

MINERALOGÍA DE LAS ARSENOPIRITAS EN LA MINA DE ORO SÃO BENTO(MINAS GERAIS, BRASIL)

Marco A. MÁRQUEZ G. *, José C. GASPAR †

RESUMEN

El depósito de la mina de oro São Bento (Minas Gerais, Brasil) está hospedado en la porción media del Cuadrilátero Ferrífero (*latu sensu*), en la Formación Ferrífera São Bento, constituida esencialmente por un BIF (Banded Iron Formation) en forma de capas finas, las cuales varían en composición entre *facies* óxido, carbonato, silicato y sulfuro, siendo que los sulfuros normalmente se encuentran además como venas de tamaño variable, levemente discordantes con relación al BIF.

Mineralógicamente el depósito está constituido por arsenopirita, pirrotita, pirita, calcopirita, esfalerita, galena, electrum, magnetita, ilmenita, siderita, ankerita, calcita, cuarzo, clorita, estilpnomelano y moscovita.

La arsenopirita ($Fe_{1.01}As_{0.99}S_{1.00} - Fe_{1.00}As_{0.82}S_{1.18}$), con hábito principalmente romboedral, presenta zonación con el núcleo claramente definido en el microscopio petrográfico. Este núcleo presenta una razón As/S disminuyendo del centro hacia sus límites, característica de ambientes ricos en As. Por otro lado, el borde presenta cambios rítmicos en la razón As/S, con una tendencia a la estequiometría desde el límite con el núcleo hacia los lugares más externos del cristal, con la razón As/S aumentando, lo que es típico de ambientes con alta fugacidad de S. Esta zonación hace evidentes por lo menos dos generaciones diferentes de arsenopirita.

ABSTRACT

São Bento gold deposit (Minas Gerais, Brasil) occurs in the middle portion of the Cuadrilátero Ferrífero (*latu sensu*), hosted by the São Bento Iron Formation. This is a BIF (Banded Iron Formation) composed of fine layers of oxide, carbonate, silicate, and sulfide *facies*. Sulfides usually form veins of variable sizes that crosscut the BIF layering at very small angles.

The most important minerals in the deposit are: arsenopyrite, pyrrhotite, pyrite, chalcopyrite, sphalerite, galena, electrum, magnetite, ilmenite, siderite, ankerite, calcite, quartz, chlorite, stilpnomelane, and muscovite.

*Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. E-mail:marcoamarquez@scientist.com

†Universidad de Brasilia - Instituto de Geociencias, Brasilia D.F. - Brasil. E-mail: gasp@guarany.cpd.unb.br

Arsenopyrite ($\text{Fe}_{1.01}\text{As}_{0.99}\text{S}_{1.00} - \text{Fe}_{1.00}\text{As}_{0.82}\text{S}_{1.18}$), occurs mainly as rhombus and is zoned with a clear petrographically defined core. This core presents As/S diminishing from center towards its limits, typical of As-rich environments. The rim shows rhythmic changes in As/S, which generally increases and tends to stoichiometry from the core limit to the most external crystal rim. This is typical of environments with high sulfur activity. This zonation indicates two arsenopyrite generations.

INTRODUCCIÓN

Debido a la gran abundancia de los tres elementos que la componen, Fe, As y S, la arsenopirita es un sulfoarsenato ampliamente distribuido en la corteza terrestre. En los últimos años ha sido amplia y especialmente investigada debido al descubrimiento de la ocurrencia de Au en su estructura cristalina (Johan *et al.*, 1989; Marcoux *et al.*, 1989; Cabri *et al.*, 1989; Wu, 1989; Boiron *et al.*, 1989; Bakken *et al.*, 1989; Cook y Chryssoulis, 1990; Marion *et al.*, 1991; Cabri, 1992; Mao, 1991), lo que ha sido de gran importancia tanto en el campo de la investigación mineralógica como en el área de beneficio de oro refractario (Cabri *et al.*, 1987). Cabri (1987) reportó que en el año de 1984, en los residuos de las minas canadienses, dejaron de ser recuperadas aproximadamente 14 t. de Au (446.000 Troy oz), en gran parte contenido en la estructura de la arsenopirita, que, a un valor de US\$ 450 /oz, equivaldría a más de US\$ 200 millones.

La arsenopirita presenta una amplia variedad de hábitos que cambian según el ambiente natural (Wu, 1989). De igual forma son también muy comunes las maclas cruzadas y, en menor cantidad, las formas como estrella de seis picos y reloj de arena (Wu, 1989), llamada de cinco individuos por Ramdohr (1969). Según Ramdohr (1969) es también común la zonación por substitución.

La fórmula de la arsenopirita es idealmente FeAsS , pero existe una falta de estequiometría debido a la considerable variación en la razón As/S, la cual se presenta en las arsenopiritas naturales (Wu, 1989), en las sintetizadas por vía seca (0,85 y 1,15) (Kretschmar y Scott, 1976; Clark, 1960), o sintetizadas por vía hidrotérmica (Wu, 1989). De esta forma la fórmula correcta, si se considera el Fe igual a 1, sería $\text{Fe As}_{1+x} \text{S}_{1-x}$. Después de varios estudios en arsenopiritas naturales de diferentes lugares, algunos autores han concluido que existe realmente una deficiencia en Fe en las arsenopiritas (Clark, 1960; Kretschmar y Scott, 1976; Sharp, 1985), por lo que se debe considerar una fórmula más compleja donde la variación del Fe sea considerada. Sin embargo, se considera también que este déficit en Fe, el cual se presenta en la mayor parte de los análisis, puede ser debido a errores de tipo analítico en la microsonda electrónica (Morimoto y Clark, 1961). La zonación en la composición debida a la variación en la razón As/S es bastante común. Kretschmar y Scott (1976) consideran que normalmente las arsenopiritas son más ricas en S en el centro que en los bordes, debido a las fluctuaciones locales en la razón de la actividad de S y As ($a_{\text{S}_2}/a_{\text{As}}$). La simetría de la estructura de la arsenopirita es considerada monoclinica, pero el maclado ocasionalmente oblitera esta simetría, mostrando una simetría pseudoortorrómbica.

LOCALIZACIÓN Y AMBIENTE GEOLÓGICO.

