

# METALES BASE Y PRECIOSOS EN LAS ÁGUILAS, SIERRA DE SAN LUIS: MINERALOGÍA, GÉNESIS Y EVOLUCIÓN

Gabriela FERRACUTTI <sup>a\*</sup>, Ernesto BJERG<sup>a</sup> y Aberra MOGESSIE<sup>b</sup>

<sup>a</sup> INGEOSUR, CONICET - Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geología, San Juan 670, B8000ICN, Bahía Blanca, Argentina. E-mail: gferrac@uns.edu.ar

<sup>b</sup> Institute of Earth Sciences, Department of Mineralogy and Petrology, University of Graz, Universitaetsplatz 2, A8010 Graz, Austria. E-mail: aberra.mogessie@uni-graz.at

## RESUMEN

El cuerpo máfico-ultramáfico Las Águilas aflorante en las sierras de San Luis es portador de una mineralización de sulfuros que consiste esencialmente de pirrotina, pentlandita y calcopirita con participación subordinada de minerales del grupo del platino (MGP). Los resultados dados a conocer aquí fueron obtenidos a partir del estudio de muestras provenientes de los testigos de las perforaciones realizadas por la Dirección General de Fabricaciones Militares en la década del 70-80. Dicha mineralización evidencia texturas de tipo intersticial o "net texture"-textura nodular, diseminada y relleno masivo de venillas, según la relación existente entre los sulfuros y la roca hospedante, la cual se presenta principalmente en los niveles de rocas ultramáficas con minerales del grupo del espinelo. La mineralización se habría originado entre los 600-700° C a partir de la solución sólida de monosulfuro, reconociéndose una componente de mineralización magmática primaria (Po1+Ccp1 +Pn±MGP±Cub) afectada por una importante removilización (Po2+Ccp2+Pn±MGP±Py±Mck). Aunque no se determinaron diferencias químicas entre los sulfuros identificados en ambos tipos de mineralización, la diferenciación de ambos tipos es indicada por evidencias de tipo textural, el predominio de MGP asociados a los metales base removilizados y el hecho que los MGP se presentan en los bordes de los sulfuros, asociados a minerales del grupo de la serpentina y en los bordes de alteración de los espinelos.

Palabras clave: Rocas máficas-ultramáficas, MGP, metales base, Las Águilas, Argentina.

**ABSTRACT:** *Precious and base metals in Las Águilas, Sierra de San Luis: Mineralogy, genesis and evolution.* Las Águilas mafic-ultramafic body is located in the Sierras of San Luis and carries a sulfide mineralization of pyrrhotite, pentlandite and chalcopyrite with accessory platinum group minerals (PGM). The results presented in this contribution were obtained from drill core samples made by the Dirección General de Fabricaciones Militares in the 70's and 80's. The mineralization occurs in the ultramafic rocks, associated to spinels levels and shows the following textures: interstitial or net, disseminated and veins. These textures depend on the relationship between sulfides and silicate minerals. The mineralization in Las Águilas deposit was formed at 600-700° C from the crystallization of a monosulfide solid solution responsible for the primary magmatic mineralization (Po1+Ccp1+Pn ±MGP±Cub) which was later affected by a remobilization event (Po2+Ccp2+Pn±MGP±Py±Mck). There is no chemical differences between primary and remobilized sulfides but the distinction of each mineralization type was made based on textural features, with the PGMs mainly associated to remobilized base metal sulfides and the fact that most of the PGMs are located at the rim of sulfides crystals, alteration rims of spinels and associated to serpentine group minerals.

Keywords: *Mafic-ultramafic rocks, PGM, base metals, Las Águilas, Argentina.*

## INTRODUCCIÓN

Los afloramientos máficos-ultramáficos del yacimiento Las Águilas, ubicado 30 km al NE de la ciudad de San Luis, (Fig. 1), son portadores de una mineralización de sulfuros de Fe-Ni-Cu-Co (pirrotina, calcopirita y pentlandita) y de minerales del grupo del platino.

Varios son los autores que estudiaron la mineralización asociada a las rocas máficas-ultramáficas aflorantes en el sector de los yacimientos Las Águilas-Virocco en la provincia de San Luis. Entre ellos se hallan: Sabalúa *et al.* (1981); Sabalúa (1986); Malvicini y Brogioni (1992, 1993, 1996); Gervilla *et al.*

(1993, 1994, 1997); Mogessie *et al.* (1995, 1996, 2000); Bjerg *et al.* (1996, 1997); Hauzenberger *et al.* (1997); Felfernig *et al.* (1997, 1999); Kostadinoff *et al.* (1998); Felfernig (1999) y Ferracutti (2005). Estos autores determinaron que los cuerpos máficos-ultramáficos de Las Águilas y Virocco son portadores de una mineralización de sulfuros, que varía de diseminada a masiva, constituida por pirrotina, pentlandita y calcopirita, con cantidades menores de pirrita, minerales del grupo del platino, molibdenita, bravoíta, oro-electro, violarita, mackinawita, cubanita, ilmenita y como accesorios magnetita, cromita, rutilo y grafito. Además, Malvicini y Brogioni (1992, 1993, 1996) y

Ferracutti (2005) determinaron que los sulfuros reemplazan a los silicatos en las rocas mineralizadas.

La presencia de sulfuros en rocas del basamento metamórfico ha sido mencionado por Delpino *et al.* (2002, 2007), quienes establecen que entre los minerales opacos hallados en las protomilonitas y milonitas próximas a los cuerpos máficos-ultramáficos, los sulfuros son relativamente más importantes que los óxidos.

Por otra parte, Sabalúa *et al.* (1981) fueron los primeros en indicar la presencia de platino como mineral nativo en el yacimiento de Las Águilas. Posteriormente Bjerg *et al.* (1996), Gervilla *et al.* (1997), Hauzenberger

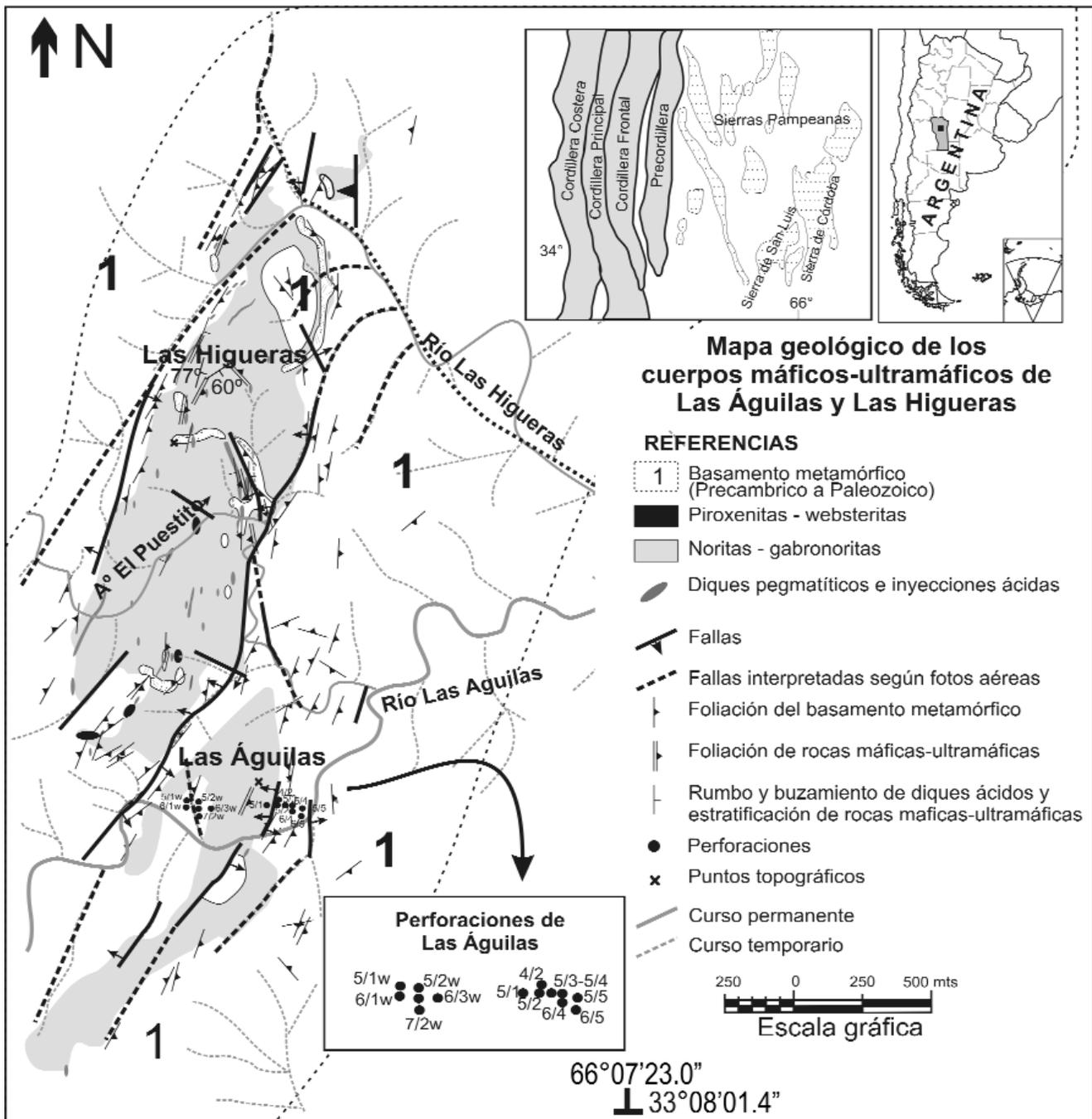


Figura 1: Mapa geológico de los cuerpos máficos-ultramáficos de Las Águilas y Las Higueras. El recuadro superior con la geología regional fue extraído de Hauzenberger *et al.* (1997, 2001)

*et al.* (1997), Mogessie *et al.* (1996, 2000) y Ferracutti (2005), determinaron que los minerales del grupo del platino se asocian principalmente a los sulfuros y en menor proporción a los espinelos y a los silicatos. Estos autores determinaron la presencia de merenskyita, sperrylita, fases minerales de Ir-Rh-As-S incluidas en arseniuros de Ni-

Co y fases minerales ricas en Pd, en los testigos de las perforaciones 5/2 y 5/3 de Las Águilas. Los estudios realizados por Mogessie *et al.* (2000) y Ferracutti (2005) establecieron que las muestras ubicadas por encima y por debajo de la zona rica en espinelos y sulfuros no contienen minerales del grupo del platino.

