

RELACIONES TEXTURALES ENTRE LOS MINERALES DE LA MENA Y LA ROCA DE CAJA EN EL YACIMIENTO DE HIERRO DE BANDURRIAS, III REGION, CHILE.

M. EUGENIA CISTERNAS S. Univ. de Concepción, Depto. de Geociencias, Casilla 2407, Concepción, Chile.

RESUMEN

El yacimiento de hierro de Bandurrias (27° 51' Lat. S y 70° 35' Long. W), ubicado en la Región de Atacama, es un yacimiento estratiforme asociado a las rocas neocomianas (Grupo Chañarillo y Formación Bandurrias) en el norte de Chile.

En el presente trabajo se describen las relaciones texturales entre la mineralización (principalmente magnetita) y la roca de caja (calizas metamorfizadas). Se concluye que debe descartarse un supuesto origen singenético para el hierro (Espinoza, 1979), siendo probable, en cambio, un proceso de metasomatismo de horizontes favorables.

La mineralización es posterior al metamorfismo de contacto -expresado en la presencia de granate- de las rocas calcáreas. La granatización está restringida a ciertos niveles, ubicados en el límite entre las rocas calcáreas, de la porción inferior, y las rocas clásticas, de la parte superior. Es en esta zona granatizada donde se concentran los niveles mineralizados.

ABSTRACT

The Bandurrias deposit in Northern Chile (27° 51' Lat. S y 70° 35' Long. W) is a stratiform iron deposit emplaced in lower cretacic rocks (Chañarillo Group and Bandurrias Formation).

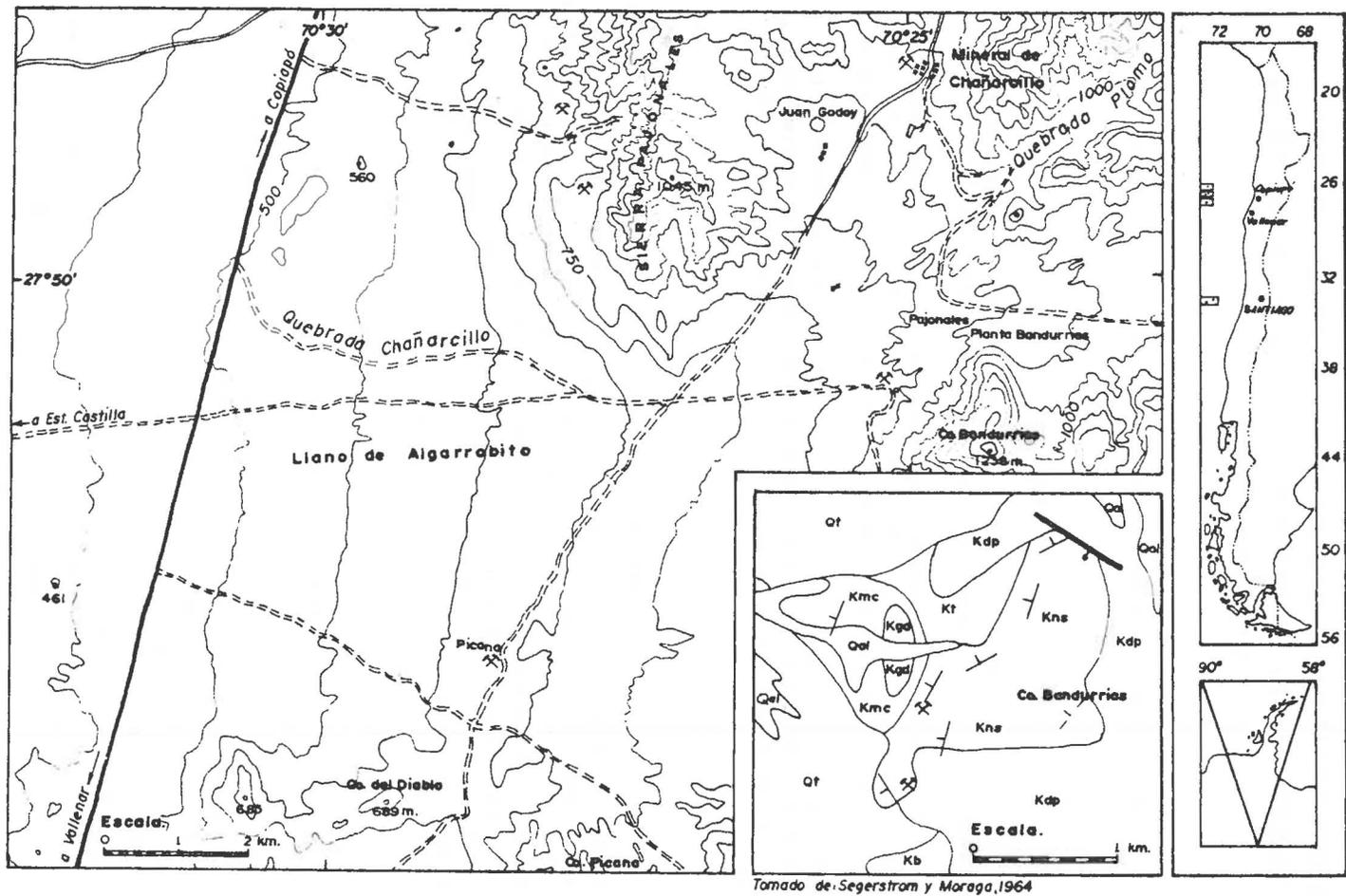
The textural relationships between the ore minerals (mostly magnetite) and the host rocks (metamorphosed limestones) are described. A metasomatic origin of the iron mineralization in favorable rocks is proposed, and a syngenetic sedimentary origin (Espinoza, 1979) is discarded.