La mina São Bento está localizada en el estado de Minas Gerais (MG), distrito de Barra Feliz, municipio de Santa Bárbara, a más o menos 100 km de distancia, por carreteras asfaltadas, de la ciudad de Belo Horizonte, y entre las coordenadas $43^{\circ} 28'$ de longitud W- $19^{\circ} 58'$ latitud S (figura 1).

La mina de oro São Bento se ubica en el Cuadrilátero Ferrífero (*latu sensu*), de edad Arcaico-Proterozoica, el cual ha sido investigado ampliamente debido a sus conocidas riquezas en depósitos auríferos y de hierro. El Cuadrilátero Ferrífero está constituido geológicamente por tres grandes unidades: (i) terrenos granito-néisicos; (ii) *greenstone belts* arcaicos, constituidos por el Supergrupo Rio das Velhas y algunas fajas correlacionadas y (iii) cuerpos metasedimentarios del Paleó e Mesoproterozoico, conformados por el Supergrupo Minas, Grupo Itacolomí y el Supergrupo Espinhaço (Noce, 1995) (figura 2).

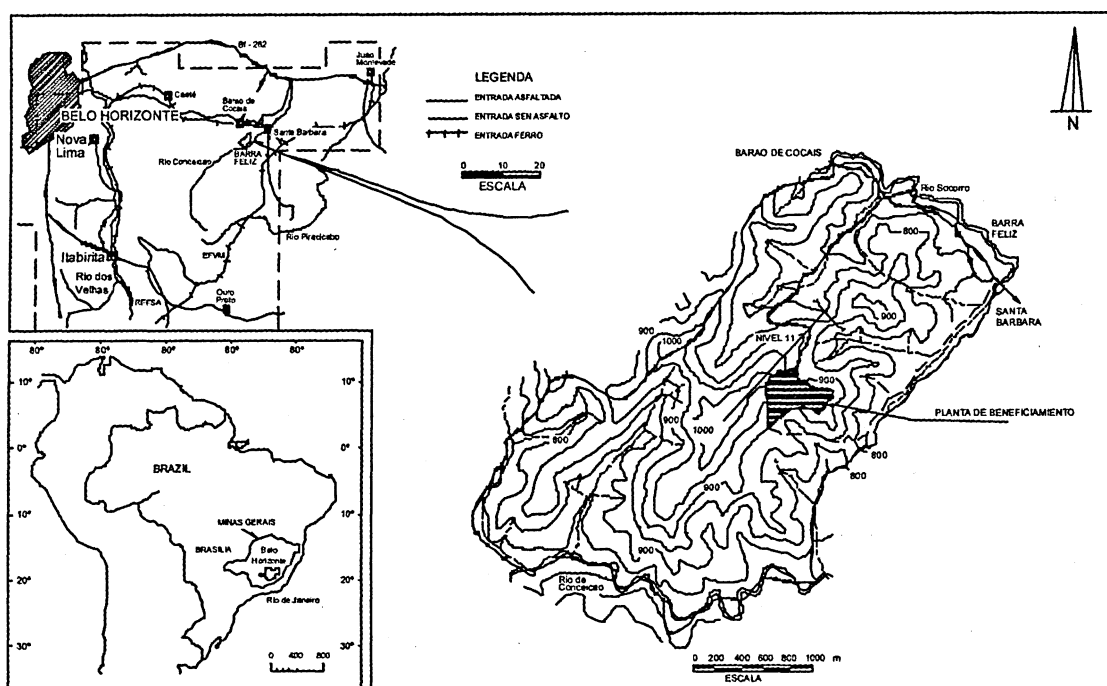


FIGURA 1. Localización de la mina São Bento. Extraído de Abreu *et al.* (1988)

PETROGRAFÍA

Para la petrografía, fue utilizado un microscopio óptico de luz reflejada, con aumentos de 100X y 200X en aire y 320X, 500X y, en algunos casos que se hizo necesario, 1250X en inmersión en aceite.

Mineralógicamente el depósito está constituido por arsenopirita, pirrotita, pirita, calcopirita, esfalerita, galena, oro, magnetita, ilmenita, siderita, ankerita, calcita, cuarzo, clorita, estilpnomelano y moscovita.

La arsenopirita, junto con la pirrotita, son las fases más abundantes en la mena de la mina São Bento, presentándose en promedio 16,94% en volumen de arsenopirita.

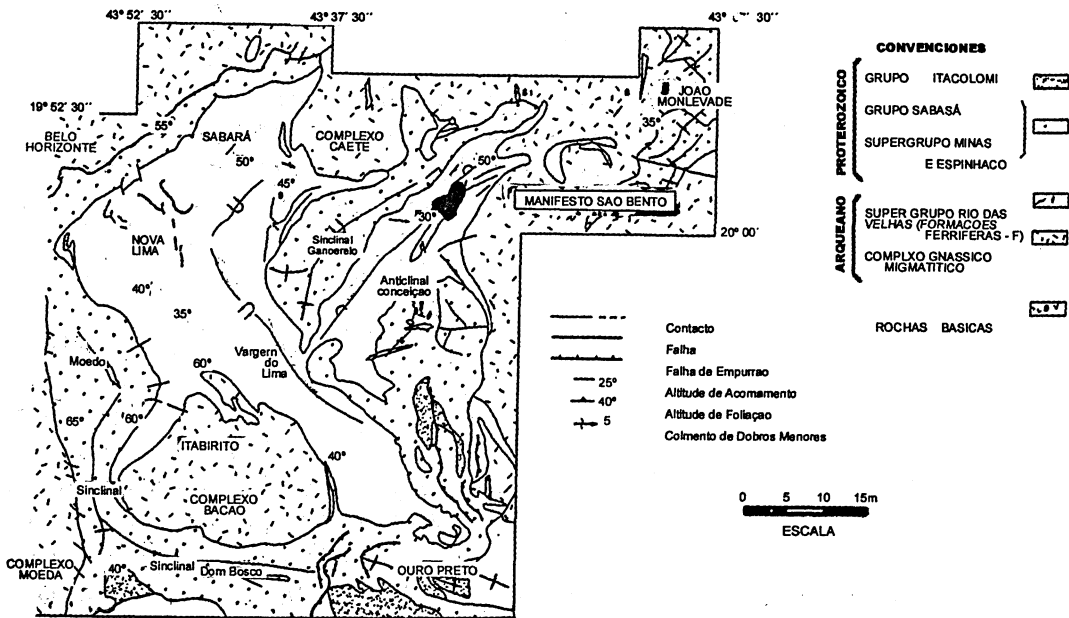


FIGURA 2. Mapa geológico regional del Cuadrilátero Ferrífero. Recopilación simplificada y parcial según Dorr (1963), Herz (1970) y Ladeira (1989).

