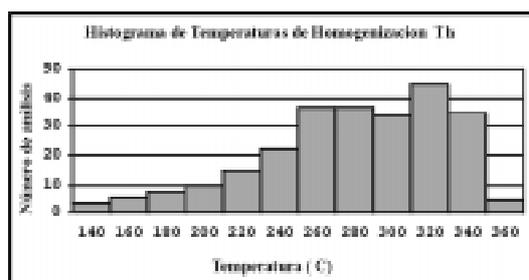


FIGURA 2. Histograma de temperaturas de homogeneización.

Salinidades

Un total de 60 fueron analizadas, las salinidades se obtuvieron desde las mediciones de la temperatura del punto de fusión (Potter et al., 1978). Las composiciones son referidas a porcentaje en peso de NaCl equivalente, como una aproximación simple a la química del fluido (Roedder, 1962). La salinidad varía desde 1.7 a 5.8 % en peso de NaCl equivalente. El resumen de los datos microtermométricos de los análisis de inclusiones fluidas es dado en la TABLA 1.

TABLA 1. Resumen de los datos microtermométricos.

Parámetro	Rango	Promedio*	Comentario
Th _{total}	150-375°C	228-336°C	216 datos
Tm _{ice}	-3.4 -1.0°C	-2.8-1.9°C	60 datos
Salinidad	1.7-5.8 % en peso NaCl eq.	3.2-4.2 % en peso NaCl eq	60 datos
Densidad	0.58-0.92 g/cc.	0.67-0.84 g/cc.	60 datos

* Corresponde al rango de promedios obtenidos para cada muestra analizada.

Geoquímica de isótopos estables

Los estudios de Isótopos estables han mostrado la utilidad para discernir el origen, naturaleza, e historia de los fluidos hidrotermales y sus constituyentes en depósitos de vena enriquecidos en oro y plata (Taylor, 1973, Shimazaki *et al.*, 1985, Nesbitt *et al.*, 1986, Shelton et al., 1988). En este estudio se determinaron las composiciones isotópicas de azufre en pirita y esfalerita, oxígeno en cuarzo e hidrógeno extraído de inclusiones fluidas.

Las mediciones de azufre e hidrogeno fueron hechas en el Instituto Geológico de la Universidad de Tokio, y los análisis de Isótopos de oxígeno en los laboratorios del Instituto Yinchang de Geología y de Recursos Minerales de la República de China.

Estudio de los isótopos de azufre

La composición isotópica del azufre, $\delta^{34}\text{S}$, fue obtenida a partir de sulfuros (pirita y esfalerita).

El azufre en la mina El Diamante se presenta esencialmente como sulfuros, no se encuentra como sulfato en este depósito. La pirita y esfalerita fueron obtenidas con la ayuda de pinzas y lupa binocular a partir de muestras de mano.

Los sulfuros son descompuestos con $\text{HNO}_3 + \text{Br}_2$ y el ion SO_4^{2-} es precipitado como BaSO_4 . El BaSO_4 obtenido es calentado con V_2O_5 y SiO_2 hasta 950°C , y convertido a SO_2 por el procedimiento descrito por Yanagisawa y Sakai (1983). Los resultados de isótopos son reportados en valores de $\delta^{34}\text{S}$ relativos al estándar Canyon Diablo Troilite (CDT). Técnicas de espectrometría de masas fueron usadas para analizar las muestras de gas.

Piritas y esfaleritas de los diferentes niveles en la mina muestran los siguientes valores: piritas varían entre -7.1% a -5.3% y esfaleritas de -5.2% a -8.6% . El promedio de $\delta^{34}\text{S}$ estimado para la pirita es de -6.3% . Algunas muestras pares de pirita-esfalerita fueron analizadas para usarlas como un geotermómetro de isótopo de azufre (Rye y Ohmoto, 1974). Sólo una muestra

(PD-129), se encontró en equilibrio, obteniéndose una temperatura calculada de 381°C . El valor obtenido coincide con los valores determinados mediante inclusiones fluidas.

Estudio de los isótopos de oxígeno

Datos de isótopos de oxígeno fueron obtenidos de varios especímenes de cuarzo. El oxígeno fue extraído usando el método de Clayton y Maeda (1963), y los resultados son dados en valores de $\delta^{18}\text{O}$ relativos a SMOW (Standard Mean Ocean Water). En total siete muestras fueron analizadas. Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ para cuarzo de diferentes niveles de la mina varían entre $+12.8$ a $+18.5\%$. Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ para el agua de esos cuarzos fueron estimadas asumiendo una temperatura de 290°C (promedio de la temperatura de homogeneización de las inclusiones fluidas) y

usando la ecuación de fraccionamiento cuarzo-H₂O dada por Matsuhisa et al. (1979). Los valores obtenidos varían entre 5.5 a 11.2‰, pero principalmente entre 9.3 a 11.2‰. Esos son típicos de fluidos dominados por aguas magmáticas (Paterson *et al.*, 1989), y los valores más bajos de δ¹⁸O encontrados en dos especímenes sugieren la posibilidad de mezcla con agua meteórica.