The contact metamorphism -as expressed by the presence of garnet- is prior to the iron mineralization. The garnetization only occurs in some layers at the boundary between the lower limestones and the upper clastic rocks, and the mineralized levels are located at this contact metamorphic zone.

INTRODUCCION

La presencia de mineralización estratiforme o en "mantos" puede obedecer a dos razones. La primera es la contemporaneidad entre esa mineralización y la roca que la contiene (depositación singenética). La segunda es el reemplazo o relleno de espacios producido, preferentemente, en determinados niveles o estratos de una columna de rocas estratificadas (depositación epigenética). La pugna epigenetismo-singenetismo ha sido el tema principal de las discusiones metalogénicas y, en Chile, ha tenido especial interés debido a la abundancia de

mineralizaciones de cobre y manganeso que presentan aspecto estratiforme. Aunque los depósitos ferríferos de este tipo son más raros, su presencia en estratos del Cretácico Inferior ha dado lugar a la hipótesis de una primera época metalogénica de esa edad, cuyas mineralizaciones habrían sido removilizadas por el plutonismo cenomaniano, dando lugar a los yacimientos de forma irregular y asociados a granitoides, del tipo El Algarrobo (Espinoza, 1979).



Kns: Formación Nantoco, miembro superior; Ktr: Formación Totoralillo; Kmc: Rocas metamórficas de contacto, derivadas del Grupo Chañarillo; Kdp: Pórfido diorítico y tonalítico; Kgd: Granodiorita; Qt: Sedimentos de terrazas altas; Qal: Depósitos aluviales.

↘ : Rumbo y manteo

⊗ : Mina

— : Falla normal, indicando bloque hundido

FIG. 1. Mapa de ubicación y geología general.

Puesto que el yacimiento Bandurrias aparece como el caso más ilustrativo de mineralización ferrífera estratiforme, se ha considerado de interés efectuar el estudio mineralógico y petrográfico de sus afloramientos mineralizados y estériles. Las características del yacimiento Bandurrias son típicas de los depósitos de varios metales emplazados en rocas del Cretácico Inferior: mineralizaciones en facies transicionales volcánico-marinas (carbonatadas); cuerpos mineralizados predominantemente estratiformes; presencia de intrusivos en las

cercanías; y, en muchos casos (Bandurrias entre ellos), ubicación dentro de la aureola de metamorfismo de contacto de un intrusivo.