Hauzenberger *et al.* (1997) determinaron dos generaciones de minerales del grupo del platino a partir de evidencias texturales: **a)** principalmente merenskyita y sperrylita englobados por sulfuros de metales base y asociados a silicatos magmáticos inalterados y fases de óxidos y **b)** merenskyita, Ir-Rh-cobaltita y en menor proporción sperrylita

identificados en los contactos entre sulfuros de metales base y silicatos hidratados o incluidos en fases hidratadas de alteración. De igual manera, Mogessie *et al.* (1996, 2000) establecieron que existen tres tipos de minerales: **1)** bismutotelururos de Pd y Ni, **2)** arseniuros de Pt y **3)** sulfoarseniuros de Ir-Rh documentadas en los pozos 4/2 y 5/5.

Ferracutti y Bjerg (2002) determinaron la presencia de sperryilita, bismutotelururos de platino y paladio y bismutotelururos de paladio en rocas máficas-ultramáficas de la perforación 5/4, así como también la presencia de minerales del grupo del platino en rocas del basamento metamórfico de la misma perforación, constituyendo este último el primer hallazgo de estos minerales en rocas del basamento metamórfico.

Por otra parte, el origen de la mineralización de sulfuros asociada a los cuerpos máficos-ultramáficos ha merecido distintas interpretaciones: **a)** magmática, originada a partir de un fundido de sulfuros inmiscible en la etapa de cristalización fraccionada del magma basáltico y posteriormente removilizada en el transcurso de la deformación y metamorfismo, con participación restringida de fases fluidas (Sabalúa *et al.* 1981, Sabalúa 1986, Gervilla *et al.* 1993, 1994, 1997), y **b)** hidrotermal con escasa o nula participación magmática y vinculada al metamorfismo de cizalla regional de edad Ordovícica (Malvicini y Brogioni 1992, 1993, 1996). Skirrow y Sims (1996) sostienen que los sulfuros de Ni-Cu-Co son predominantemente magmáticos y fueron emplazados con anterioridad o durante la deformación regional D1.

Asimismo, varios autores (Mogessie *et al.* 1995, 1996, 2000, Bjerg *et al.* 1997, Hauenberger *et al.* 1997, Felfernig *et al.* 1999), sugirieron que los procesos hidrotermales como los magmáticos tuvieron participación en la mineralización de los minerales del grupo del platino. Por ello es razonable admitir que los fluidos desempeñaron un rol importante en la removilización de estos minerales asociados a niveles ricos en sulfuros en las unidades máficas-ultramáficas de Las Águilas. La removilización, transporte y formación de los MGP tuvo lugar después del pico de metamorfismo de la facies granulitas y durante la última milonitización y

evento de deformación (500-600° C, 4-5 Kbar) que afectó a las rocas máficas y al basamento cristalino (Mogessie *et al.* 2000). Finalmente, Ferracutti y Bjerg (2002) presentaron nuevas evidencias que vinculan parte de a la mineralización con un evento de deformación (milonitización) y fracturación de las rocas máficas-ultramáficas. El hecho de que los sulfuros vinculados a las fajas milonitizadas fueran posteriormente disectados y atravesados por numerosas venillas rellenas por minerales del grupo de la serpentina, evidencian la presencia de procesos hidrotermales actuantes en la roca colaborando en la removilización y concentración de la mena.

El objetivo del presente trabajo es fundamentalmente brindar una detallada descripción de las características ópticas y químicas de los minerales de mena dominantes y de los minerales del grupo del platino. Sin embargo, dada la escasa representación de los sulfuros en muestras de superficie y en vista de que en estas últimas no han sido reconocidos sulfuros que sean diferentes a los identificados en las muestras de testigos de perforación de Las Águilas, las composiciones químicas indicadas corresponden a muestras de aquellas perforaciones en las cuales la mineralización se encuentra mejor desarrollada.

La detallada descripción de la mineralización presente en el cuerpo máfico-ultramáfico de Las Águilas y la determinación de las texturas involucradas permitió la elaboración de un cuadro paragenético y definir un modelo aplicable a la génesis del yacimiento.

## MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

Los afloramientos de rocas máficas-ultramáficas de interés se hallan situados dentro de la unidad morfoestructural de las Sierras Pampeanas. Dicha unidad fue dividida en tres grandes regiones (Miró 1999) que de este a oeste son: las Sierras Pampeanas *s. s.*, las Sierras Famatinianas y las Sierras Pampeanas Occidentales, división efectuada según el conocimiento actual de sus asociaciones litológicas, magmáticas y tectónicas. La sierra de San Luis, la cual constituye el área de interés en el presente trabajo, se ha-

lla comprendida dentro de las Sierras Famatinianas. Sin embargo, cabe destacar que tanto las Sierras Pampeanas *s. s.* como las Sierras Famatinianas fueron agrupadas por Caminos (1979) como Sierras Pampeanas Orientales, en cuyo extremo suroeste se halla la sierra de San Luis (recuadro Fig. 1).

El basamento metamórfico de la sierra de San Luis es de edad precámbrica (Söllner *et al.* 2000 y Brodtkorb *et al.* 2005) y ha sido intruido por diversos cuerpos plutónicos. Los *stocks* graníticos se encuentran como intrusivos en el basamento de bajo grado, mientras que las fajas discontinuas de intrusivos máficos-ultramáficos, se asocian al basamento de alto grado metamórfico.

Según Sims *et al.* (1998) y Hauenberger *et al.* (1997, 2001), el basamento cristalino de la sierra de San Luis está constituido por tres bloques principales separados por zonas de milonitas: **1)** el bloque este (Complejo Metamórfico Conlara) comprende principalmente gneisses y migmatitas de alto grado; **2)** el bloque central (Complejo Metamórfico Pringles) cuyo grado metamórfico varía de facies esquistos verdes a anfibolita, y localmente a facies granulitas en la vecindad de los cuerpos máficos, se compone de filitas, micaesquistos, gneisses, migmatitas, intercalaciones de cuerpos máficos-ultramáficos, cuerpos tonalíticos-granodioríticos y pegmatitas y, **3)** el bloque oeste (Complejo Metamórfico Nogolí) formado mayormente por ortogneisses migmatíticos y gneisses de alto grado con lentes de anfibolitas.

## MARCO GEOLÓGICO LOCAL

El basamento adyacente a los cuerpos máficos-ultramáficos de interés, en el bloque central, está constituido por gneisses miloníticos cuyo gradiente metamórfico se sitúa en la facies granulitas a esquistos verdes. Los gneisses miloníticos se hallan compuestos por  $grt+crd+sil+bt+kfs+pl+qtz\pm opx$ , con opacos (óxidos y sulfuros), rutilo y zircón como principales minerales accesorios. Las rocas máficas-ultramáficas conforman cuerpos lenticulares en una faja de rumbo NE, que se extiende por 100 km con un ancho de entre 3 y 5 km. Las Águilas y Las Higueras (Fig. 1) constituyen los dos com-

plejos máficos-ultramáficos situados al sur de la faja, constituidos por noritas, piroxenitas y dunitas, a las cuales se asocia en profundidad, una mineralización de sulfuros de metales base y de minerales del grupo del platino.

Las rocas máficas a ultramáficas se componen principalmente de 1)  $opx+hbl+pl\pm cpx\pm bi\pm spl\pm$  sulfuros  $\pm$  minerales del grupo del platino y accesorios como apatito y, 2)  $ol+spl+$  sulfuros  $\pm$  MGP (Mogessie *et al.* 1995, Hauzenberger *et al.* 1997, Felfernig *et al.* 1997). Hauzenberger *et al.* (1997) y Hauzenberger (1997) determinaron temperaturas de 750° a 850° C, a través de estudios de termometría basados en dos piroxenos, mientras que Ferracutti *et al.* (2006) obtuvieron un rango de temperaturas de entre 600 y 700° C considerando el par Spl-Ol.

Finalmente, la edad de esta faja de rocas ígneas ha sido considerada como precámbrica (Sabalúa *et al.*, 1981) y precámbrica superior a cámbrica (Gervilla *et al.*, 1993). Mas recientemente, Sato *et al.* (2002) determinaron en base a una isócrona Sm-Nd una edad mesoproterozoica temprana (1502  $\pm$  95 Ma) para las rocas máficas-ultramáficas de la sierra Oeste de San Luis.

## METODOLOGÍA

Las muestras estudiadas corresponden a rocas de superficie y a testigos de perforación y fueron analizadas con una combinación de microscopía de luz reflejada, microsonda electrónica y microscopio electrónico de barrido (SEM). Los análisis minerales fueron llevados a cabo en el *Institute of Mineralogy and Petrology of the Karl Franzens University Graz*, Austria con un microscopio electrónico de barrido (JEOL 6310 SEM) equipado con un sistema dispersivo de energía (EDX) LINK ISIS y un sistema dispersivo de onda (WDS) MICROSPEC.

Los sulfuros y minerales del grupo del platino han sido analizados usando un voltaje de aceleración de 20 kV y un tiempo de conteo de 100 segundos, calibrado sobre cobalto. Los patrones estándar empleados para el análisis de los minerales de mena corresponden a sulfuros (pirrotina, calcopirita, pentlandita, arsenopirita), minerales del grupo del platino y metales puros. Asimismo, han sido incluidos en este traba-

jo parte de los análisis químicos minerales determinados por Felfernig (1999) y Hauzenberger (1997), los cuales incrementaron la base de datos utilizada.

Las abreviaturas utilizadas en este trabajo para los sulfuros son las sugeridas por Kretz (1983).

## SULFUROS EN LAS ROCAS MÁFICAS-ULTRAMÁFICAS

Entre los principales minerales formadores de mena se han reconocido (en orden de abundancia decreciente): pirrotina (Po), pentlandita (Pn) y calcopirita (Ccp). Por otra parte, también se presentan pirita (Py), mackinawita (Mck), molibdenita (Mo), covelina (Cv), violarita (Vl), marcasita (Mr), bornita (Bn), cubanita (Cub) y valleriita (Vii).

En general, los minerales de mena se presentan en los contactos entre cristales de silicatos, como rellenos de fracturas que atraviesan a los silicatos y a los óxidos (grupo del espinelo) y como inclusiones dentro de las fases silicatadas. Presentan texturas de reemplazo pseudomórfico, caries directa e inversa con respecto a otras fases de minerales opacos y/o respecto a los silicatos. En ocasiones se puede observar a los sulfuros reemplazando a los silicatos, a los cuales gradualmente van digiriendo y englobando hasta quedar sectores de sulfuros masivos con remanentes de silicatos (Fig. 2a).