Estudio de isótopos de hidrógeno

Los análisis de hidrógeno fueron realizados a partir de aguas incluidas extractadas de la decrepitación de muestras de cuarzo usando la técnica de Kyser *et al.*, (1984) e Imai *et al.*, (1988). Se tuvo cuidado de realizar los análisis en muestras que tuvieran una alta proporción de inclusiones fluidas primarias. La cantidad de minerales de arcilla fue chequeada por XRD en cada una de las muestras de cuarzo, los difractogramas muestran que la cantidad de arcilla es despreciable en todas las muestras.

Los valores de δD para las inclusiones fluidas del cuarzo varían entre -74 a -85‰. Estos valores son similares a los datos reportados por Fisher *et al.*, (1997) para los valores de las aguas termales (-64 a -82‰), relacionadas con el Volcán Galeras, localizado a 50 Kilómetros de la mina El Diamante en la misma latitud.

Los valores de δD y δ¹⁸O para El Diamante caen en el rango típico para aguas magmáticas con δ¹⁸O (-50 a -85‰) y δ¹⁸O (+5.5 a +10.0‰), valores definidos por Taylor (1974), sugiriendo que las aguas magmáticas fueron un importante componente en la formación de los fluidos de mena.

Ambiente geoquímico del depósito de mena

pH

Como se describe en el capítulo Depósito El Diamante, la asociación sericita + caolinita es predominante en la zona de alteración, por lo tanto los fluidos que se movieron a través del depósito fueron controlados por esta asociación. La relación ak⁺/ah⁺ es estimada de los diagramas de potencial químico de k⁺ y H⁺ a 1 Kbar de presión (Burnham y Ohmoto, 1980) a 300 °C.

El valor probable para la molalidad de NaCl en solución (ms) (Potter, 1978) es estimado de punto de fusión de las inclusiones fluidas, 0.67. El valor de ak⁺ pudo ser calculado de la relación ak⁺/aNa⁺, asumiendo que ak⁺ está entre 1 a 10 % del valor de la molalidad total de NaCl (ak⁺/aNa⁺ » 0.1- 0.01). El pH deducido para el fluido formador de mena varía entre 3.2 a 4.2.

Condiciones de presión

La presión en la cual la mineralización ocurrió fue estimada utilizando la esfalerita como geobarómetro, Hutchinson y Scott (1981). El contenido de FeS de algunas esfaleritas en paragénesis estable con pirrotina y pirita fue determinado utilizando la sonda electrónica microanalizadora. La presión estimada del fluido es de aproximadamente 830 bares y corresponde a una profundidad de 3 a 4 kilómetros de profundidad.

Fugacidad de azufre

La presencia de pirita, pirrotina y esfalerita en las venas de cuarzo de la mina El Diamante, puede ser utilizada para estimar la fugacidad de azufre en el fluido del sistema.

La variación en contenido de FeS de las esfaleritas en equilibrio con la pirita refleja, a constante temperatura y presión, la fugacidad del azufre a través de la relación: 2FeS (en esfalerita) + S₂ = 2FeS₂ (Barton *et al.*, 1979).

Los valores de FeS en % mol de las esfaleritas (7-20) y las temperaturas de los análisis de inclusiones fluidas (230-340°C), fueron ploteados en el diagrama de actividad de S₂ (log fS₂) contra temperatura (Scott y Barnes, 1971; Shikazono y Shimizu, 1988), dando valores de log fS₂ (atm) de -9 a -14 (FIGURA 3).