Aunque se procurará entregar la información de base general sobre el yacimiento y su entorno, el propósito de este trabajo es describir las relaciones paragenéticas entre la mineralización de hierro, los minerales originales de la roca y aquellos formados por metamorfismo de contacto o alteración. Naturalmente, estas relaciones son esenciales para la discusión de su génesis.

INFORMACION GENERAL

El yacimiento de hierro de Bandurrias (coordenadas aproximadas 27°51' Lat. S y 70°35' Long. W) se ubica en la Región de Atacama, 55 km al sur de la ciudad de Copiapó y 100 km al norte de la ciudad de Vallenar, y está unido a la Carretera Panamericana por 10 km de camino en buen estado. Este camino, que atraviesa el llano de Algarrobito en dirección a Sierra Bandurrias, se bifurca hacia el norte y conduce al yacimiento de plata de Chañarillo (Fig. 1).

Morfo-estructuralmente, se ubica en la porción intermedia entre la Cordillera de la Costa y la Cordillera Principal que, en esta latitud, está constituida por la depresión conocida como Llanos de la Travesía, verdadero equivalente del valle Longitudinal.

El yacimiento forma parte del cerro Bandurrias (1.238 m) que es una prominencia elongada en dirección NNE, de 2,5 km de largo, que se eleva 300 m sobre el llano de Algarrobito. El cerro aparece completamente aislado, excepto en su terminación sur donde se desgrana en un grupo de pequeñas colinas. El perfil del cerro Bandurrias es conspicuamente asimétrico, debido a que la ladera occidental está erosionada según el manto de las capas (Fig. 2).

El depósito de hierro, hoy prácticamente agotado, afloraba intermitentemente a lo largo de la porción inferior de la ladera occidental, por una distancia de 1.700 m (St. Clair, 1965).

La exploración inicial del yacimiento parece haber comenzado en 1910. El primer trabajo disponible es de S.H. Loram, 1917 (*in* St. Clair, 1965), quien lo describió como un yacimiento de origen sedimentario, consistente en dos zonas mineralizadas, separadas por caliza estéril; estimó un to-

nelaje total de 22.798 toneladas métricas, mencionando el análisis promedio de dos muestras con el siguiente resultado: Fe: 58,85%, SiO₂: 8,93%, P: 0,095%, S: 0,065%.

En 1943 el depósito fue estudiado en su aspecto geológico y geofísico por L. Kaiser y L. Capurro, respectivamente, quienes lo describieron como un yacimiento de reemplazo metasomático de una zona tobácea en caliza, consistente en un único manto con espesor promedio de 7 m. Las reservas estimadas por estos autores fueron, probable: 7.600.000, y posible: 3.400.000, lo que hace un total de 11.000.000 de toneladas métricas.

En 1963 comenzó la exploración y explotación de la propiedad por parte de la Cía. Minera Santa Bárbara. Un trabajo representativo de este período es el de St. Clair (1965), quien clasificó el yacimiento como de reemplazo metasomático de un horizonte sedimentario favorable. Menciona 600 m de calicatas y 1.005,45 m de sondajes diamantina en 16 perforaciones. El análisis de las muestras obtenidas con esos procedimientos dio el siguiente resultado promedio: Fe: 51,3%, SiO₂: 10,8%, P: 0,062%, S: 0,078%, V₂O₅: despreciable y TiO₂: 0,1%. De acuerdo a las conclusiones de St. Clair, el yacimiento tendría 7.118.000 toneladas métricas de mineral posible y 1.460.720 de mineral inferido, lo que hace un total de 8.578.720 toneladas métricas.

No existen antecedentes disponibles respecto a la explotación posterior. Aparentemente, el yacimiento fue trabajado "al piquén" durante varios años antes de ser adquirido por la Cía. de Acero del Pacífico, la que finalizó los trabajos de explotación, encontrándose el yacimiento, ahora, prácticamente agotado y abandonado.