El hábito más común de la arsenopirita es el romboedral, encontrándose en dos formas de presentación, como cristales grandes de varios cientos de micrómetros (foto 1) o como aglomeraciones de pequeños cristales de una o dos decenas de micras (foto 2). Los grandes cristales presentan en la mayoría de las ocasiones geminación en forma de “reloj de arena” (Ramdohr, 1969; Wu, 1989), y un núcleo con extinción irregular (foto 3), con los bordes mostrando extinción normal y los planos de macla a veces levemente curvados o doblados. Fue verificada la zonación de los cristales más grandes de arsenopirita utilizando tinción con una solución de $\text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$ (según lo indicado por Fleet *et al.*, 1993), donde mediante el microscopio petrográfico se hizo evidente la existencia de diferentes zonas de crecimiento (foto 4). Se pueden ver igualmente cristales totalmente anedrales, quebrados, fracturados y corroídos presentando las siguientes características: (i) sustitución a lo largo de las fracturas (foto 5); (ii) textura de “cicatrización”, (iii) sustitución siguiendo los planos de clivaje, y (iv) golfos de corrosión (foto 6). Es común también, observar

exsolución de pirrotita, a veces acompañada por oro, restringida al núcleo de los cristales de arsenopirita (foto 7).

Otros hábitos observados con menor frecuencia son el acicular, rectangular, triangular y en forma de masas de microcristales aglomerados (diámetro mayor entre 1-20 μ). Las arsenopiritas de la mina São Bento pueden ser también caracterizadas como cristales “porosos” y cristales “no porosos”. Es importante mencionar el hecho de que los cristales “porosos” de arsenopirita ocasionalmente presentan inclusiones micrométricas de oro con diámetros entre 1-10 μ (foto 8), presentando formas ameboidales, a veces acompañadas por minerales de la ganga o sulfuros como pirrotita o galena. Es común también observar arsenopiritas en la forma de pequeñas inclusiones redondeadas y elipsoidales (entre <1 μ y 10 μ) inmersas en las masas anedrales de pirrotita o, con menos frecuencia, en los minerales de la ganga, magnetita, calcopirita o esfalerita. Restringidas a ciertos lugares, algunas arsenopiritas se presentan totalmente fracturadas, y a veces redondeadas. Finalmente, pueden ser vistos cristales euedrales y subedrales de arsenopirita englobados por otros cristales de más grandes.

QUÍMICA MINERAL

Metodología

Para obtener los datos fue utilizada una microsonda electrónica Cameca, modelo SX50, con modos de operación WDS y SEM. El equipo posee cuatro espectrómetros WDS, microscopio óptico con aumento de 400X y campo de visión de 500 μ . Para los análisis de las arsenopiritas fueron utilizados fundamentalmente dos programas denominados ASULPY y ASULCAL, donde la diferencia fundamental residió en los patrones utilizados para los elementos mayores, pirita y calcopirita, para el primero y segundo respectivamente. Como elementos mayores, menores y trazas, fueron incluidos As, Fe, S, Cu, Zn, Au, Ag, Ni, Sb, Bi y Te en todos los sulfuros, usando un voltaje de 25 kV y corriente de 40 μ A. También fue utilizado un pequeño programa denominado ASULPY2, donde solo fueron incluidos Fe, S, y As, para probar la zonación química de los elementos mayores en la arsenopirita, para el cual fue utilizado un voltaje de 15 kV y una corriente de 25 μ A.

Para efectos del análisis, las arsenopiritas fueron caracterizadas, según sus formas de ocurrencia, en: euedrales y subedrales (hábitos romboedrales, romboedrales pequeños, triangular, rectangular), anedrales y como inclusión. En los granos euedrales y subedrales fueron analizados el centro y el borde. Fueron también separadas las arsenopiritas según los diferentes horizontes de la mina, esto es: São Bento (HSB), Oeste (HW), Leste (HL), Del Medio (HM) y São Bento Pinta Bém (HSBPB), con el fin de detectar variaciones entre ellos. Es importante anotar que el horizonte São Bento Pinta Bem, más que un estrato, consiste de un cuerpo resultante de la unión de dos o más horizontes, presente en algunos de los niveles de la mina, el cual por ser considerado como un unidad independiente por los

geólogos de la mina, fue tratado como un horizonte más. Se realizaron una serie de perfiles en 20 granos de arsenopirita, para establecer patrones de zonación. En total fueron realizados 530 análisis, de los cuales 117 fueron en el horizonte Oeste, 95 en el Leste, 107 en el São Bento Pinta Bem, 162 en el São Bento y 49 en el horizonte del Medio. Para los perfiles fueron analizados 355 puntos.

Plancha de FOTOS. FOTO 1. Cristal romboedral de arsenopirita (Aspy) “limpio” (sin poros), con pirrotita (Po) y oro (Au) inclusos, probablemente producto de exsolución. Aumento 200 X. **FOTO 2.** Masa de microcristales de arsenopirita (Aspy) presentando diversos hábitos. Pirrotita (Po) y minerales de la ganga (cuarzo y carbonato) dentro de los cristales de Aspy. Aumento 200 X. **FOTO 3.** Cristal eudral de arsenopirita (Aspy) (nícoles cruzados), presentando maclado en forma de “reloj de arena” y núcleo diferente. Aumento 200 X. **FOTO 4.** Cristal romboedral de arsenopirita mostrando zonación tipo *stoss side*, después de ser atacada con una solución de KMnO_4 en H_2SO_4 . Observar que corta cristales de carbonato, moscovita y cuarzo. Gotícula de pirrotita (Po) incluida en carbonato. Aumento 200 X. **FOTO 5.** Pequeña fractura en la arsenopirita llena de adentro hacia afuera por galena (Gal), oro (Au), esfalerita (Esf), calcopirita (Cpy) y pirrotita (Po). Se observa que la Aspy está siendo substituida por Po+Cpy, en la dirección de los planos de clivaje. Aumento 500 X. **FOTO 6.** Granos de oro (Au), galena (Gal) y esfalerita (Esf), rellenando cavidad en cristal de arsenopirita (Aspy) eudral, de hábito romboedral y fracturado. Aumento 100 X. **FOTO 7.** Núcleo de arsenopirita (Aspy) substituido parcialmente por pirrotita (Po) y oro (Au). Obsérvese que los granos de oro están controlados por los límites del núcleo, indicando tal vez que estos, así como la Po son producto de exsolución de la Aspy. Aumento 200 X. **FOTO 8.** Inclusión bifásica de oro (Au) y pirrotita (Po) en cristal subedral “poroso” de arsenopirita (Aspy). Aumento 200 X.