El estado y conservación de los sulfuros depende del comportamiento ante los eventos de deformación y tectonismo y de los fenómenos de alteración sufridos por la roca que los alberga. Cuando la deformación es intensa, los minerales de mena se hallan fracturados, con deformación dúctil (flexuración del clivaje de la pirrotina) y en los casos en que la alteración es importante tanto los sulfuros como los silicatos son atravesados por venillas de serpentina inferiores a los 200  $\mu$ m de ancho (Fig. 2b). En líneas generales los sulfuros evidencian un notorio predominio de una respuesta frágil frente a los fenómenos de deformación que los han afectado.

Cuando los sulfuros están asociados a zonas de recristalización de silicatos son < 70  $\mu$ m.

## CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS Y QUÍMICA MINERAL DE LOS SULFUROS

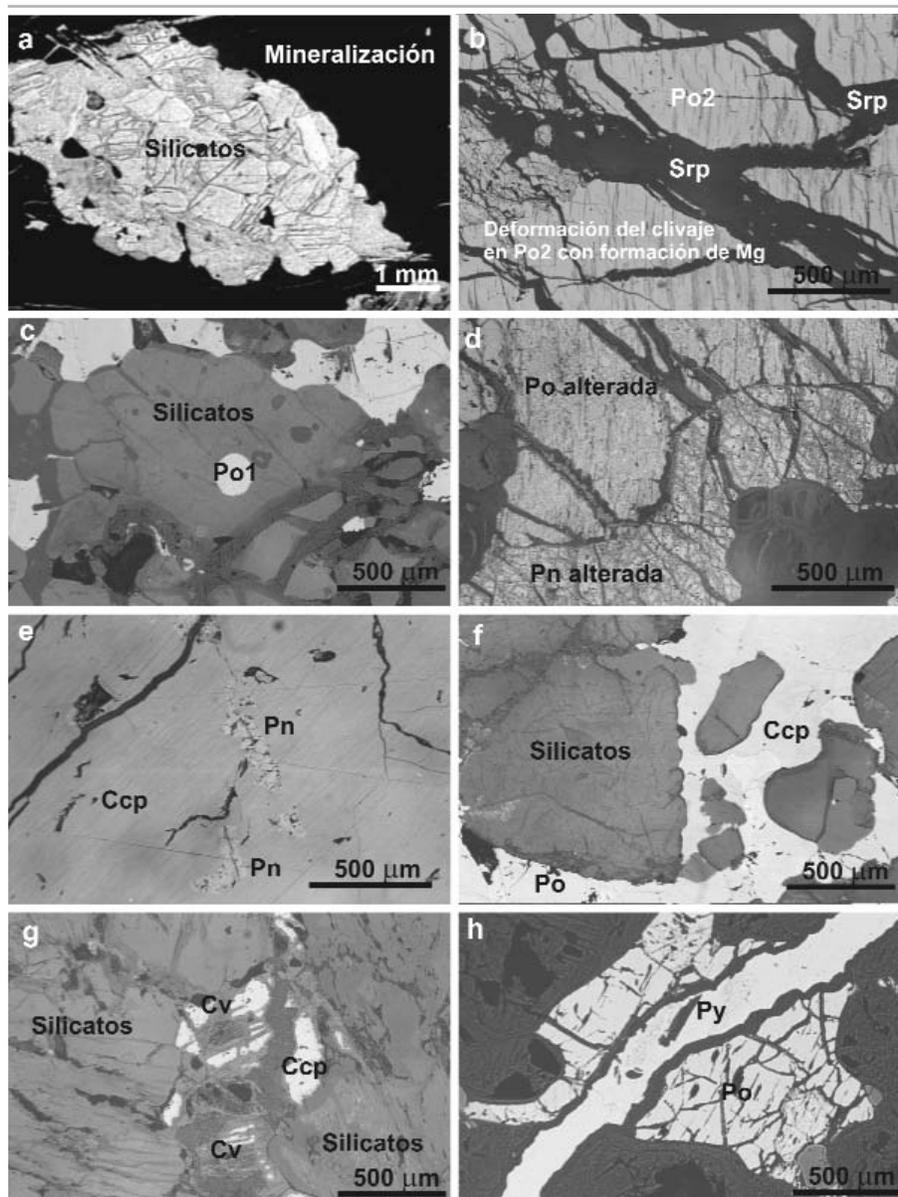
**Pirrotina ( $Fe_{1-x}S$ ) ( $x \leq 0,2$ ):** La pirrotina (Po) es el mineral de mena más abundante (70 %) entre los sulfuros que presentan textura intersticial ("net texture"), diseminada y de relleno de venillas masivas.

Ópticamente, se presenta con un color rosado muy claro con marcado pleocroismo que varía entre un amarillo cremoso y el morado. Las líneas de clivaje se hacen más evidentes cuando el mineral se halla afectado por la deformación y los procesos de alteración; estos últimos ven favorecido su accionar por la presencia de las fracturas que facilitan la circulación de fluidos. La anisotropía es muy fuerte ya que con nicols cruzados y una fuerte iluminación únicamente es posible observar un cambio de color dentro de los pardos oscuros a rojizos. No se ha identificado la presencia de maclas.

En su mayoría, los cristales de Po presentan exsoluciones de pentlandita tipo llamas (*flame like*), así como también en venillas policristalinas de granos subhedrales que se desarrollan a partir de los bordes y las fracturas del mineral hospedante.

Se ha efectuado una distinción entre dos tipos de pirrotinas (Po1 y Po2) basada en las diferencias ópticas, en las asociaciones minerales y las características particulares de los cristales:

**Pirrotina 1 (Po1):** se presenta como cristales anhedrales a subhedrales, asociada a pentlandita y calcopirita 1 (Ccp1). La Po1 se halla como pequeñas inclusiones ( $\leq 110 \mu$ m) dentro de los silicatos (Fig. 2c), algunas de las cuales poseen a su vez inclusiones de Ccp1 (< 20  $\mu$ m), o como agregados cristalinicos situados en los espacios intersticiales entre los silicatos, con tamaños inferiores a los 3,3 mm, aunque por lo general no superan 1,1 mm. Los cristales de Po1 son afectados por los fenómenos de deformación frágil (fracturación) y dúctil (flexuración o curvatura de las líneas de clivaje), aunque es notable el predominio del primero de tales fenómenos sobre el segundo. Cuando los cristales estuvieron sujetos a la deformación dúctil poseen un mejor estado de conservación ya que no son afectados tan intensa-



**Figura 2:** a) Silicatos incluidos y digeridos por la mineralización, b) deformación del clivaje de la Po con reemplazo por magnetita, c) Po1 incluida en silicato, d) estadio mas avanzado de alterción de la Po con formación de un agregado de grano fino, e) exsoluciones de Pn en Ccp, f) contacto Ccp-Po y silicatos, g) Cv reemplazando pseudomórficamente a Ccp, h) venilla de Py atravesando a sulfuros y silicatos.

mente por los fenómenos de alteración. *Pirrotina 2 (Po2)*: se ha denominado Po2 a la pirrotina que integra la mineralización diseminada alojada en los contactos entre silicatos con un tamaño de cristal que fluctúa entre 0,38 y 1,2 mm. También ha sido reconocida como constituyente del relleno de fracturas inferiores a los 70  $\mu\text{m}$  que atraviesan a los minerales del grupo del espinel y silicatos y/o en los planos de debilidad de estos últimos (clivaje). A diferencia de la Po1, la Po2 evidencia una respuesta dúctil

ante los efectos de deformación de la roca de caja, fenómeno evidenciado por la curvatura de las líneas de clivaje (Fig. 2b). Ambos tipos de pirrotina (Po1 y Po2) han sido afectados por procesos de alteración, los cuales dan lugar a la formación del llamado "producto intermedio" (Ramdohr 1980). Cuando la roca que contiene a la pirrotina se encuentra afectada por un fuerte grado de serpentización (etapas más avanzadas de la alteración el "producto intermedio"), este sulfuro se ve afectado por

un fenómeno de alteración que da lugar su reemplazo pseudomórfico a partir del clivaje, por una mezcla de grano muy fino (Fig. 2d) en la cual se observa pirita, magnetita y marcasita con textura ojo de pájaro (*bird eye*, Ramdohr 1980).

Los cristales de Po suelen ser reemplazadas por la magnetita a partir del clivaje (Fig. 2b, 2d) y de los bordes cristalinos cuando se halla en contacto con esta última.

Finalmente, tal como se observa en las figuras 3a-c, donde han sido graficados 80 análisis correspondientes a pirrotinas Po1 y Po2, este sulfuro es muy homogéneo y no evidencia variaciones composicionales significativas que permitan diferenciar dichas variedades.

Los contenidos de Ni en la pirrotina son inferiores a el 2,35% en peso. Los contenidos de Au por lo general se encuentran por debajo del límite de detección instrumental, aunque en pocos casos se ha determinado la presencia de contenidos de dicho elemento  $\leq 1,67\%$  en peso (Cuadro 1).

**Pentlandita** ( $(\text{Fe}, \text{Ni})_9 \text{S}_8$ ) No es abundante en muestras máficas de superficie donde solamente se presenta como exsoluciones en Po, aunque su abundancia relativa se incrementa en las muestras ultramáficas provenientes de los testigos de perforación. En estas últimas, la pentlandita integra el conjunto de sulfuros que se presentan en forma intersticial y como diseminados, variedades en las cuales su participación modal llega hasta el 20%. También integra el cortejo de minerales de mena que constituyen venas masivas, en las cuales su participación oscila entre el 10 y el 15 % modal. Ópticamente es un mineral isotrópico de color crema y cuando se halla como exsolución dentro de la Po (Fig. 2e) y la Ccp, su alta reflectividad y la ausencia de pleocroismo la diferencian claramente del mineral hospedante.

Se presenta como agregados cristalinos anhedrales a subhedrales, fuertemente fracturados, que se desarrollan a partir de fracturas y bordes en la Po y/o como exsolución tipo llama en Po y en el contacto Po-Ccp. Los cristales de Pn poseen tamaños que llegan a los 2,2 mm, aunque en general son inferiores a los 660-800  $\mu\text{m}$ . Por otro lado, cuando se presenta como exsolución tipo llama éstas llegan a medir hasta 130  $\mu\text{m}$

de largo.