MARCO GEOLOGICO

En la región, afloran rocas de carácter predominantemente marino, pertenecientes al Grupo Chañarillo (Valanginiano superior, Barremiano-Aptiano) y rocas de carácter volcánoclastico, representantes de la Formación Bandurrias (Hauteriviano superior, post-Neocomiano) (Corvalán, 1974). Ambas unidades presentan un engrane lateral de facies, que constituye el principal rasgo regional de una extensa zona (27° 30'-29° S) (Segerstrom, 1963).

Las rocas intrusivas de la región pueden agruparse, según Segerstrom y Moraga (1964) en: 1) filones-manto de pórfido andesítico; 2) stocks, filones y filones-manto de rocas graníticas (granodioritas y dioritas); 3) stocks y filones-manto de pórfido cuarzo-feldespático. Todos los tipos son posteriores a las rocas estratificadas y fluctúan en edad entre el post-Barremiano y el Cretácico Superior.

En las cercanías del yacimiento Bandurrias, afloran intrusivos equivalentes al grupo 2, según se describirá en el capítulo correspondiente.

Biese (1942) fue el primero en estudiar sistemáticamente las formaciones del Grupo Chañarillo. Más tarde, como resultado de un estudio programado de la región de Copiapó, destacan los trabajos de Segerstrom (1959; 1963); Segerstrom y Parker (1959); Segerstrom y Ruiz (1962); Segerstrom *et al.* (1963); Segerstrom y Moraga (1964). La definición estratigráfica detallada del Grupo Chañarillo fue realizada por Corvalán (1974), en las localidades de Quebrada Cerrillos-Quebrada Meléndez. Complementan los trabajos anteriores los estudios de Conn (1974), Abad (1976; 1977), Gajardo (1978) y Moscoso (1979), quienes estudiaron, en detalle, la región entre los 28 y 29° Lat. S (sur de Copiapó-Domeyko).

Según la definición de Corvalán (1974) el Grupo Chañarillo está constituido por cuatro formaciones que, de más antigua a más joven son:

- Formación Abundancia (200 m) - de edad valanginiana superior.
- Formación Nantoco (874 m) - de edad hauteriviana inferior a superior.
- Formación Totoralillo (226 m) - de edad hauteriviana superior.
- Formación Pabellón (432 m y 7-8 m) - de edad barremiana a posiblemente aptiana.

De acuerdo al esquema paleogeográfico propuesto por Abad (1977), las rocas del Grupo Cha-

ñarillo, cuyas facies y biofacies indican condiciones marinas poco profundas, se habrían depositado en una cuenca sedimentaria marginal (miolimar o miogeosinclinal), limitada al este por una línea de costa de dirección aproximada NNE (aprox. 70° Long. W) y al oeste, por un arco de islas volcánicas de dirección N-S, que aportaba el material volcánoclastico (Formación Bandurrias). Esta cuenca habría estado limitada, al norte, por tierras emergidas (Tierra de Caldera), que la separaban total o parcialmente de cuencas más septentrionales.

Por estar directamente relacionadas con las rocas del yacimiento, se resume, a continuación, la descripción de Corvalán (1974) de las formaciones Nantoco y Totoralillo, en las localidades de Quebrada Meléndez y Quebrada Cerrillos, 13 y 24 km al sur de Copiapó, respectivamente.

La Formación Nantoco se caracteriza por:

- Miembro inferior: 750 m de caliza compacta gris clara a gris oscura, con concreciones ferruginosas. Muestra intercalaciones de lutitas calcáreas que se hacen más frecuentes en la parte superior. Fósiles: *Crioceras andinum* Gerth, *Exogyra* sp., *Turritella* sp., *Terebratula* sp., *Serpula* sp.

- Miembro superior: 124 m de caliza gris oscura, caliza pizarrosa, en parte brechosa, yesífera. Fósiles: *Valvata*, *Hydrobia* sp., *Bithynia*.

La Formación Totoralillo se caracteriza por:

- 226 m de una alternancia, en capas delgadas, de lutita calcárea, gris clara a oscura, y caliza margosa. Fósiles: *Crioceras andinum* Gert, *Crioceras diamantense* Gert, del Hauteriviano superior.