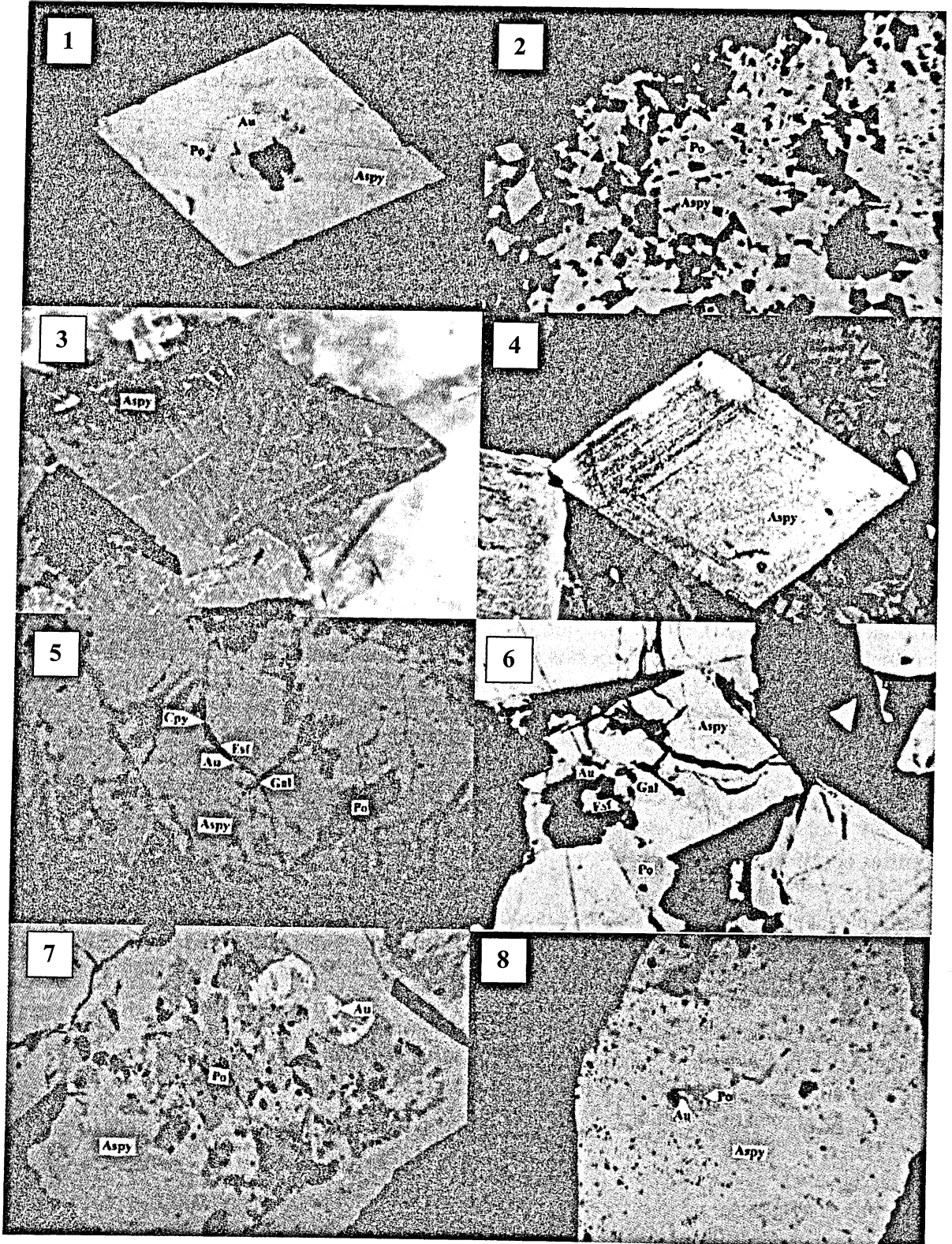
ELEMENTOS MAYORES

Límites composicionales

Los límites composicionales de las arsenopiritas, con relación a Fe, As y S, se pueden observar en el diagrama triangular de la figura 3 y son representados mediante las siguientes fórmulas estructurales:

- (i) Fe entre $\text{Fe}_{0,98} \text{As}_{0,87} \text{S}_{1,15}$ y $\text{Fe}_{1,04} \text{As}_{0,90} \text{S}_{1,06}$;
- (ii) As entre $\text{Fe}_{1,02} \text{As}_{0,82} \text{S}_{1,16}$ y $\text{Fe}_{1,01} \text{As}_{0,99} \text{S}_{1,00}$; y
- (iii) S entre $\text{Fe}_{1,01} \text{As}_{0,99} \text{S}_{1,00}$ y $\text{Fe}_{1,00} \text{As}_{0,82} \text{S}_{1,18}$.

(iv)



Kretschmar y Scott (1976), mencionan que las arsenopiritas naturales probadas en su estudio indican una deficiencia en Fe, hecho que es reforzado por los análisis químicos hechos por vía húmeda en varias arsenopiritas naturales por Klemm (1965, *in* Kretschmar y Scott, 1976). Las arsenopiritas del depósito de São Bento presentan un comportamiento atípico con 83% de los análisis con el porcentaje de Fe encima de la composición estequiométrica (*ie.* 33,33 At % Fe) y 17% con deficiencia (figura 4). Sin embargo, la variación del Fe en las arsenopiritas del depósito es pequeña, si es comparada con la variación del As y S. Todas las arsenopiritas son deficientes en As y enriquecidas en S (excepto un análisis que presenta 33,15% atómico de S). No obstante, como puede ser observado en las fórmulas estructurales y en la figura 4, el Fe en las arsenopiritas de São Bento presenta una variación máxima en el depósito en torno de 0,06 a.f.u. (átomos por fórmula unitaria), equivalente a 2,3 % atómico, en las fórmulas estructurales de los dos cristales que representan las composiciones máxima y mínima.