Fugacidad del oxígeno

El campo de fugacidad del oxígeno en los fluidos puede ser localizado aproximadamente usando los diagramas fugacidad-pH (Barnes y Czamanske, 1967). En El Diamante se presentan las siguientes características que permiten establecer que la fugacidad del oxígeno cae en el campo de la pirita (FIGURA 4) y que el

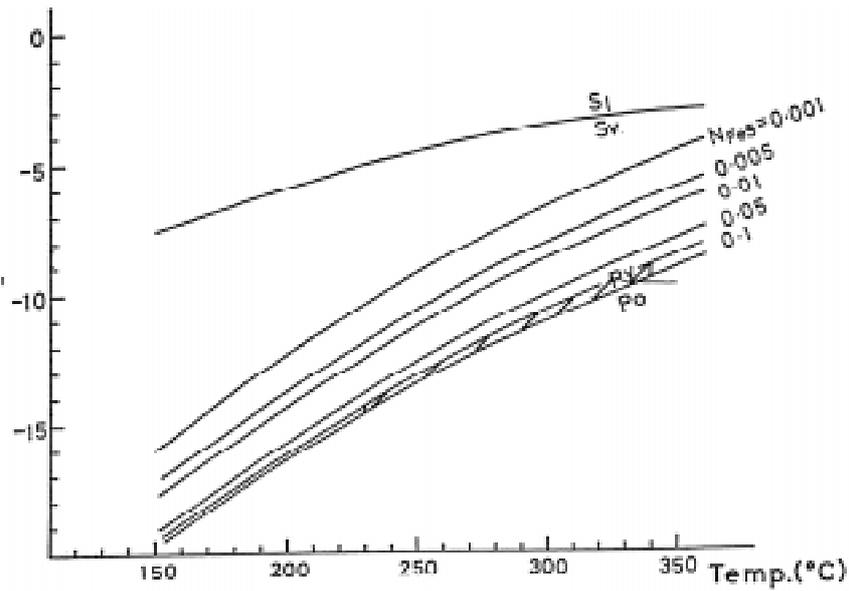


FIGURA 3. Diagrama actividad de S_2 -Temperatura.

fluido de mena se derivó en condiciones relativamente reductoras: (1) Los sulfuros predominan en el depósito, principalmente pirita, arsenopirita y esfalerita, la pirrotina se presenta prácticamente ausente. No hay magnetita y la presencia de hematita es muy escasa. (2) pH claramente ácido: 3.2-4.2 (3) Una temperatura de mena de 260°C (inclusiones fluidas).

Concentración de azufre total

Con la composición isotópica del azufre en los minerales, temperatura, pH y condiciones de fugacidad, $f(O_2)$ de los fluidos formadores de mena, es posible determinar el valor de $\delta^{34}S$ del azufre total en solución y la fuente del azufre (Ohmoto y Rye, 1979). En el Diamante, la mineralogía de la mena y la asociación presente en la alteración indican que el azufre en los fluidos fue predominantemente H_2S (Ohmoto, 1972), con el $X_{H_2S} > 0.99$, con un fraccionamiento entre pirita y H_2S menor que 0.2 ‰. Por lo tanto, usando el valor de $\delta^{34}S$ para pirita, el valor de $\delta^{34}S_{H_2S}$ de -5.7 ‰ puede ser tomado como la composición isotópica del volumen de azufre, de los fluidos hidrotermales ($\delta^{34}S_{AS}$). Este valor estimado sugiere un origen mixto; sedimentario y magmático para el azufre (Rye y Ohmoto, 1974).

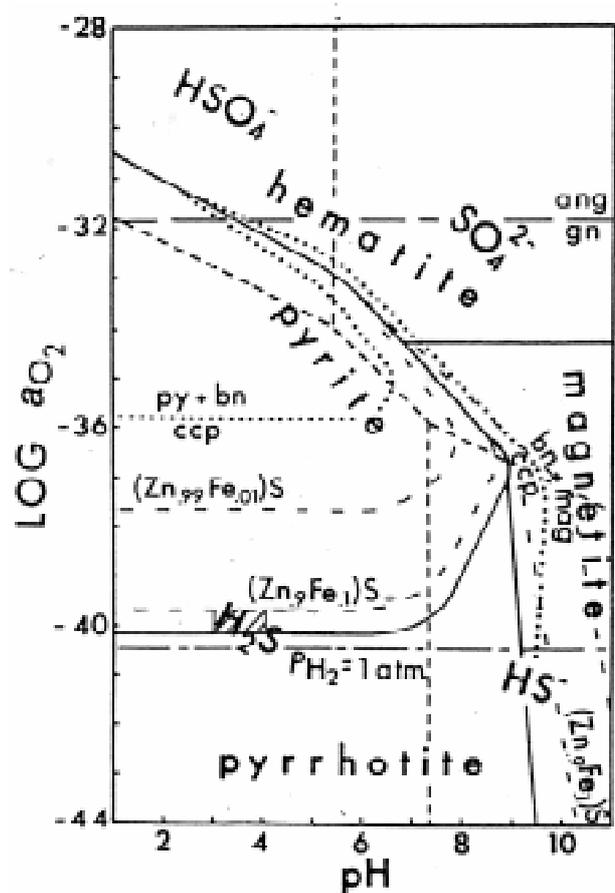


FIGURA 4. Diagrama de fugacidad de Oxígeno-pH, con el posible ambiente deposicional para la mineralización en la mina El Diamante.