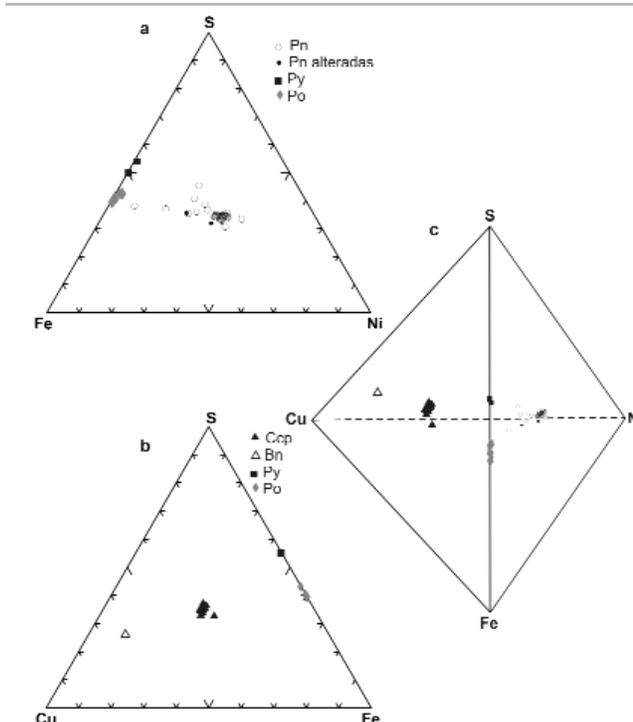
Por otra parte, en los diagramas de las figura 3a-c pueden observarse los análisis correspondientes a 56 Pn analizadas. En general poseen un rango amplio de contenidos de Co, el cual varía de 0,01 a 5,03% en peso. Si bien el Au y el Ir no siempre están presentes en la estructura de la Pn, se han determinado contenidos de hasta 4,95% y 2,75% en peso, respectivamente (Cuadro1). La presencia de estos elementos adicionales en la estructura de las Pn se manifiesta en la dispersión de valores en el diagrama.

**Calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>):** La calcopirita (Ccp) es un mineral que ópticamente presenta color amarillo y tanto el pleocroísmo como la anisotropía son muy débiles. Al igual que la pirrotina, se han identificado cristales de calcopirita con características y asociaciones minerales diferentes:

**Calcopirita 1 (Ccp1):** En el grupo de sulfuros que presentan texturas intersticiales su abundancia relativa alcanza el 10% modal. Los cristales tienen formas anhedrales a subhedrales y se presentan en contacto con la Po1 (Fig 2f) o en la interfase silicato-Po1, con tamaños inferiores a los 800 μm. La presencia de este tipo de calcopirita como inclusión en Po1 es poco significativa.

**Calcopirita 2 (Ccp2):** El contenido modal de este tipo de calcopirita oscila entre el 15 y el 20% entre los sulfuros que constituyen la mineralización diseminada y las venillas masivas. Se presenta como cristales subhedrales a anhedrales, en contacto con la Po2 y/o Pn; y en las texturas diseminadas se han observado escasos cristales individuales entre los silicatos. Cuando se presentan rellenando fracturas los cristales alcanzan los 8800 μm mientras que en los casos en que constituye relleno de finas zonas de debilidad (clivaje y fracturas menores en silicatos) el tamaño es inferior a los 20 μm. Por otro lado, como integrante de la mineralización diseminada, sus cristales son <330 μm. En unos pocos casos se ha determinado la presencia de exsoluciones de mackinawita (Mck) y ocasionalmente se ha observado su reemplazo por covelina (Fig. 2g).

Al igual que la Po, la composición de este mineral no presenta variaciones significativas, tal como se desprende de la escasa dispersión de los valores graficados (Figura 3b-c). En razón de esto último no es posi-



**Figura 3:** Diagrama del sistema de fases Fe-Ni-S y Cu-S-Fe en los cuales se incluyen datos correspondientes a: a) Pn-Po-Py, b) Po-Py-Ccp-Bn, y c) Po-Py-Ccp-Bn-Pn. Basado en el diagrama de Craig y Kullerud (1969).

**CUADRO 1.** Análisis representativos de pirrotinas (Po), pentlanditas (Pn), calcopiritas (Ccp) y pirritas (Py) de muestras de las perforaciones del depósito Las Águilas.

Muestra	4/2 35.4	7/4 99.55	7/4 158.6	7/4 148.4	4/2 36.5	7/4 137.6
Mineral	Po1	Po1	Po2	Po2	Pn	Pn
% en peso						
Fe	56,75	55,76	59,96	58,61	27,87	28,69
Cu	0,00	0,00	0,35	0,00	0,00	0,00
Ni	1,40	2,35	0,77	0,24	38,08	23,29
Co	0,00	0,00	0,23	0,00	1,51	5,03
Au	0,00	0,00	0,00	1,67	0,00	1,00
S	41,35	42,07	39,27	39,55	32,27	42,85
Bi	0,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	99,50	100,78	100,58	100,07	99,73	100,86
Muestras	4/2 35.4-2	4/2 36.5	7/4 158.6-2	7/4 148.4-8	7/4 165.0	7/4 98.7
Mineral	Ccp1	Ccp1	Ccp2	Ccp2	Py	Py
% en peso						
Fe	30,29	32,08	31,15	30,68	43,08	50,16
Cu	33,84	33,80	34,66	33,23	0,00	0,00
Ni	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21
Co	0,00	0,00	0,00	0,00	1,90	0,00
Au	0,00	0,00	0,00	1,45	1,92	0,00
S	34,76	34,31	33,49	35,11	53,19	50,21
Bi	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00
Total	98,89	100,19	100,05	100,47	100,09	100,58

ble diferenciar desde el punto de vista químico las variedades Ccp1 y Ccp2. Los datos disponibles indican que las Ccp composicionalmente son homogéneas, con muy escasa participación de otros elementos en su estructura. El contenido en Au alcanza un máximo de 5,02% en peso pero en gene-

ral es inferior a 1,45%. (Cuadro 1)

**Pirrita (FeS<sub>2</sub>):** Este mineral es escaso en las muestras estudiadas. En general los cristales, anhedrales a subhedrales, presentan tamaños inferiores a los 360 μm. Los cristales de Py son de color blanco, con alta

reflectividad y ocasionalmente se ha reconocido su remplazo por magnetita.

Se han diferenciado tres formas bajo las cuales este mineral se presenta en las muestras estudiadas: **a)** asociada a la Po<sub>2</sub> y/o Ccp<sub>2</sub>, a quienes reemplaza cuando se halla en contacto directo con las mismas; **b)** como producto de alteración que conlleva a la formación de una asociación de grano fino semejante a la marcasita con textura "ojo de pájaro", caracterizada por el remplazo de la pirrotina según sus líneas de clivaje; **c)** rellenando fracturas con dimensiones que oscilan entre los 450 y los 160 μm, las cuales disectan no solo a la roca de caja sino también a los restantes sulfuros (Fig. 2h).

Los análisis correspondientes a este mineral son presentados en la Cuadro 1. Por otra parte, en la Figura 3a-b-c, puede observarse que el campo de composiciones de la Py se ubica por encima del correspondiente a la Po, es decir, más próximo al extremo del S, mostrando una notable homogeneidad composicional.

**Mackinawita** (Fe, Ni)<sub>9</sub>S<sub>8</sub> Este sulfuro es muy poco frecuente en el yacimiento. Se presenta en cristales de aproximadamente 10-20 μm, asociados a la variedad de calcopirita que rellena fracturas (Ccp<sub>2</sub>), como un producto de exsolución en la misma.

Es un mineral que ópticamente presenta color amarillo claro y fuerte pleocroísmo y anisotropía en tonalidades grises.

#### Producto intermedio

(Zwischenprodukt): Como resultado del proceso de oxidación de la Po se ha reconocido la formación del denominado "producto intermedio" (Zwischen-produkt de Ramdohr 1980), el cual se encuentra desarrollado a partir de clivajes y fracturas de la Po (Fig. 2d). En etapas más avanzadas de la alteración tendría lugar la formación de agregados finos de pirita y una fase similar a la marcasita.

Este producto de alteración es de color gris y su pleocroísmo varía del gris oscuro a los tonos pardos.

**Violarita** (Fe<sup>2+</sup>Ni<sup>3+</sup>)<sub>2</sub>S<sub>4</sub>: Se ha determinado ópticamente la presencia de este mineral como un producto de alteración de la Pn (Fig. 2d). Este remplazo pseudomórfico en ocasiones llega a ser completo y el mismo se origina a partir de los bordes y fracturas de la Pn.

Es una fase abundante que se presenta de color violáceo a pardo rojizo, sin pleocroísmo.

**Covelina** (CuS): Mineral secundario, poco abundante, que reemplaza pseudomórficamente a ambas generaciones de Ccp (Ccp<sub>1</sub> y 2) a partir de los bordes y fracturas (Fig. 2g), en ocasiones reemplazando por completo a este mineral.

Entre las propiedades ópticas observadas se destaca su color azul y su marcado pleocroísmo, entre el púrpura y el violeta. Estas características ópticas sugieren que se trata de Spionkopita (Cu<sub>1,4</sub>S).

**Marcasita** (FeS<sub>2</sub>): Mineral asociado a la Py y a la magnetita, el cual constituye una mezcla de finos agregados que reemplazan a la Po según las líneas de clivaje. Ramdohr (1980) establece la formación de Mr con textura ojos de pájaro a partir de la alteración de Po. A la mezcla de grano muy fino la denomina Mr dada su alta susceptibilidad a la meteorización (Fig. 2d).

Es de color blanco con tintes amarillentos y su pleocroísmo incluye la gama de los marrones.

**Valleriíta** (Fe, Cu)<sub>4</sub>S<sub>4</sub>(Mg, Al)<sub>3</sub>(OH)<sub>6</sub> solo ha sido observada esporádicamente como un producto de alteración a partir de los bordes de la Ccp. Ópticamente es de color oscuro, tono pardo anaranjado y su pleocroísmo y anisotropía fluctúan de gris a bronce.

**Cubanita** (Cu Fe<sub>2</sub>S<sub>3</sub>): La cubanita es un mineral que solamente ha sido identificado en una muestra de la perforación 5/2, como exsolución

de color crema y forma subhedral en Ccp<sub>1</sub> (Fig. 4a).