Según Segerstrom *et al.* (1963), en el sector occidental de la región (Cuadrángulo Pintadas), las formaciones Nantoco y Totoralillo tienden a ser de carácter más clástico y contener más pedernal.

De acuerdo a Segerstrom y Moraga (1964), hacia el sur (Cuadrángulo Chañarillo), las calizas de la Formación Nantoco (200-300 m de potencia) son de facies monótona, sólo localmente contienen material clástico y volcánico (Sierra Bandurrias*).

* No confundir esta Sierra Bandurrias (Cuadrángulo Chañarillo), donde está ubicado el yacimiento, con la localidad tipo de la Formación Bandurrias que se ubica al norte de Copiapó.

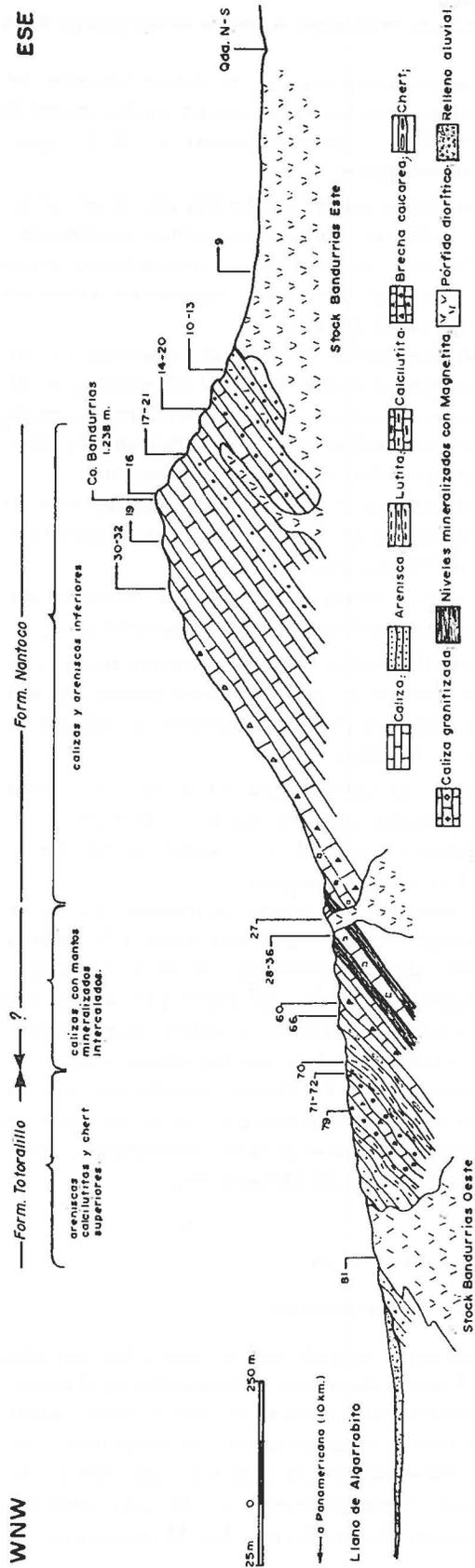


FIG. 2. Esquema estructural simplificado del cerro Bandurrias.

La parte superior (180 m máximo) se caracteriza por la intercalación de brecha con fragmentos calcáreos, en una matriz de calcita y yeso. La Formación Totalillo presenta importantes cambios de facies: engrana localmente con la Formación Bandurrias y, su parte superior, muestra variaciones de norte a sur, desde capas arcillosas rojizas a capas de pedernal y conglomerado y, más al sur, a pedernal, predominantemente.

ROCAS ESTRATIFICADAS DEL YACIMIENTO

Las rocas estratificadas en las que se emplaza el yacimiento, estructuralmente, conforman un homoclianal de rumbo general N15°E-N30°E y manteo de 25°-45° al oeste. Numerosas fallas, tanto normales como inversas, dislocan la secuencia, siendo el sistema principal de rumbo NS-N20°E (Fig. 2).