Origen del fluido

El agua es el constituyente dominante de los fluidos formadores de mena, un conocimiento de su origen es fundamental para cualquier teoría de formación de mena (Taylor, 1979). A partir de los estudios: mineralógicos, de inclusiones fluidas, de difracción de Rayos X, de isótopos, la naturaleza de los fluidos puede ser estimado. En la mina El Diamante, los fluidos formadores de la mena tienen características de baja salinidad y densidad, claramente ácidos y son derivados de una fuente de alta temperatura. El estado de oxidación del fluido y la mineralogía presente indican condiciones reductoras. Los valores medidos y calculados de $\delta^{18}\text{O}$ y δD para las aguas mineralizantes muestran un estrecho rango, con valores de: $\delta^{18}\text{O}$ (7.6 a 9.6 ‰) y δD (-74 a -83 ‰).

Diferentes mecanismos han sido evocados para explicar el desarrollo de los fluidos mineralizantes en los depósitos auríferos. Para los depósitos de la costa

oeste de Norte América han sido sugeridos los siguientes mecanismos; (I) Deshidratación Metamórfica Regional (Fyfe y Kerrich, 1984; Grove *et al.*, 1987; Cameron y Hattori, 1987), (II) Devolitización de cuerpos magmáticos (Burrows *et al.*, 1986) y (III) Circulación Meteórica (Nesbitt y Muehlenbachs, 1989).

En el caso de la mina El Diamante, los valores medidos y calculados de $\delta^{18}\text{O}$ y δD para las aguas mineralizantes, caen principalmente en el campo de las aguas magmáticas primarias, en un diagrama convencional $\delta^{18}\text{O}$ - δD de Taylor (1979) (FIGURA 5) sugiriendo que los fluidos pudieron haber tenido un importante componente magmático. Sin embargo, también es necesario tener en cuenta la posibilidad de que aguas meteóricas pudieran haber sido una importante fuente de los fluidos formadores de mena en la mina el Diamante. En algunos estudios (Sheppard *et al.*, 1970; Nesbitt *et al.*, 1986; Nesbitt and Muehlenbachs, 1989) han mostrado el importante papel de las aguas meteóricas.

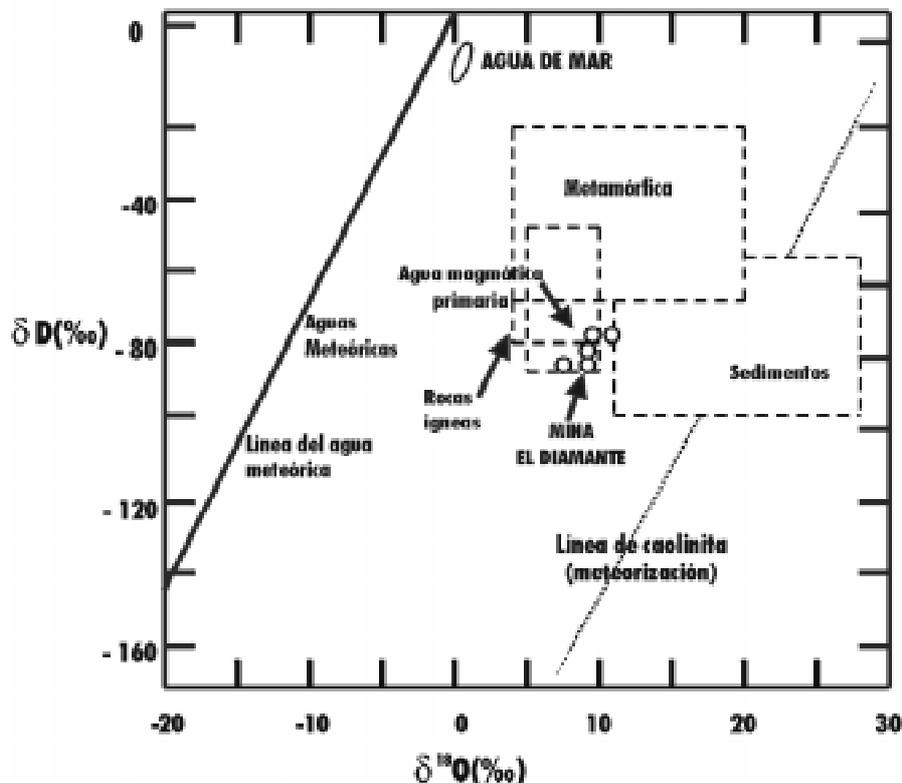


FIGURA 5. Composiciones isotópicas calculadas de Oxígeno e Hidrógeno de los fluidos en la mina El Diamante.