## MINERALES DEL GRUPO DEL PLATINO

Se han identificado en muestras de las perforaciones 4/2, 5/2, 5/3, 5/4, 5/5, 6/4 y 7/4 cristales de color blanco, con tamaños promedios de 6 a 40 μm, alto poder reflector, euhedrales a subhedrales y que se encuentran incluidos en Ccp, Po y/o Pn. Estos minerales se presentan aislados, son escasos, y en niveles de rocas ultramáficas que en conjunto no superan los 2 metros de espesor aparente.

Se han observado cristales de estos minerales asociados a la mineralogía de sulfuros magmáticos primarios (Ccp<sub>1</sub>-Po<sub>1</sub>) bajo la forma de inclusiones con tamaños inferiores a los 40 μm. Sin embargo, los MGP se presentan principalmente en los bordes de granos (Fig. 4b-c), zonas de fracturas y como inclusiones en sulfuros secundarios (Po<sub>2</sub>) (Fig. 4d).

En base a los análisis de microsonda electrónica fue posible determinar tres grupos principales (Cuadro 2):

**Bismotelururos de paladio:** este grupo de minerales comprende merenskyíta [(Pd,Pt)(Te,Bi)<sub>2</sub>] - melonita (NiTe<sub>2</sub>) y solamente unos pocos cristales, sobre un total de 104 muestras estudiadas, corresponden a mi-chenerita [(Pd,Pt)BiTe] y telurobismutita (Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>) (Fig. 5a).

**Arseniuros de platino:** se identificó

**CUADRO 2.** Análisis representativos para minerales del grupo del platino (MGP) de muestras de las perforaciones del depósito Las Águilas.

Muestras	6/4 111.8	4/2 34.3	4/2 42.7	6/4 96.3	7/4 108.3	7/4 108.3
Mineral	PdBiTe	PdBiTe	Sperrilita	Cobaltita	Irarsita	Hollingworthita%
% en peso						
Fe	1,22	0,00	0,00	6,05	1,22	1,58
Cu	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65	0,47
Ni	5,91	3,17	0,00	5,41	0,44	1,87
Co	0,00	0,00	0,00	24,02	1,63	5,57
Au	0,00	0,00	0,00	2,96	5,21	0,00
S	0,51	0,00	0,00	19,09	9,68	13,18
As	0,00	0,00	42,89	40,74	22,46	31,90
Te	57,25	54,62	0,00	0,00	0,00	0,00
Bi	13,57	20,92	0,00	0,00	0,00	0,00
Pd	10,78	21,30	0,00	0,00	0,00	0,00
Rh	0,00	0,00	0,00	0,00	6,26	42,94
Ir	0,00	0,00	0,00	0,00	45,84	2,00
Pt	11,13	0,00	57,57	0,00	1,63	0,00
Total	100,37	100,01	100,46	98,27	100,53	101,83

sperrylita ( $\text{PtAs}_2$ ), representada por cristales de alto poder reflector encontrados en asociación con minerales de mena (Fig. 4c).

**Sulfoarseniuros:** este grupo de minerales comprende dos series de soluciones sólidas, la primera de ellas integrada por cobaltita ( $\text{CoAsS}$ ), arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ) y gersdorffita ( $\text{NiAsS}$ ) (Fig. 5b), en tanto que la otra serie se halla conformada por irarsita ( $(\text{Ir, Ru, Rh, Pt})\text{AsS}$ ) - hollingworthita ( $(\text{Rh, Pt, Pd})\text{AsS}$ ).

## RELACIONES TEXTURALES

### Minerales de mena-roca hospedante

Se han establecido tres tipos de texturas meso-microscópicas a partir de la relación existente entre los minerales de mena y la roca hospedante, las cuales corresponden a intersticial nodular, diseminada y relleno masivo de venillas.

Las texturas intersticial y nodular se caracterizan por una relación sulfuros-minerales de la roca de caja que puede variar entre 90:10 % y 20:80 % (Fig. 4e-f). Ambas texturas se asocian principalmente a los niveles ultramáficos que generalmente son portadores de minerales del grupo del espinelo. En estas texturas los sulfuros se presentan como inclusiones dentro de los silicatos y en los contactos y espacios intersticiales rodeando a los silicatos y óxidos a los cuales tienden a reemplazar a partir de sus bordes (Fig. 2f). El modelo de las "bolas de billar" propuesto por Naldrett (1973) es generalmente usado para explicar las texturas de las menas originadas a partir de líquidos inmiscibles. En una secuencia de cristalización primaria, el modelo de las bolas de billar explicaría la presencia de las texturas de sulfuros masivos, intersticiales y diseminados.

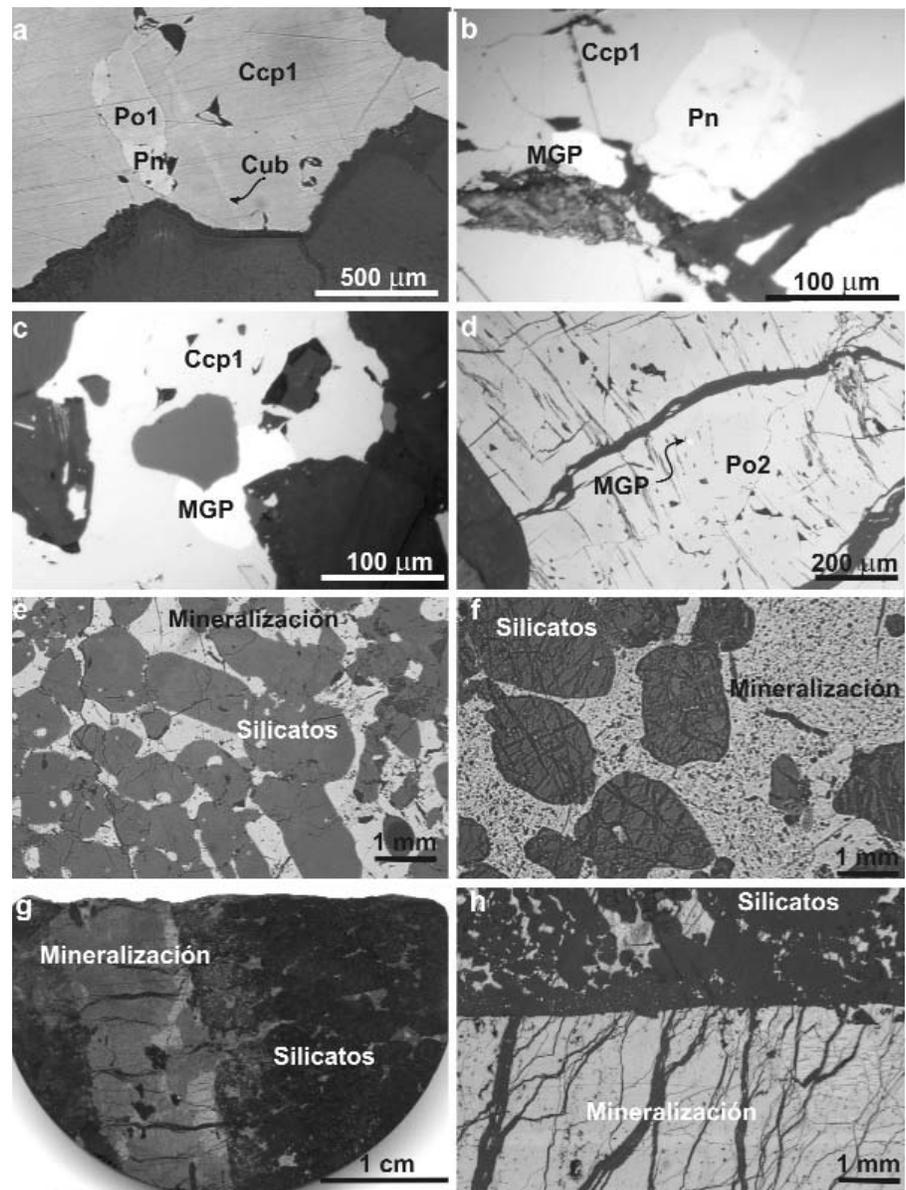
Por su parte, la textura diseminada se observa tanto en rocas máficas como ultramáficas, donde los sulfuros se presentan en proporciones inferiores al 20% y distribuidos inhomogéneamente en la roca. Los minerales de mena se hallan fundamentalmente localizados en los contactos y espacios entre los cristales de silicatos sin una continuidad o conexión definida entre ellos, salvo en los casos en que la conexión se da por relleno de microfracturas (ancho inferior a los 20  $\mu\text{m}$ ). Este tipo de textura ha sido reconoci-

do en las rocas máficas de superficie, donde los sulfuros se presentan en proporciones inferiores al 5%.

Finalmente, las texturas de relleno masivo de venillas (Fig. 4g-h) poseen un ancho que varía del orden de los micrones hasta 1 centímetro como máximo. Las venillas de mayor tamaño en general rellenan fracturas que atraviesan a los silicatos, mientras que las de dimensiones menores disectan no solo a los silicatos sino a los minerales del grupo del espinelo e incluso a los sulfuros mis-

mos como ocurre con la pirita (Fig. 2h). Los contactos de estas venillas con la roca de caja son netos y las formas irregulares. Suelen presentar remanentes de silicatos dentro de la venilla masiva de sulfuros, los cuales fueron englobados por los minerales formadores de la mena en el transcurso de su formación.

Considerando la relación sulfuros-silicatos, es posible establecer que en ocasiones los primeros reemplazan a los minerales silicáticos siguiendo líneas de contacto entre



**Figura 4:** a) Exsolución de Cub en Ccp1, b) MGP (Pd-Ni-Bi-Te) en el borde de un cristal de Ccp1, c) MGP (As-Pt) en el borde de un cristal de Ccp1, d) inclusión de MGP (Pd-Bi-Te) en Po2, e) textura intersticial, e) textura nodular, f-g) mineralización por relleno de venillas.

crisales, líneas de clivaje, y en general aquellos planos que hayan permitido la circulación de soluciones mineralizantes. También es posible observar como los sulfuros reemplazan a los silicatos y gradualmente los van asimilando y englobando hasta quedar sectores de sulfuros masivos con remanentes de silicatos. En aquellos casos en que los sulfuros se presentan en las zonas de recristalización de los silicatos, se observan texturas de reemplazo tipo carie inversa.

### Minerales de mena

Respecto a las relaciones texturales entre los minerales de mena podemos establecer que la Pn es un producto de exsolución de la Po bajo la forma de lamelas y de crisales en cadenas, estos últimos desarrollados en los bordes del cristal hospedante.

La Mck es un mineral que responde a un proceso de desmezcla a partir de la Ccp, adoptando la forma de huso.