A escala del yacimiento, las rocas estratificadas pueden agruparse en tres secuencias bien definidas:

- calizas y areniscas inferiores (más de 500 m de espesor);
- calizas con mantos mineralizados intercalados (30-40 m de espesor);
- areniscas, calcilutitas y niveles de chert superiores (mínimo 150 m de espesor).

Los dos primeros grupos coinciden bastante bien con la litología característica de la Formación Nantoco (miembro superior) y el tercero sería equivalente a los niveles inferiores de la Formación Totalillo.

A continuación se describe brevemente la litología.

Calizas y areniscas inferiores:

No tiene base expuesta, aparece cortada por el stock Bandurrias Este, que aflora en el flanco oriental del cerro Bandurrias.

Se distinguen los siguientes tipos litológicos:

- niveles arenosos finos, que corresponden a vacas y arenitas arkósicas (Muestras 10 y 13), con una importante fracción lítica de clastos volcánicos andesíticos (25%).
- calizas color rosáceo oscuro. Son calizas dolomitizadas (Muestras 14 y 20), con cuarzo intergranular, cristales de pirita u otros opacos limonitizados, cuya disposición les da un aspecto "moteado".

- metacalizas de textura* anhedral a subhedral y fábrica* xenotópica equigranular, con mosaico de cristales de calcita, dolomita, cuarzo, feldespato alcalino, clinopiroxeno, epidota (pistacita-zoicita) (Muestra 17) y proclorita (Muestra 21).
- niveles silicificados en la parte superficial (con reemplazo de caliza por chert), con un aspecto rugoso-ganchudo en la superficie expuesta (Muestras 16 y 19). Al microscopio evidencian una porosidad móldica, con poros circulares que podrían ser vestigios de la textura original (caliza oolítica o peletoidal?).

La porosidad del conjunto varía entre pequeñas vesículas (vug) e intercrystalina (BC)**.

Calizas con mantos mineralizados intercalados

Los niveles calcáreos consisten de:

- calizas recristalizadas de textura anhedral y fábrica xenotópica equigranular, con cristales de calcita con mosaico (Muestras 30, 32, 40 y 41). En algunos niveles (Muestra 51), es posible observar reorientación de los cristales. Presentan porosidad tipo vesicular (vug) o selectiva fenestral (Fe) con disolución creciente, secundaria (sxS). En el contacto mismo con el manto mineralizado, presentan magnetita diseminada en guiecillas.
- algunos niveles calcáreos (Muestras 28, 36, 37 y 84) presentan abundantes granates zonados (tipo andradita) que, en algunos casos, están alineados y deformados (Muestra 26).
- algunos niveles (Muestras 55 y 56) se presentan oscurecidos (color pardo) con dolomita (?) zonada y abundante limonita, en un reticulado denso o bien en los planos de clivaje o macla de los carbonatos. Sólo localmente se reconoce la caliza recristalizada original, a veces queda como "clastos", en la matriz de dolomita limonitizada. (Muestra 31).
- niveles o lentes calcáreos muy porosos; megascópicamente presentan disolución tipo kárstica; en sectores son brechosos, con clastos formados por calcita fina en mosaico y matriz de calcita y yeso. La brechización ha sido atribuida a hidratación de la anhidrita original (Segerstrom, 1962).

* Terminología para texturas y fábricas de cristalización según Friedmann, 1965.

** Nomenclatura de porosidad según Choquette y Pray, 1970.

Areniscas, calcilitas y niveles de chert superiores

Fueron estudiadas en el sector noroeste del yacimiento. Se presentan con un rumbo general N 20°E-N25°W y manteo general de 45°W, ligeramente replegados.

- los niveles calcáreos (Muestra 60) tienen textura anhedral y fábrica xenotópica equigranular. Contienen escasos opacos, principalmente pirita y óxidos de manganeso, dispersos en el mosaico de cristales de calcita.
- algunos niveles (Muestra 61) muestran dolomitización en bandas finas. Al microscopio se observan numerosas secciones circulares, ocupadas por calcita (Muestra 65), que podrían ser evidencias de pellets, oolitas, calciesferas, etc.
- intercalados en las calizas se observan delgados niveles (10-15 cm) de chert negro, microscópicamente bandeado (Muestra 66).