Los valores de aguas meteóricas de hoy en día en el área se desconocen, pero podrían ser similares a las calculadas en el Volcán Galeras, localizado 50 kilómetros al este en la misma latitud. Esas aguas tienen las siguientes composiciones isotópicas, $\delta D \gg -75\%$ y $\delta^{18}O \gg -10\%$ (Fisher *et al.*, 1997). Los valores de δD para las aguas meteóricas en el área durante la deposición de la mena (Mioceno Tardío) no son conocidos, pero podrían ser similares a los valores de δD para las aguas meteóricas de hoy en día.

Considerando el origen, la interacción agua meteórica-roca pudo haber producido un fluido isotópicamente indistinguible del magmático. Esta característica estaría de acuerdo con los rangos de densidad encontrados para los fluidos de la mina El Diamante, 0.58 a 0.92 g/cc, aunque un vapor condensado originado por ebullición de un fluido magmático tendría características similares (Paterson *et al.*, 1989). Por lo tanto, es difícil decir que los fluidos formadores de la mena tuvieron un origen único. Las evidencias sugieren que la mineralización de oro en El Diamante pudo haber evolucionado de la mezcla de fluidos meteóricos y magmáticos, posiblemente estos últimos relacionados al cercano intrusivo denominado Stock de Piedrancha de edad Mioceno tardío.

Transporte y mecanismos de deposición

Mecanismo de transporte

Los datos experimentales muestran que en condiciones mesotermales ($\gg 300-350^\circ\text{C}$), el oro puede ser transportado en solución en mayor cantidad como complejo sulfurado que como complejo clorurado, en un medio de salinidad moderada a baja, en un fluido alto en sulfuro, de pH casi neutro y de naturaleza reductora (Seward, 1984; Hayashi y Ohmoto, 1991).

En el Diamante las características presentes; pH débilmente ácido, baja salinidad, condiciones reductoras de los fluidos, temperaturas entre 230°C a 340°C , y la estrecha asociación del electrum con los sulfuros, sugieren que el oro fue transportado en mayor proporción como complejo sulfurado que como complejo clorurado.

Mecanismo de deposición

En el transporte del oro como complejo sulfurado, la precipitación del oro ocurre en respuesta a la desestabilización del complejo bisulfuro de oro. Los mecanismos de precipitación que han sido sugeridos para este complejo son: (1) Disminución de la actividad de azufre por la precipitación de sulfuros (Neall y Phillips, 1987) y/o pérdida de H_2S desde el fluido debido a la sulfurización de la roca de caja durante la ebullición; (2) Reducción del fluido debido a la reacción con rocas reductoras, como shales enriquecidos en grafito (Springer, 1985); (3) Disminución de pH del fluido como resultado de reacciones de fijación de K^+ y CO_2 en la alteración de la roca de caja (Kishida y Kerrich, 1987); Enfriamiento del fluido (Phillips and Powell, 1993).

En El Diamante hay una disminución sistemática en el contenido de FeS en esfalerita del nivel más profundo al más somero. Una relativa baja fugacidad de azufre a profundidad, sugiere una relativa baja fugacidad de oxígeno, y a través de la precipitación de sulfuros y/o pérdida de H_2S , puede favorecer la deposición de oro a través de la desestabilización de los complejos bisulfuros tales como $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ (Seward, 1984; Drummond y Ohmoto, 1985; Bowers, 1991) o $\text{Au}(\text{HS})^0$ (Benning y Seward, 1996). La estrecha asociación del electrum con los sulfuros, y el incremento de cantidad de sulfuro y oro en profundidad (MMAJ y JICA, 1984) (TABLA. 2), sugieren que la disminución de actividad del azufre, a través de la deposición de sulfuros es el más importante mecanismo para la depositación del oro en la mina El Diamante.

Un probable mecanismo para la deposición del Electrum es representado por la ecuación.

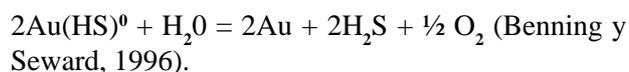


TABLA 2. Tenor en los diferentes niveles de la mina El Diamante.