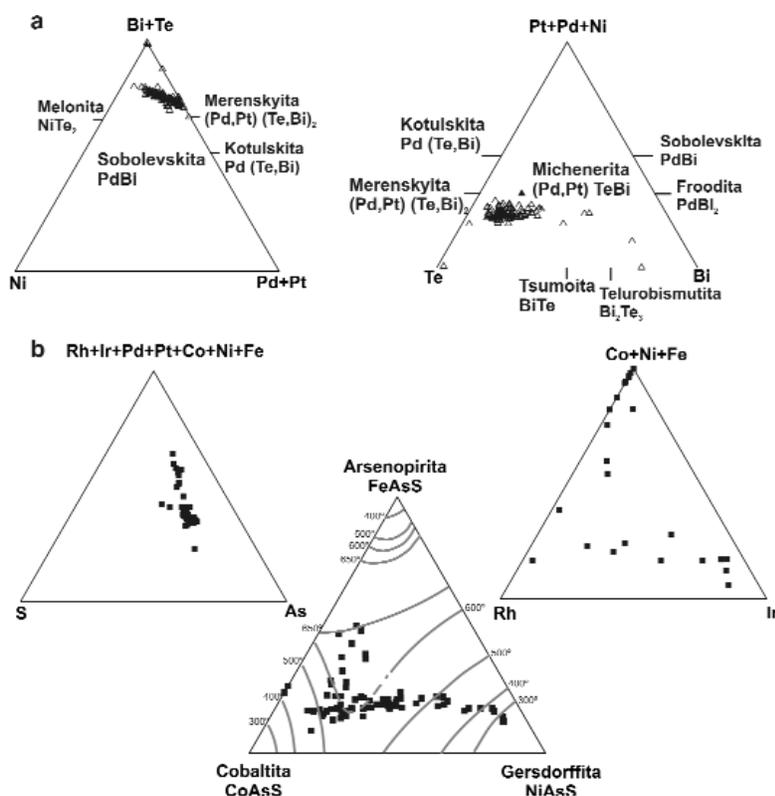
Los reemplazos entre dos sulfuros cuales-

quiera se producen a partir de líneas de contacto entre crisales, con contactos de carie directa y a través de zonas de debilidad tales como fracturas y líneas de clivaje. (Fig. 2f-b). Se han reconocido reemplazos pseudo-mórficos, particularmente en el caso de Cv reemplazando a la Ccp (Fig. 2g).

Los sulfuros en general, aunque principalmente la Po, evidencian los efectos de procesos de deformación tales como la curvatura de las líneas de clivaje (Fig. 2b) y fracturación de crisales. En la mayoría de los casos tales fracturas son rellenadas por minerales del grupo de la serpentina.

Planos de fracturación posteriores a la formación de los sulfuros primarios y secundarios han permitido la formación de venillas de Py (Fig. 2h), la cual no solo rellena estos espacios sino que además reemplaza parcialmente a los sulfuros secundarios con los cuales se halla en contacto.

### PARAGÉNESIS



**Figura 5:** Composición química de los MGP identificados en testigos de las perforaciones 4/2, 5/2, 5/3, 5/4, 5/5, 6/4 y 7/4 del yacimiento Las Águilas. a) fases de Pd-Ni-Te-Bi donde el mayor número de datos graficados corresponden a Merenskyita-Melonita y cantidades menores de michenerita y telurobismutita, y b) fases de Ir-Rh-Co-Ni-Fe-S-As y triángulo experimental Cobaltita-Gersdorffita-Arsenopirita según Klemm (1965).

Los estudios mineralógicos-texturales y las relaciones mutuas entre los minerales de mena permitieron definir dos etapas de mineralización: primaria y secundaria o de removilización, las cuales gráficamente han sido presentadas en las Figuras 6 y 7.

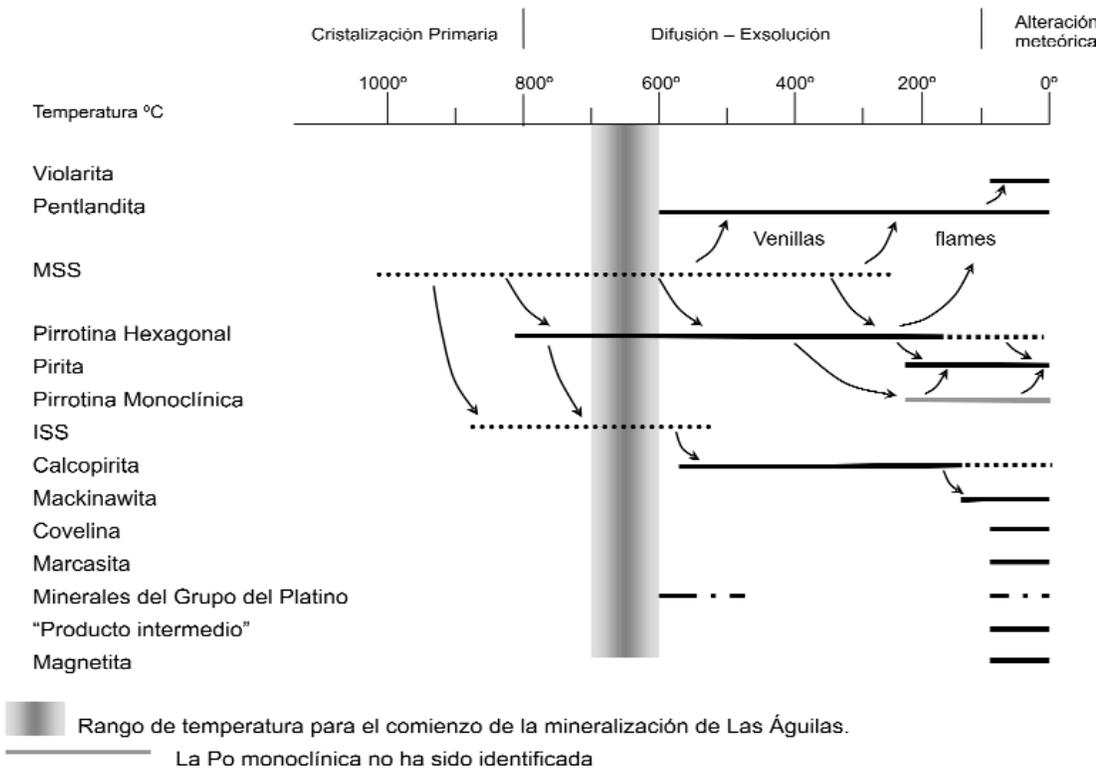
La Po fue el primer mineral en formarse durante el período de mayor temperatura en la etapa de mineralización primaria y es el mineral formador de mena más abundante del depósito Las Águilas (Fig. 6). Trabajos sobre las relaciones de fases en los sistemas Cu-Fe-Ni-S y Fe-O-S a temperaturas entre los 1000 °C y los 300° C han sido llevados a cabo por diversos autores (Kullerud 1963, Craig y Kullerud 1969, Kullerud *et al.* 1969 y Craig y Vaughan 1981) quienes concluyen que en una primera etapa se forma una fase que corresponde a una Po cuprífera y niquelífera comúnmente denominada solución sólida de monosulfuro (mss), la cual no se descompone enteramente hasta que se alcanzan temperaturas de aproximadamente 200° C y aun así continúan las exsoluciones de Pn a partir de Po remanentes, hasta una temperatura de 100 °C (Fig. 6), proceso que se verificaría en Las Águilas.

Durante el enfriamiento del depósito tuvieron lugar las exsoluciones de Ccp y luego de Pn (Fig. 6). La temperatura establecida para la posible aparición de la Ccp en la Figura 7 es estimada en base a Craig y Vaughan (1981) quienes determinan que al disminuir la temperatura, la capacidad del mss para retener Cu es reducida a < 1% a 500° C; por ende, la mayor parte de la Ccp se forma por encima de esta temperatura, permaneciendo como agregados anhedrales policristalinos intersticiales como los observados en las muestras estudiadas.

Cuando la temperatura disminuye la Pn comienza a exsolverse. Si esto ocurre a temperaturas suficientemente altas, se obtiene la segregación de la Pn en venillas policristalinas situadas entre los granos de Po (tal como se ha encontrado en las muestras de las perforaciones de Las Águilas). La difusión del Ni desde el mss para formar lamelas de Pn exsuelta y orientada cristalográficamente en forma de llamas a lo largo de fracturas u otras imperfecciones del cristal hospedante, continúa con la disminución de la temperatura, hasta los 100-200° C (Craig y Vaughan 1981).

Minerales	Mineralización primaria	Mineralización por removilización (deformación +relleno de fracturas)	Alteración
Pirrotina	██████████	██████████	
Calcopirita	██████████	██████████	
Pentlandita	██████████	██████████	
Pirita		██████████	██████████
Mackinawita		██████████	
Cubanita	██████████		
Covelina			██████████
Violarita			██████████
Marcasita			██████████
Minerales del Grupo del Platino	██████████	██████████	
"Producto intermedio"			██████████
Magnetita		██████████	██████████

**Figura 6:** Cuadro paragenético de Las Águilas. Los minerales de alteración pueden afectar a los minerales de los estadios de mineralización magmática primaria y/o de removilización, por ejemplo: la violarita afecta a la Pn de ambos períodos, al igual que la magnetita lo hace con la Po.



**Figura 7:** Diagrama según Craig y Vaughan (1981) para el complejo ígneo de Busveld, modificado para Las Águilas.

Durante la etapa de removilización, la mineralogía de mena fue redistribuida y no se evidencian modificaciones significativas en la química mineral ni en la mineralogía de mena para una u otra etapa de mineralización, únicamente variación en las proporciones de los distintos sulfuros. Las muestras correspondientes a perforaciones de Las Águilas evidencian que los

MGP están principalmente asociados a los sulfuros (Po-Ccp) y en mucha menor proporción a espinelos y minerales del grupo de la serpentina. Teniendo como base el análisis geotérmico efectuado por Ferracuti *et al.* (2006) con el par mineralógico Spl-Ol, es posible estimar que la temperatura a la cual tuvo lugar la formación de la mineralización primaria se encontraba en el

rango comprendido entre los 700° y los 600° C. Asimismo, según el triángulo composicional cobaltita-gersdorffita-arsenopirita la temperatura de formación de tales MGP tiene lugar entre los 450° y 650° C. La Py es un mineral asociado a las etapas de removilización con texturas en venillas y a la etapa de alteración donde se asocia a la Mr y a la magnetita, formando una mezcla

de finos agregados con textura ojo de pájaro.