Las arsenopiritas de la mina São Bento, como ya fue mencionado anteriormente, varían entre $Fe_{1,02} As_{0,82} S_{1,16}$ y $Fe_{1,01} As_{0,99} S_{1,00}$, presentando un comportamiento atípico, con valores extremadamente bajos en As y altos en S en el límite inferior de un extremo, y relativamente altos en As y empobrecido en S en el otro. La figura 5, donde se comparan los a.f.u. de Fe versus S en las arsenopiritas, muestra que existe una relación inversa entre los dos. Considerándose que hay un enriquecimiento en hierro en las arsenopiritas, esta relación inversa indica la entrada del Fe excedente (por encima de la cantidad estequiométrica) principalmente en el sitio de S. Este hecho es reforzado por el gráfico de la figura 6, donde se puede observar que la razón inversa entre Fe y As, es mucho menos significativa que en el caso del S. A rigor se puede decir que el Fe puede entrar tanto en el sitio del S como en el del As, sin embargo con marcada preferencia por el de S.

Zonación

Para establecer las relaciones de zonación en los cristales de arsenopirita del depósito, fueron utilizados dos métodos: (i) análisis de centro y borde en multitud de granos, presentados en la figura 7, y (ii) perfiles (veinte en total), en granos romboedrales, euedrales y subedrales, y anedrales (figura 8). Como puede ser observado en la figura 7, donde fueron ploteados los diversos cristales analizados para centro y borde, las arsenopiritas presentan zonación, siendo la principal tendencia el aumento en la razón As/S del centro hacia los bordes. La máxima diferencia en contenido de As, en los cristales de arsenopirita probados para centro y borde, es un poco menor que 3 % atómico (aproximadamente 0,09 a.f.u.). Este tipo de zonación es evidente también en los perfiles, donde existe una tendencia similar, con la razón As/S creciendo del centro para los bordes.

En cuanto a los núcleos (“geminación”) de las arsenopiritas, estos presentan una zonación inversa, con la razón As/S disminuyendo hacia los bordes, (figura 8), lo que podría ser una evidencia de que pertenecen a una generación más antigua que sus bordes y otros cristales. Es igualmente observado, en la mayoría de los perfiles, una clara tendencia a la estequiometría en los bordes de los cristales. En la figura 3. se colocó una flecha, indicando

la dirección general de evolución de las arsenopiritas, mostrando una tendencia a la estequiometría en dirección al borde, o sea, en cuanto más joven la arsenopirita más próxima está de la estequiometría.

Teniendo en cuenta la tendencia de evolución de las arsenopiritas (figura 3), se puede sugerir que los cristales menos evolucionados (más precoces) serían aquellos que se presentan empobrecidos en As, y enriquecidos en S.

Variación química con relación a los hábitos.

La variación en la composición, respecto a los diversos hábitos de la arsenopirita (romboedral, romboedral pequeño, triangular, rectangular y anedral), es representada en la figura 9, donde son ploteados los contenidos en As y los resultados para el centro y el borde (utilizados como punto de comparación). A partir de la figura 9, se puede concluir lo siguiente:

- (i) Las arsenopiritas euedrales pequeñas son claramente diferentes, mostrando una tendencia general al empobrecimiento en As y una semejanza química, en contenido de As, con los análisis en el centro de los cristales.
- (ii) Exceptuando las arsenopiritas euedrales pequeñas, los otros hábitos de arsenopirita presentan proporciones de As semejantes y, tomando como un indicativo su contenido de As, están repartidos a lo largo de todas las etapas de evolución del depósito.

DISCUSIÓN

Las arsenopiritas de la mina São Bento presentan características especiales que las diferencian o asemejan con otras arsenopiritas ya descritas en depósitos en otras partes del mundo. Existen varios hechos interesantes a ser discutidos acerca de las características y evolución de las arsenopiritas en el depósito de la mina São Bento, los cuales serán mencionados a continuación:

- (i) Las arsenopiritas en el depósito presentan una amplia variación en la razón As/S, mostrándose característicamente empobrecidas en As y enriquecidas en S. Si se considera el hecho de que el S en las arsenopiritas es claramente alto ($1,0 > \text{a.f.u. S} > 1,18$), con relación al promedio de los datos publicados por Kretschmar y Scott (1976) ($1,1 > \text{a.f.u. S} > 0,9$), Klemm (1965) ($1,1 > \text{a.f.u. S} > 0,8$) y Rosner (1969) ($1,11 > \text{a.f.u. S} > 0,94$) y tomándose en cuenta la hipótesis de que la cantidad de S en las arsenopiritas depende directamente de la presión de confinación a que es expuesto el depósito (Clark, 1960; Sharp *et al.*, 1985), se podría considerar que las arsenopiritas de São Bento crecieron expuestas a un cierto grado de presión confinante. Sin embargo, existe mucha controversia al respecto, además de que no

se conocen relaciones más precisas entre ellas, que puedan dar alguna idea más precisa acerca de la presión reinante durante su formación. Como se observó mediante algunas peculiaridades en la petrografía (maclas dobladas, extinción irregular en el núcleo, etc.), algunas evidencias indican que parte de las arsenopiritas de São Bento muestran, por lo menos en principio, que ellas resistieron algún grado de metamorfismo.

- (ii) Otra observación interesante, es el hecho de que las arsenopiritas de São Bento son enriquecidas en Fe. Sin embargo, las publicaciones ya hechas en el ámbito mundial sugieren una deficiencia en Fe (Clark, 1960; Kretschmar y Scott, 1976; Sharp *et al.*, 1985; Wu, 1989). Este hecho podría ser explicado fácilmente, teniendo en cuenta que el ambiente donde fueron formadas las arsenopiritas del depósito fue altamente enriquecido en Fe (BIF), generando arsenopiritas con un contenido de Fe arriba de los límites normales.
- (iii) Como puede ser observado en la figura 7, donde fueron ploteados los diversos análisis en el centro y el borde de los cristales, las arsenopiritas presentan zonación, siendo la principal tendencia el aumento en la razón As/S del centro hacia los bordes, lo que según Kretschmar y Scott (1976) es una zonación normal de cristales que crecen en ambientes ricos en S, debida a la variación en la razón a_{S2}/a_{As} en el fluido mineralizante. En veinte perfiles realizados en diferentes cristales de arsenopirita, fueron observadas pequeñas variaciones en la razón As/S, debidas seguramente a pequeños cambios locales en la razón a_{S2}/a_{As} en el fluido mineralizante (Kretschmar y Scott, 1976), lo que explicaría también parte de las zonaciones inversas presentadas en algunos perfiles de arsenopirita. Además de esto, son observados perfiles que terminan de un lado, o menos comúnmente de los dos, con una tendencia al aumento en S con disminución en As, lo que se puede explicar debido a la corrosión de los granos en los bordes, como puede observarse en las evidencias petrográficas.