Nivel	Tenor			
	Au g/t	Ag g/t	Zn %	As %
2600 m (superficie)	4.7	170	0.47	1.77
2600 m -2530 m	6	51	2.58	2.97
2530 m- 2450 m	7.3	31	2.1	3.18

CONCLUSIONES

- (1) En la mineralización El Diamante, son reconocidas dos etapas, temprana y tardía. El Electrum se presenta principalmente en la etapa temprana con sulfuros. Los datos obtenidos con la sonda electrónica microanalizadora muestran que los granos que coexisten con sulfuros son más ricos en contenido de Au que los granos de electrum que reemplazan y rellenan algunas fracturas en arsenopirita y cuarzo.
- (2) Las asociaciones de alteración presentes en la zona de arcilla indican que la solución fue claramente ácida.
- (3) La mineralogía de la mena y las asociaciones de alteración indican que el azufre en los fluidos estaba predominantemente en la forma de H_2S .
- (4) Hay una disminución sistemática en el contenido de FeS en esfaleritas de profundidad a superficie. La relativa baja fugacidad de azufre a profundidad sugiere una relativa baja fugacidad de oxígeno.
- (5) Los valores de $\delta^{34}S$ Spirita de -7.1 a -5.3 ‰ y $\delta^{34}S_{as} = -5.7$ ‰ sugieren un origen mixto para el azufre, sedimentario y magmático.
- (6) Los valores de $\delta^{18}O$ de 7.6 a 9.6 ‰ y de δD de -74 a -83 ‰ sugieren que la mineralización aurífera de la mina El Diamante, pudo haber evolucionado de la mezcla de fluidos meteóricos y magmáticos, y estos posiblemente estar relacionados con la intrusión del Stock de Piedrancha.
- (7) La naturaleza de los fluidos de mena, sugiere que el oro pudo ser transportado en mayor abundancia como complejo sulfurado que como complejo clorurado. La depositación del oro es atribuida a la desestabilización del complejo bisulfuro como resultado de la disminución de la actividad de H_2S , a través de la depositación de sulfuros.

AGRADECIMIENTOS

La información que se encuentra en este artículo fue extractada de una tesis de maestría realizada por Juan Carlos Molano Mendoza, este proyecto fue concebido en El Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero Ambiental y Nuclear (INGEOMINAS), deseo dar mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que de una u

otra manera contribuyeron para que esta investigación llegara a feliz término. Al Dr Adolfo Alarcón Guzmán, Director General del INGEOMINAS, al Ingeniero Nelson De LaPava G. exdirector del INGEOMINAS-CORCALI q.e.p.d., al personal de MINDECO en Tokio (Japón) y especialmente a los profesores H. Shimazaki, A. Imai, y A Tsugawa de la Universidad de Tokio, por el aporte, asesoría y soporte académico. Al Ministerio de Educación Japonés (MONBUSHO) en la primera etapa, y a COLFUTURO en la etapa final, por el soporte financiero otorgado para adelantar esta investigación.

REFERENCIAS

- Arango, J.L., y Ponce, A. (1980). Mapa geológico del departamento de Nariño, reseña explicativa del mapa geológico del departamento de Nariño. Ingeominas, Bogotá. Inf No 1818, 40p.
- Barnes, H. L., and Czamanske, G. K. (1967). Solubilities and transport of ore minerals: In: *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 1st Ed., H. L. Barnes, Ed., New York; Holt, Rinehart, and Winston, pp. 334-381.
- Barrero, D. (1979). *Geology of the Central Western cordillera, West of Buga and Roldanillo, Colombia*. Ingeominas, Bogotá. Pub. Geol. Esp., No. 4, 75p.
- Barton, P. B., and Skinner, B. J. (1979). Sulfide mineral stabilities. In *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, edited by H. L. Branes. New York, John Wiley and Sons, pp. 278-403.
- Bates, R. L., and Jackson, J. A. (1997). *Glossary of Geology*: American Geological Institute, Fourth Edition, 769 p.
- Benning, L. G., and Seward, T. M. (1996). Hydrosulphide complexing of Au (I) in hydrothermal solutions from 150-400°C and 500-1500 bar: *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Vol. 60, pp. 1849-1871.
- Bonorino, F.G. (1959). Hydrothermal alteration in the Front Range mineral belt, Colorado: *Bull. Geol. Soc. Am.*, Vol. 70, pp. 53-90.
- Bowers, T. S. (1991). The deposition of gold and other metals: pressure-induced fluid immiscibility and associated stable isotope signatures: *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Vol. 55, pp. 2427-2434.