Finalmente la Cv y la VI son minerales que aparecen en la etapa de alteración de los sulfuros de mena, con texturas de reemplazo pseudomórfico.

## GÉNESIS DE LA MINERALIZACIÓN DE LAS ÁGUILAS

Como se mencionara en el apartado de paragénesis y en base a la mineralogía y texturas se han identificado dos etapas en la formación de la mineralización y concentración de los sulfuros presentes en las rocas máficas-ultramáficas de Las Águilas. La primera de ellas corresponde a la mineralización primaria conformada por Po1, Ccp1, Pn y algunos MGP. Estos constituyentes responden mayormente de manera frágil a los fenómenos de deformación con formación de fracturas y en mucha menor proporción a la deformación dúctil manifestada por la curvatura de las líneas de clivaje de la Po1. Esta es una mineralización relacionada a un líquido sulfurado que precipitó durante la cristalización del magma generando texturas tipo intersticial y nodular. La mineralización primaria esta asociada directamente con las rocas ultramáficas y fundamentalmente a los niveles con espinelos. Asimismo, se destaca el predominio de Pn respecto de Ccp1. La Po1, tal como se describió, posee mayor tamaño de cristal que la Po2. Finalmente, un único cristal de Cub fue identificado como exsolución en Ccp1. La segunda etapa de mineralización esta asociada a la removilización de los sulfuros, se halla representada por Po2, Ccp2, Pn y de MGP con la aparición de Py y muy escasa Mck. Es una etapa con características texturales distintivas tales como formación de venillas o texturas diseminadas por la ubicación de los sulfuros en zonas de recristalización de los silicatos. Esta etapa se halla relacionada a los fenómenos de deformación sufridos por las rocas máficas-ultramáficas manifestándose neto predominio de la deformación dúctil sobre la frágil. La Ccp2 es de mayor tamaño que la Ccp1 correspondiente a la etapa de mineralización primaria. Cuando la serpentinización es avanzada, ésta rellena venillas <140  $\mu\text{m}$  que atraviesan

a los sulfuros.

## CONSIDERACIONES

### Mineralización de sulfuros

En base a las texturas y temperaturas estimadas para la formación del yacimiento, se asume que la mayoría de los cristales de Po observados corresponden a Po hexagonal. Si bien Naldrett *et al.* (1967) determinaron ópticamente que las exsoluciones de pentlandita en Po son acompañadas por una inversión de Po hexagonal a monoclinica, en el caso de Las Águilas ello no pudo ser determinado. Cabe destacar que Gervilla *et al.* (1993) y Malvicini y Brogioni (1993), también indicaron que la Po del yacimiento es hexagonal.

Según Ramdohr (1980), la Po puede disolver una cierta cantidad de Cu y Ni a muy altas temperaturas, posteriormente exsuelto bajo la forma de Cub, Ccp y Pn. Para el caso de Las Águilas, la predominancia del contenido de Ni por sobre el de Cu, queda reflejado por el predominio de la Pn en relación a la abundancia relativa de Ccp. Esto también esta apoyado por la escasa presencia de Cub y Mck, lo cual también refleja concentraciones iniciales bajas de Cu en el mss.

El fuerte grado de fracturación de la Pn es probable que en parte sea originado por la reducción de volumen que tiene lugar con la disminución de la temperatura, en comparación con la Po que la contiene (fenómeno descrito por Craig y Vaughan 1981). El límite inferior de estabilidad térmica de Mck se encuentra por debajo de los 150° C (Benning *et al.* 1999). Por ello se considera que su asociación con la Ccp2 (removilizada) se deba a la menor temperatura de formación de esta última o a un leve enriquecimiento de dicho sulfuro en Ni, posteriormente exsuelto como Mck.

### Minerales del grupo del platino

En las Águilas estos minerales son de reducido tamaño y han sido mayormente identificados en los bordes de sulfuros primarios. Chai y Naldrett (1992) establecen para el depósito de Jinchuan (China) las mismas características e infieren que los fluidos hidrotermales que contienen As, Sb, y Te

(los cuales tienen una gran afinidad con los elementos del grupo del Platino- EGP), pueden haber reaccionado con aleaciones de EPG y sulfuros para formar arseniuros, telururos y stibnitas durante la actividad hidrotermal. Al respecto, Vermaak y Hendriks (1976) destacan la preferencia de los minerales del grupo del platino por las interfaces sulfuros-silicatos y establecen la siguiente secuencia de eventos: **a)** cristalización magmática y presencia de sulfuros y minerales del grupo del platino en el Merensky Reef, **b)** alteración de silicatos por soluciones magmáticas tardías, **c)** redistribución parcial de los sulfuros y, **d)** movilización y redepositación de los minerales del grupo del platino. Tales características han sido reconocidas en Las Águilas ya que estos minerales también fueron hallados asociados a los minerales del grupo de la serpentina y en los bordes de alteración de los espinelos, hechos indicativos de la redistribución de los minerales del grupo del platino durante etapas de alteración, en la cual la serpentinización juega un rol activo en la extracción de EGP de los silicatos, óxidos y sulfuros y en su localización como minerales del grupo del platino independientes y económicamente significativos (Stumpfl y Tarkian 1976).

## CONCLUSIONES

En el yacimiento Las Águilas, la mineralización de sulfuros y minerales del grupo del platino principalmente se presenta en rocas ultramáficas provenientes de las perforaciones en estrecha asociación con los niveles portadores de minerales del grupo del espinelo. Hasta la actualidad no se han observado estos minerales en rocas de superficie. En la mineralización magmática primaria se da la paragénesis mineral Po1+Ccp1+Pn  $\pm$  MGP  $\pm$  Cub donde la Po es el sulfuro mas abundante seguido de la Pn. Estos sulfuros se presentan con texturas tipo intersticial y nodular y responden mayormente de manera frágil a los fenómenos de deformación con formación de fracturas. Por otra parte, entre los sulfuros que integran el conjunto de minerales metalíferos asociados a la etapa de removilización se encuentran Po2+Ccp2+Pn  $\pm$  MGP  $\pm$  Py  $\pm$  Mck. Es una etapa con características texturales distintivas ta-

les como formación de venillas masivas o texturas diseminadas y se presenta un mayor predominio de la deformación dúctil de los sulfuros sobre la frágil.

En relación a la génesis del yacimiento, queda determinado que la misma es generada por una combinación de mineralización magmática primaria con importante removilización. No existen importantes diferencias químicas entre los minerales de metales base identificados en ambos tipos de mineralización, siendo las principales diferencias de tipo textural y el predominio de minerales del grupo del platino asociados a los metales base removilizados.

Los minerales del grupo del platino son mayormente productos de removilización dada su aparición en los bordes de granos de los sulfuros (primarios y secundarios), minerales del grupo de la serpentina y bordes de alteración de los espinelos.

Finalmente, se determinó que a una temperatura de entre 600 y 700° C se inició el proceso de mineralización a partir de la solución sólida de monosulfuro, con formación de cada fase mineral según lo indicado en el cuadro paragenético.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado a través de los proyectos 24/H042 y 24/H066 otorgados por la SGCyT-UNS a E. Bjerg. G. Ferracutti agradece al CONICET por una beca de posgrado de 4 años y a la SGCyT-UNS por el otorgamiento de una Beca Externa cumplida en el *Institute of Earth Sciences, Department of Mineralogy and Petrology, University of Graz*, Austria. Los autores agradecen las oportunas modificaciones y sugerencias de un corrector anónimo y de la Dra. Milka K. de Brodtkorb.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

Benning, L. G., Cahill, C. L., Clark, S. M., Barnes, H. L. y Parise, J. B. 1999. Mackinawite stability at high temperatures. Lunar and Planetary Institute Contribution 971, 9<sup>o</sup> Annual V. M. Goldschmidt Conference 24-25, Houston.

Bjerg, E. A., Kostadinoff, J., Mogessie, A., Hoinkes, G., Stumpfl, E. F. y Hauzenberger, Ch. A. . Faja de rocas ultramáficas de las Sierras de San Luis: nuevos hallazgos de minera-

les del Grupo del Platino. Universidad Nacional de La Plata, Instituto de Recursos Naturales, 3<sup>o</sup> Jornadas de Mineralogía, Petrografía y Metalogénesis de rocas máficas y ultramáficas, Actas 5: 303-310.

Bjerg, E. A., Delpino, S., Dimieri, L., Kostadinoff, J., Mogessie, A., Hoinkes, G., Hauzenberger, Ch. A. y Felfernig, A. 1997. Estructura y mineralización del área Las Águilas-Virorco, San Luis, Argentina. 8<sup>o</sup> Congreso Geológico Chileno, Actas 2: 857-861, Antofagasta.

Brodtkorb, M. K. de., Ostera, H., Pezzutti, N. y Tassinari, C. 2005. Sm/Nd and K-Ar data from W-bearing amphibolites of Eastern Pampean Ranges, San Luis and Cordoba, Argentina. 5<sup>o</sup> South American Symposium on Isotope Geology 478-482.

Caminos, R. 1979. Sierras Pampeanas de Tucumán, Catamarca, La Rioja y San Juan. En Turner, J. C. M. (ed.) Academia Nacional de Ciencias, Segundo Simposio Geología Regional Argentina 41-80, Córdoba.

Chai, G. y Naldrett, A. J. 1992. Characteristics of Ni-Cu-PGE Mineralization and Genesis of the Jinchuan Deposit, Northwest China. *Economic Geology* 87: 1475-1495.

Craig, J. R. y Kullerud, G. 1969. Phase relations in the Cu-Fe-Ni-S System and their application to magmatic ore deposits. *Magmatic Ore Deposits: A symposium. Economic Geology, Monograph* 4: 344-358.

Craig, J. R. y Vaughan, D. J. 1981. Ore microscopy and ore petrography. John Wiley and Sons 406 p.

Delpino, S., Bjerg, E., Ferracutti, G., Dimieri, L., Mogessie, A. y Kostadinoff, J. 2002. Upper-amphibolite facies mylonitization on mafic-ultramafic rocks and gneissic-migmatitic country rocks, Sierras of San Luis, Argentina: implications in the remobilization of ore sulfides. Universidad de Buenos Aires, 6<sup>o</sup> Congreso de Mineralogía y Metalogénesis 123-126, Buenos Aires.

Delpino, S. H., Bjerg, E. A., Ferracutti, G. R. y Mogessie, A. 2007. Counterclockwise tectonometamorphic evolution of the Pringles Metamorphic Complex, Sierras Pampeanas of San Luis (Argentina). *Journal of South America Earth Science* 23: 147-175.