La zonación inversa de los núcleos, mostrada en la figura 8, indica que definitivamente existen dos generaciones diferentes de arsenopiritas formadas en ambientes químicamente diferentes. De esta forma, se considera que los núcleos fueron generados en un ambiente de deposición fuertemente enriquecido en As, probablemente con generación única de arsenopirita (Kretschmar y Scott, 1976), y los bordes en un ambiente rico en S, con generación de pirrotita, piritita y otros sulfuros, acompañando a la arsenopirita (Kretschmar y Scott, 1976). Finalmente, con relación a los perfiles en las arsenopiritas, estos presentarán siempre patrones asimétricos, lo que podría ser indicio de que los fluidos mineralizantes en el depósito actuaron con direcciones preferenciales. Sin embargo son necesarios estudios más detallados para obtener conclusiones más contundentes respecto a este asunto.

- (iv) Con relación a los diversos hábitos, las arsenopiritas euedrales pequeñas son claramente diferentes si se comparan con los otros tipos de hábito, presentando una

tendencia general al empobrecimiento en As y una semejanza química en contenido de As con los análisis hechos en los centros de los cristales (figura 9.). Esto puede ser reforzado por lo mencionado por Craig y Vokes (1993), Mookherjee (1976) y McClay y Ellis (1983), sobre la relación entre el tamaño de grano de las arsenopiritas y el grado de metamorfismo prevaleciente, donde los cristales más pequeños corresponden a aquellas fases que han sufrido el menor grado de metamorfismo. De acuerdo con esto, los cristales pequeños podrían provenir de una fase inicial de cristalización sin metamorfismo o con un grado de metamorfismo menor que el experimentado por los cristales más grandes y los bordes de los cristales con núcleo. Por otro lado, los cristales pequeños podrían tal vez ser considerados como relictos de los sulfuros originales provenientes de la Formación Ferrífera original. Finalmente, fueron hechas algunas pruebas comparando el contenido en elementos menores de las dos generaciones de cristales, sin embargo no fueron obtenidos datos con diferencias importantes entre ellos.

- (v) Con respecto a las variaciones químicas en las arsenopiritas de los diferentes horizontes, pueden ser hechas las siguientes consideraciones:
- (a) Los cristales provenientes del horizonte São Bento, muestran la mayor variabilidad en As (figura 10.), presentando las arsenopiritas menos evolucionadas y las más evolucionadas, sugiriendo tal vez que éste fue el conducto principal por donde entraron, prácticamente durante toda la evolución del depósito, los fluidos mineralizantes, tal vez posibilitados por una zona más intensamente fracturada.
 - (b) Las arsenopiritas del horizonte Del Medio están dislocadas para el lado más rico en As, indicando que en este horizonte no fueron halladas aquellas arsenopiritas aparentemente primarias, enriquecidas en As, lo que podría sugerir que este horizonte posiblemente es posterior a los otros. Sin embargo, debido a que este fue el horizonte con menor cantidad de cristales de arsenopirita analizados, esta conclusión es arriesgada, ya que existe la posibilidad estadística de que simplemente no se hallan analizado granos pobres en As.
 - (c) La relación en los otros niveles no es muy clara ya que estos presentan comportamientos similares, sin embargo, a partir de los datos obtenidos, parece ser que el flujo principal se produjo o evolucionó del centro hacia los bordes del depósito como un todo.
 - (d) El horizonte São Bento Pinta Bem es claramente enriquecido en elementos menores, presentándose especialmente enriquecido en oro “invisible”, con respecto a los otros horizontes, mientras que el horizonte São Bento es característicamente empobrecido en Au “invisible” (figura 12). Las arsenopiritas de los horizontes Del Medio y Oeste, presentan igualmente contenidos importantes en oro “invisible”, sin embargo menores que los detectados en el São Bento Pintabem. Este hecho puede indicar eventualmente una diferencia en el ambiente de formación de los dos horizontes, con una preferencia marcada por la incorporación de oro “invisible” en

las arsenopiritas del horizonte São Bento Pinta Bem, tal vez debido a fluidos con mayor contenido de arsénico, debido a la correlación positiva entre el Au “invisible” y el As encontrada por Cook & Chrysoulis (1990) y Fleet *et al.* (1993). Esto indicaría que, en principio, el horizonte São Bento Pinta Bem eventualmente es más evolucionado que el São Bento, ya que la tendencia de evolución de las arsenopiritas muestra un enriquecimiento en As con el tiempo.

Sin embargo, existe mucha discusión con relación a la correlación positiva entre As y el Au “invisible” en la literatura internacional. Cabri *et al.* (1989) mencionan que no existe correlación entre Au y As en el depósito de la mina Sheba (Canadá), excepto que las arsenopiritas de la mina requieren un mínimo de 43,3 % en peso de As para contener más que 0,035 % peso en Au y que las arsenopiritas con menos de 0,035 % peso de Au pueden tener contenidos de As encima de 45,4 % en peso. De otro lado, Fleet *et al.* (1993) mencionan que en el caso de las piritas auríferas con zonación oscilatoria de As, altos contenidos de As no siempre están relacionados altos contenidos en Au, pero regiones con significantes contenidos de Au (> 200 ppm) claramente corresponden a zonas de crecimiento ricas en As. Johan *et al.* (1989) indican que el Au “invisible” entra en la estructura de la arsenopirita substituyendo el As que está en el sitio del Fe, basados en la deficiencia en Fe que presentan las arsenopiritas ricas en Au.

Las arsenopiritas de São Bento ricas en Au (>800 ppm) son en su mayor parte enriquecidas en Fe, como puede observarse en la figura 11. Esto puede ser explicado debido a dos hechos:

- El Au “invisible” en las arsenopiritas de São Bento no es “estructural”, encontrándose como microinclusiones submicroscópicas (< 0,1 μ) como es mostrado por Cabri *et al.* (1989) para otros depósitos.
- El Au puede entrar en la estructura de la arsenopirita en otros sitios diferentes al sitio del Fe. Una posibilidad sería la entrada del Au en el sitio del S, ya que el Au presenta una correlación negativa con el S, sin embargo muy débil.