- Burnham, C. W., and Ohmoto, H. (1980). Late stage processes of felsic magmatism, p. 1-11 in S. Ishihara and S. Takenouchi, Eds., *Granite Magmatism and Related Mineralization*. Soc. Min. Geol. Jap., Spec. Issue 8, 247p.
- Burrows, D. R., Wood, P. C., and Spooner, E. T. C. (1986). Carbon isotope evidence for Archaean gold-quartz vein ore deposits: *Nature*, Vol. 321, pp. 109-112.
- Cameron, E. M., and Hattori, K. (1987). Archaean gold mineralization and oxidized hydrothermal fluid: *Econ. Geol.*, Vol. 82, pp. 1177-1191.
- Clayton, E. N., and Mayeda, T. K. (1963). The use of Bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxide and silicates for isotope analysis: *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Vol. 27, pp. 43-52.
- Drummond, S. E., and Ohmoto, H. (1985). *Chemical Evolution and Mineral Deposition in Boiling Hydrothermal Systems*: *Econ. Geol.*, Vol. 80, pp. 126-147.
- Fisher, T. P., Sturchio, N. C., Stix, J., Arehat, D. C., Counce, D., and Williams, S. N. (1997). The chemical and isotopic composition of fumarolic gases and spring discharges from Galeras Volcano, Colombia: *Interdisciplinary Study of a Decade Volcano*. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 77, pp. 229-253.
- Fyfe, W. S., and Kerrich, R. (1984). Gold: Natural concentration processes, in Foster, R. P., ed., *Gold'82*, Rotterdam, Balkema, pp. 99-127.
- Grove, D. I., and Philips, G. N. (1987). The genesis and tectonic control on Archaean hydrothermal gold deposits of western Australian Shield: A metamorphic replacement model: *Ore Geol. Rev.*, Vol. 2, pp. 287-322.
- Hayashi, K., and Ohmoto, H. (1991). Solubility of gold in NaCl and H₂S-bearing aqueous solution at 250°-350°C: *Geochim. Et Cosmochim. Acta.*, Vol. 55, pp. 2111-2126.
- Hutchinson, M. N., and Scott, S. D. (1981). Spahalerite geobarometry in the Cu-Fe-Zn-S system: *Econ. Geol.*, Vol. 76, pp. 143-153.
- Imai, A., Shimazaki, H., and Nishizawa T. (1998). Hydrogen Isotope Study of Fluid Inclusions in Vein Quartz of the Hishikari Gold Deposits, Japan: *Resource Geol.*, Vol. 48, No. 3, pp. 159-170.
- Kishida, A., and Kerrich, R. (1987). Hydrothermal alteration zoning and gold concentration at the Kerr-Addison Archean lode gold deposit, Kirkland Lake, Ontario: *Econ. Geol.*, Vol. 82, pp. 649-690.
- Kyser, T. K., and O'Neil, J. R. (1984). Hydrogen isotope systematics of submarine basalts: *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Vol. 48, pp. 2123-2133.
- Matsuhisa, Y., Goldsmith, J. R., and Clayton, R. N. (1979). Oxygen isotope fractionation in the system quartz-albite-anorthite-water: *Geochim. Et Cosmochim. Acta*, Vol. 43, pp. 1131-1140.
- Metal Mining Agency of Japan (MMAJ) and Japan International Cooperation Agency of Japan (JICA). (1981). Report on geological survey of Piedrancha area, phase I, Internal report, 93p.
- Metal Mining Agency of Japan (MMAJ) and Japan International Cooperation Agency of Japan (JICA). (1982). Report on geological survey of Piedrancha area, phase II, Internal report, 75p.
- Metal Mining Agency of Japan (MMAJ) and Japan International Cooperation Agency of Japan (JICA). (1983). Report on geological survey of Piedrancha area, phase III, Internal report, 53p.
- Metal Mining Agency of Japan (MMAJ) and Japan International Cooperation Agency of Japan (JICA). (1984). Estudio preliminar de factibilidad del desarrollo del area el Diamante-Paraiso-Bombona, Departamento de Narino, Internal report, 183p.
- Meyer, C., Shea, E.P. Goddard, C.C., Jr. and Staff. (1968). *Ore Deposits of the U.S., 1933-1967*: Am. Inst. Min. Eng., New York, pp. 1373-1416.
- Millward, D., Marriner, F. and saunders, A. D. (1984). Cretaceous tholeiitic volcanic rocks from the Western Cordillera of Colombia. *Jour. Geol. Soc. London*, 141, pp. 847-860.
- Nash, J.T., and Theodore, T. (1971). Ore fluids in the porphyry copper deposit at Copper Canyon, Nevada: *Econ. Geol.*, Vol. 66, pp. 385-399.
- Neall, F. B., and Phillips, G. N. (1987). Fluid-wallrock interaction in Archean hydrothermal gold deposit: a thermodynamic model for Hunt Mine, Kambalda: *Econ. Geol.*, Vol. 82, pp. 1679-1694.