Felfernig, A. 1999. Petrologie und Mineralisation des mafisch-ultramafischen Las Águilas Komplexes und des angrenzenden Basements, San Luis Provinz, Zentralargentinien.

Tesis de Magister, Naturwissenschaftlichen Fakultät der Karl-Franzes Universität Graz, (inérita) 211 p., Graz.

Felfernig, A., Mogessie, A., Hauzenberger, Ch. A., Hoinkes, G., Bjerg, E. A., Kostadinoff, J., Delpino, S. y Dimieri L. 1997. Petrology and mineralization of the Las Águilas ultramafic body, San Luis province, Argentina. *Terra Nova* 9: 532-533, Strasbourg.

Felfernig, A., Mogessie, A., Hauzenberger, Ch. A., Hoinkes, G., Bjerg, E. A., Kostadinoff, J., Delpino, S. y Dimieri, L. 1999. The role of fluids in platinum mineralization of the mafic-ultramafic Las Águilas complex, San Luis, Argentina. 14<sup>o</sup> Congreso Geológico Argentino, Actas 2:287-293, Salta.

Ferracutti G. 2005. Geología y mineralizaciones asociadas a la faja de rocas máficas-ultramáficas de la Sierras Pampeanas de San Luis. Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Sur, (inérita) 260 p., Bahía Blanca.

Ferracutti, G. y Bjerg, E. A. 2002. Platinoideos en el yacimiento Las Águilas, San Luis, Argentina. Universidad de Buenos Aires, 6<sup>o</sup> Congreso de Mineralogía y Metalogénesis, 135-138, Buenos Aires.

Ferracutti, G.; Mogessie, A. y Bjerg, E. A. 2006. Chrome spinels from the Las Águilas mafic-ultramafic intrusion, San Luis province, Argentina. *Neues Jahrbuch für Mineralogie* 183(1): 63-77.

Gervilla, F., Sabalúa, J., Carrillo, R., Fenoll Hach-Alí, P. y Acevedo, R. D. 1993. Mineralogy and mineral chemistry of the Las Águilas Ni-Cu deposit (province of San Luis, Argentina). En Fenoll Hach-Alí, P.; Torres-Ruiz, J. y Gervilla, F. (eds.) *Current research in geology applied to ore deposits*, Universidad de Granada, 461-464, Granada.

Gervilla, F., Fenoll Hach-Alí, P., Acevedo, R. D., Carrillo, R. y Sabalúa, J. 1994. Minerales de Pd, Pt y Au del Yacimiento de Ni-Cu de Las Águilas (Provincia de San Luis). 2<sup>o</sup> Jornadas de Mineralogía, Petrografía y Metalogénesis de Rocas Ultrabásicas. Universidad Nacional de La Plata, Instituto de Recursos Minerales, Publicación 3: 517-521, La Plata.

Gervilla, F., Sanchez-Anguita, A., Acevedo, R. D., Fenoll Hach-Alí, P. y Paniagua, A. 1997. Platinum-group element sulpharsenides and Pd bismuthotellurides in the metamorphosed Ni-Cu deposit at Las Águilas (province of San Luis, Argentina). *Mineralogical Magazine* 61: 861-877.

- Hauzenberger, Ch. 1997. The Sierras de San Luis, Central-Argentina- metamorphic, meta-  
logenic, and geochemical investigations. Tesis Doctoral, Naturwissenschaften Fakultät der Karl-Franzes Universität Graz, (inédita) 200 p., Graz.
- Hauzenberger, Ch., Mogessie, A., Hoinkes, G., Bjerg, E. A., Kostadinoff, J., Delpino, S. y Dimieri, L. 1997. Platinum group minerals in the basic to ultrabasic complex of the Sierras de San Luis, Argentine. En Papunen, H. (ed.) *Mineral Deposits: Research and Exploration-Where Do They Meet?* A.A. Balkema Publishers: 439-442, Brookfield.
- Hauzenberger, Ch., Mogessie, A., Hoinkes, G., Felfernig, A., Bjerg, E. A., Kostadinoff, J., Delpino, S. y Dimieri, L. 2001. Metamorphic evolution of the Sierras de San Luis, Argentina: granulite facies metamorphism related to mafic intrusions. *Mineralogy and Petrology* 71: 95-126.
- Klemm D. D. 1965. Synthesen und Analysen in den Dreiecksdiagrammen FeAsS-CoAsS-NiAsS und FeS<sub>2</sub>-CoS<sub>2</sub>-NiS<sub>2</sub>. *Neues für Mineralogie, Abhandlungen*, 103: 205-255.
- Kretz, R. 1983. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 68: 277-279.
- Kostadinoff, J., Bjerg, E. A., Delpino, S., Dimieri, L., Mogessie, A., Hoinkes, G., Hauzenberger, Ch. y Felfernig, A. 1998. Gravimetric and magnetometric anomalies in the Sierras Pampeanas of San Luis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 53(4): 549-552.
- Kullerud, G. 1963. The Fe-Ni-S system. *Carnege Institution of Washington, Year Book* 62: 175-189.
- Kullerud, G., Yund, R. A. y Moh, G. H. 1969. Phase relations in the Cu-Fe-S, Cu-Ni-S, and Fe-Ni-S systems. *Magmatic Ore Deposits: A symposium, Economic Geology, Monograph* 4: 323-343.
- Malvicini, L. y Brogioni, N. 1992. El depósito hidrotermal de Ni, Cu y metales del "Grupo del Platino", Las Águilas Este, Provincia de San Luis. 4º Congreso Nacional y 1º Congreso Latinoamericano de Geología Económica, Actas: 93-102, Córdoba.
- Malvicini, L. y Brogioni, N. 1993. Petrología y génesis del yacimiento de sulfuros de Ni, Cu y platinoideos Las Águilas Este, Provincia de San Luis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 48(1): 3-20.
- Malvicini, L. y Brogioni, N. 1996. Las Águilas Este Deposit: shear zone hosted hydrothermal Cu-Ni sulfide and platinum-group elements mineralization in the mafic-ultramafic complex of San Luis Range, Argentina. *Geology and Ore Deposits of the American Cordillera, Symposium Proceedings* 1475-1485.
- Miró, R. C. 1999. El basamento precámbrico-paleozoico inferior de las Sierras Pampeanas, Famatina, Cordillera Oriental y Puna: Introducción. En Caminos, R. (ed.) *Geología Argentina*, Segemar, Instituto de Recursos Naturales, *Anales* 29(6): 133-135.
- Mogessie, A., Hoinkes, G., Stumpf, E. F., Bjerg, E. A. y Kostadinoff, J. 1995. Occurrence of platinum group minerals in the las Águilas ultramafic unit within a granulite facies basement, San Luis province, central Argentina. En Pasava, J., Křibek, B. y Zak, K. (eds.) *Mineral Deposits: from Their Origin to Their Environmental Impact* A.A. Balkema Publishers: 897-900, Brookfield.
- Mogessie, A., Hauzenberger, Ch., Hoinkes, G., Felfernig, A., Stumpf, E. F., Bjerg, E. A. y Kostadinoff, J. 1996. Platinum-Group minerals from the Las Águilas ultramafic units, San Luis Province, Argentina. *Mitteilungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft*, 141: 157-159.
- Mogessie, A., Hauzenberger, Ch., Hoinkes, G., Felfernig, A., Stumpf, E. F., Bjerg, E. A. y Kostadinoff, J. 2000. Genesis of platinum-group minerals in the Las Águilas mafic-ultramafic rocks, San Luis Province, Argentina: textural, chemical and mineralogical evidence. *Mineralogy and Petrology* 68: 85-114.
- Naldrett, A. J. 1973. Nickel Sulfide deposit-Their classification and genesis with special emphasis on deposits of volcanic association. *Transactions of the Canadian Institute of Mining and Metallurgy* 76: 183-201.
- Naldrett, A. J., Craig, J. R. y Kullerud, G. 1967. The central portion of the Fe-Ni-S system and its bearing on pentlandite exsolution in iron-nickel sulfide ores. *Economic Geology* 62: 826-847.
- Ramdohr, P. 1980. *The ore minerals and their intergrowths*. Pergamon Press 2: 441-1205.
- Sabalúa, J., Chabert, M. y Santamaria, G. 1981. Mineralización de sulfuros de hierro, cobre y níquel, en el cuerpo básico de Las Águilas, Provincia de San Luis. 8º Congreso Geológico Argentino, Actas 4: 497-507, San Luis.
- Sabalúa, J. 1986. Yacimiento Las Águilas. Mineralización Ni-Cu-Co, Departamento Pringles, Provincia de San Luis, República Argentina. Informe final, DGF, Subdirección de Desarrollo Minero, Centro de Exploración Geológico Minero-Mendoza, (inédito) 32 p., Mendoza.
- Sato, A. M., González, P. D. y Sato, K. 2002. First indication of Mesoproterozoic age from Western Basement of Sierra de San Luis, Argentina. 3º Simposio Sudamericano de Geología Isotópica, editado en CD-ROM, Pucón.
- Sims, J. P., Ireland, T. R., Camacho A., Lyons, P., Pieters, P. E., Skirrow, R. G., Stuart-Smith, P. G. y Miró R. 1998. U-Pb, Th-Pb and Ar-Ar geochronology from the southern Sierras Pampeanas, Argentina. En: Implications for the Paleozoic tectonic evolution of the western Gondwana margin, implications for the Proto-Andean margin of Gondwana. Pankhurst, R. y Rapela C. (eds.) *Geological Society, Special Publication* 142: 259-281, London.
- Skirrow, R. G. y Sims, J. P. 1996. Mineral deposit styles and settings in the southern Sierras Pampeanas, Argentina. 13º Congreso Geológico Argentino y 3º Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 3: 137.
- Söllner, F., Brodtkorb, M. K. de, Miller, H., Pezutti, N. y Fernández, R. R. 2000. U-Pb age determinations on zircons of metavolcanic rocks from Sierra de San Luis (Argentina). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 55(1-2): 15-22.
- Stumpf, E. F. y Tarkian, M. 1976. Platinum genesis: new mineralogical evidence. *Economic Geology* 71: 1451-1460.
- Vermaak, C. F. y Hendriks, L. P. 1976. A review of the mineralogy of Merensky Reef, with specific reference to new data on the precious-metal mineralogy. *Economic Geology* 71: 1244-1269.

Recibido: 8 de noviembre, 2006

Aceptado: 2 de junio, 2007