El hecho de que el horizonte São Bento Pinta Bem sea enriquecido en Au “invisible”, es reforzado por los análisis preliminares de algunas arsenopiritas de los diferentes horizontes utilizando fluorescencia de luz síncroton (realizado por Stelle, 1995), donde el mejor pico encontrado para oro corresponde a una arsenopirita del horizonte São Bento Pinta Bem.

Finalmente, las arsenopiritas euedrales pequeñas se presentan comúnmente empobrecidas en Au “invisible”, discordando con lo mencionado por otros autores que indican un enriquecimiento evidente en los cristales de arsenopirita de menor tamaño (Cook *et al.*, 1990; Johan *et al.*, 1989).

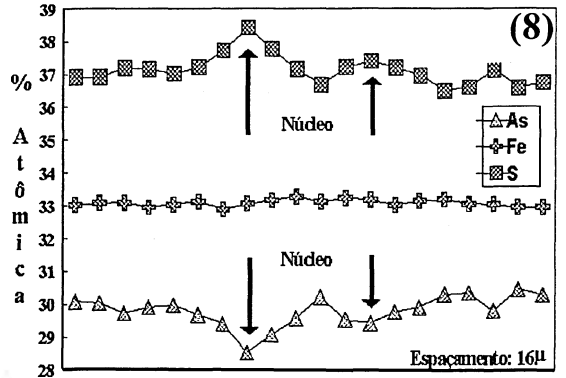
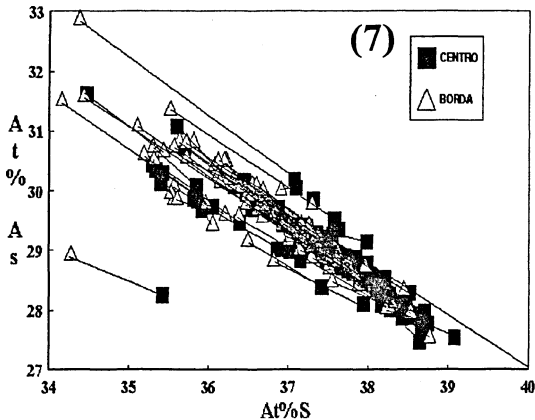
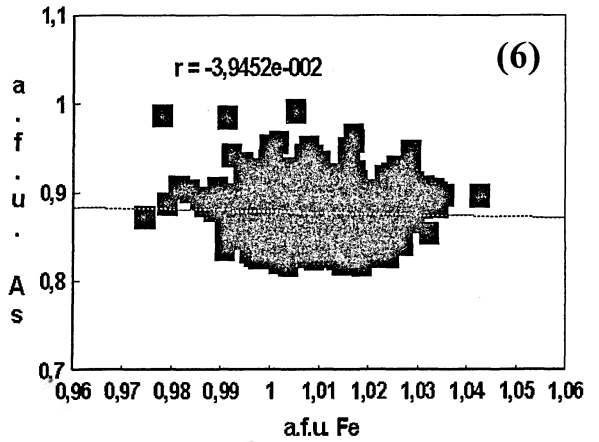
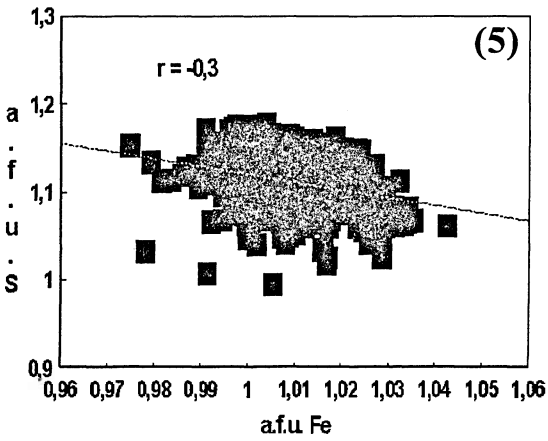
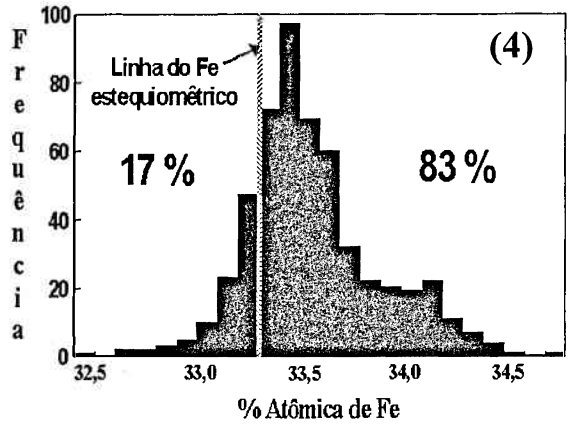
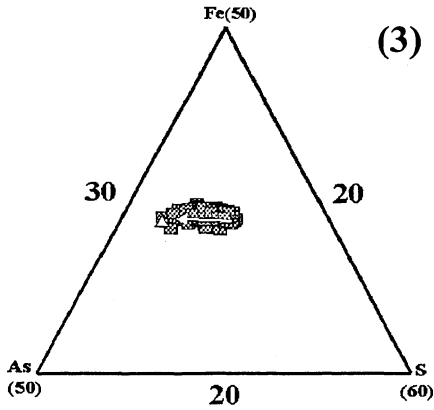


FIGURA. 3. Diagrama triangular Fe-As-S; **FIGURA. 4.** Histograma de frequências estadísticas do porcentaje atômico de Fe; **FIGURA. 5.** Diagrama Fe-S; **FIGURA. 6.** Diagrama Fe-As; **FIGURA. 7.** Diagrama S-As mostrando o centro e bordo dos cristales; **FIGURA. 8.** Perfil de cristal de arsenopirita mostrando a zonación química dos cristales