- Nelson, W. H. (1962). Contribucion al conocimiento de la Cordillera Occidental, seccion carretera Cali - Buenaventura. Ser. Geol. Nal. Bol. Geol. Bogota. Vol. 10 (1-3), pp. 81-108.
- Nesbitt, B. E., and Muehlenbachs, K. (1989). Geology, geochemistry, and genesis of lode gold deposits of the Canadian Cordillera: Evidence from ore formation from evolved meteoric waters: Econ. Geol. Mon. Vol. 6, pp. 553-563.
- Nesbitt, B. E., Murowchick, J.B., and Muehlenbachs, K. (1986). Dual origins of lode gold deposits in the Canadian Cordillera: Geology, Vol. 14, pp. 506-509.
- Ohmoto, H. (1972). Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits: Econ. Geol., Vol. 67, pp. 551-578.
- Ohmoto, H., and Rye, O. (1979). Isotopes of sulfur and carbon, in Barnes, H. L., ed., Geochemistry of hydrothermal ore deposits: New York, Wiley Interscience, 2nd ed., pp. 509-567.
- Paterson, C. J., Unzular, N., and Groff, J. (1989). A view through an Epithermal-Mesothermal Precious Metal System in the Northern Black Hills, South Dakota: A Magmatic Origin for the Ore-Forming Fluids: Econ. Geol., Vol. 43, pp. 564-570.
- Phillips, G. N., and Powell, R. (1993). Links between gold provinces: Econ. Geol., Vol. 88, pp. 1084-1098.
- Potter, W. R., Clynne, M. A., and Brown, D. L. (1978). Freezing point depression of aqueous sodium chloride solutions: Econ. Geol., Vol. 73, pp. 284-285.
- Reed, M. H. (1983). Seawater-basalt reaction and the origin of greenstone and related ore deposits: Econ. Geol. Vol. 78, pp. 466-485.
- Roedder, E. (1962). Studies of fluid inclusions I: low temperature application of dual-purpose freezing and heating stage: Econ. Geol., Vol. 57, pp. 1045-1061.
- Roedder, E. (1984). Fluid inclusions: Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy, Vol. 12, 664p.
- Rye, R. O., and Ohmoto, H. (1974). Sulfur and carbon isotopes and ore genesis: A review: Econ. Geol., Vol. 69, pp. 826-842.
- Scott, S. D., and Barnes, H. L. (1971). Sphalerite geothermometry and geobarometry: Econ. Geol., Vol. 66, pp. 653-669.
- Seward, T. M. (1984). The transport and deposition of gold in hydrothermal systems. In: R. P. Foster (Editor), Gold '82: The Geology, Geochemistry and Genesis of Gold Deposits. Balkema, Rotterdam, pp. 165-182.
- Shelton, K. L., So, C. S., and Chang, J.S. (1988). gold-rich mesothermal vein deposits of the Republic of Korea: Geochemical studies of the Jungwon gold area: Econ. Geol., Vol. 83, pp. 1221-1237.
- Shikazono, N., and Shimizu, M. (1988). Electrum: Chemical composition, mode of occurrence, and depositional environment: The Univ. Museum, The Univ. Tokyo, Bull. No. 32, 81p.
- Shimazaki, H., Sakai, H., Kaneda, H., and Lee, M. S. (1985). Sulfur isotopic ratios of ores deposits associated with Mesozoic felsic magmatism in South Korea, with special reference to gold-silver deposits: Geochemical J., Vol. 19, pp. 163-169.
- Springer, J. S. (1985). Carbon in Archean rocks of the Abitibi Belt (Ontario-Quebec) and its relation to gold distribution: Can. J. Earth Sci., Vol. 22, pp. 1945-1951.
- Taylor, H. P. (1979). Oxygen and hydrogen relations in hydrothermal mineral deposits, in Barnes, H. L., ed., Geochemistry of hydrothermal ore deposits: New York, Wiley Interscience, pp. 236-277.
- Taylor, H. P., Jr. (1974). The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition: Econ. Geol. Vol. 69, pp. 843-883.
- Yanagisawa, F., and Sakai, H. (1983). Thermal decomposition of sulfate-vanadium pentoxide-silica glass mixtures for preparation of sulfur dioxide in sulfur isotope ratio measurements: Analytical Chem., Vol. 55, pp. 985-987.

Trabajo recibido: abril 4 de 2003
Trabajo aceptado: julio 23 de 2003