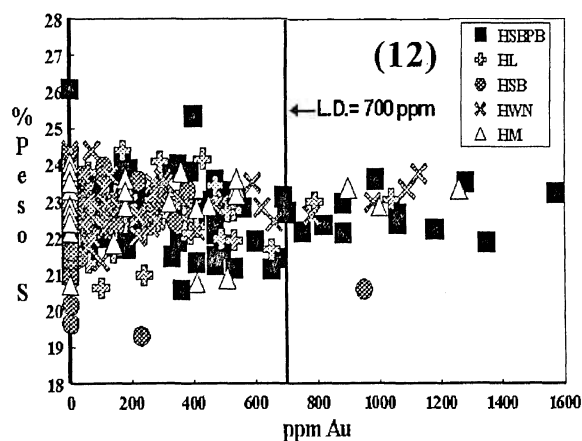
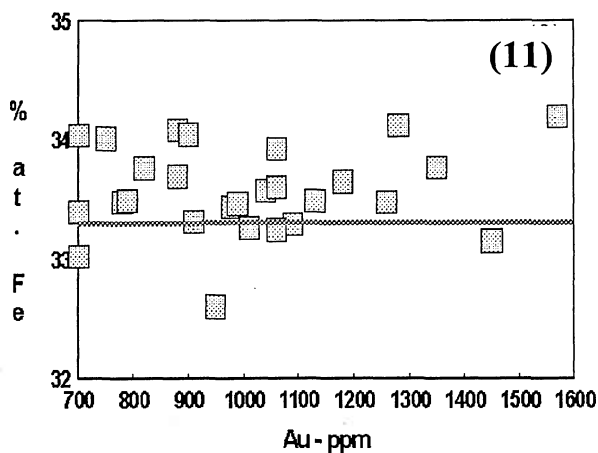
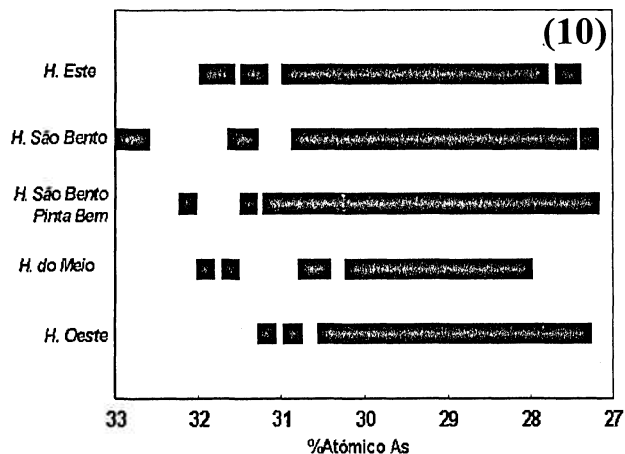
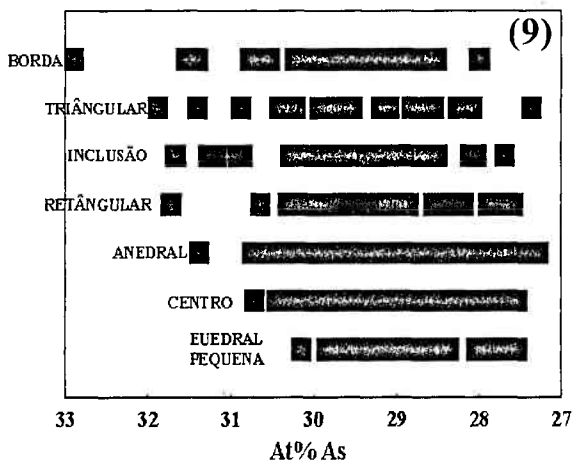


FIGURA. 9. Porcentaje atómico de As en los diferentes hábitos presentes en la arsenopirita; **FIGURA. 10.** Porcentaje atómico (% at) de As en las arsenopiritas en los diferentes horizontes; **FIGURA. 11.** Diagrama Au-Fe, la línea representa el contenido estequiométrico de As en las arsenopiritas; **FIGURA. 12.** Diagrama Au-S mostrando el contenido de Au en las arsenopiritas de los diversos horizontes.

BIBLIOGRAFÍA

CABRI, L.J.; CHRYSOULIS, S.L.; VILLIERS, J.P.R.; LAFLAME, J.H.G. y BUSECK, P.R., 1989. The nature of "invisible" gold in arsenopyrite. *The Canadian Mineralogist*, v. 27, pp. 353-362.

CLARK, L.A., 1960. The Fe-As-S system: phase relations and applications, Part I. *Economic Geology*, v. 55, pp. 1345-1381.

CLARK, L.A., 1960. The Fe-As-S sysha: phase relations and applications, Part II. *Economic Geology*, v. 55, pp. 1631-1652.

COOK, N.J. y CHRYSSOUKLIS, S.L., 1990. Concentration on the "invisible gold" in the common sulfides. *The Canadian Mineralogist*, v. 28, pp. 1-16.

COOK, N.J.; HALLS, C. y BOYLE, A.P., 1993. Deformation and metamorphism of massive sulfides at Sulitjelma, Norway. *Mineralogical Magazine*, v. 57, pp. 67-81.

CRAIG, J.R. y VOKES, F.M., 1993. The metamorphism of pyrite and pyritic ores: an overview. *Mineralogical Magazine*, v. 57, pp. 3-18.

FLEET, M.E.; CHRYSSOULIS, S.L.; MacLEAN, P.J.; DAVIDSON, R. y WEISENER, C.G., 1993. Arsenian pyrite from gold deposits: Au and As distribution investigated by SIMS and EMP, and color staining and surface oxidation by XPS and LIMS. *The Canadian Mineralogist*, v. 31, pp. 1-17.

JOHAN, Z.; MARCOUX, E. y BONNEMAISON, M., 1989. Arsénopyrite aurifère: mode de substitution de Au dans la structure de FeAsS. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 308, Série II, pp. 185-191.

KRETSCHMAR, U. y SCOTT, S.D., 1976. Phase relations involving arsenopyrite in the sysha Fe-As-S and their application. *Canadian Mineralogist*, v. 14, pp. 364-386.

McCLAY, K.R. & ELLIS, P.G., 1983. Deformation and recrystallisation of pyrite. *Mineral Magazine*, v. 47, p. 527-538.

MOOKHERJEE, A., 1971. Deformation of pyrite. *Ec. Geol.*, v. 66, p. 200.

RAMDOHR, P., 1969. *The ore minerals and their intergrowths*. Pergamon Press, Oxford, 1st. edition, 1112 p. 1174.

SHARP, Z.; ESSENE, E.J. y KELLY, W.C., 1985. A re-examination of the arsenopyrite geothermometer: pressure considerations and applications to natural assemblages. *The Canadian Mineralogist*, v. 23, pp. 517-534.