Como rodados, se encontraron restos de ammonites que corresponderían a *Crioceras* sp.

Más al suroeste, estratigráficamente arriba de los niveles descritos, con estructura general variable entre N50°E/25°NW-N18°E/32°W y pliegues locales, se disponen:

- wacas líticas (Muestras 71 y 72) con clastos subredondeados principalmente de chert.
- delgados niveles de chert (Muestra 70) que resaltan topográficamente.
- volcarenitas con clastos de feldespatos y de andesitas mineralizadas con hierro (?) (Muestra 79). Algunos niveles más calcáreos muestran elementos ovalados, ocupados por calcita, que podrían corresponder a pellets recristalizados. Contienen restos de conchas (Muestra 80).
- localmente y en directa relación con uno de los numerosos diques que cortan las capas, se encontró un nivel de caliza recristalizada, con abundante granate (Muestra 74).

ROCAS INTRUSIVAS

Características Generales

Las rocas estratificadas del área están intruidas por 2 stocks dioríticos, denominados en el presente trabajo Stock Bandurrias Este y Stock Bandurrias Oeste, respectivamente. Se encuentran, además, numerosos diques y filones-manto que se concentran, preferentemente, en la parte central y central-sur del yacimiento. Los filones-manto y al-

gunos diques son digitaciones de los stocks, pero otros no tienen una relación espacial visible con ellos (Fig. 2).

Stock Bandurrias Este. Aflora en el flanco oriental del cerro Bandurrias, extendiéndose hacia el sur. Produce importantes modificaciones, como recristalización, rocas córneas y granatización.

Es una diorita de textura holocristalina, porfídica o cumuloporfídica, con fenocristales de feldespato potásico y plagioclasa (oligoclasa-andesina), alterados a sericita y/o clorita, además de fenocristales de clinopiroxeno y de hornblenda.

La masa fundamental varía entre:

- microfanerítica (Muestra 1) con cuarzo anhedral, feldespato potásico, actinolita secundaria, pequeños gránulos de piroxeno y anfíbola, cristales de piritita y abundante clorita.
- felsefídica (Muestra 9), gradando a ortofídica, con cuarzo, feldespato potásico, gránulos de opaco y clorita intersertal.
- afieltrada con microlitos de plagioclasa, epidota, opacos y clorita intergranular.

Stock Bandurrias Oeste. Aflora en la parte occidental, adyacente al llano de Algarrobito, en los alrededores del antiguo campamento. El stock y sus ramificaciones discordantes cortan a las capas estratificadas de la Formación Totoralillo. Produce metamorfismo de contacto, expresado en recristalización, alteración y granatización, esta última, restringida a escasos niveles calcáreos.

Sus características petrográficas son similares al Stock Bandurrias Este, pero la textura es microfanerítica y contiene mayor porcentaje de ferromagnesianos (Muestra 81). Las digitaciones, en forma de dique (Muestra 77a), muestran textura porfídica con fenocristales de plagioclasa y anfíbola.

Los diques. La descripción se centra en aquellos diques no relacionados, visiblemente, a los stocks.

Se distinguen dos tipos petrográficos principales:

- de composición diorítica, con textura porfídica marcada por fenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno y hornblenda, en una masa fundamental afanítica (Muestras 27 y 50) de color gris-verdoso oscuro. Se concentran, preferentemente, en lo que fue el yacimiento mismo (sector central sur) y cortan tanto a las rocas calcáreas como a los mantos mineralizados.

- de composición riolítica (Muestra 76) con fenocristales de cuarzo en una matriz afanítica de color blanco. Aparecen en el sector más occidental, cortando a los diques de pórfido diorítico, relacionados al Stock Bandurrias Oeste.

Edad

Estudios anteriores (Segerstrom y Moraga, 1964) reconocieron, en el área cercana al yacimiento, dos tipos litológicos principales (Fig. 1):

- Stocks y filones predominantemente granodioríticos (Kgd), en el sector occidental.
- Stocks, filones y filones-manto de pórfido diorítico (Kdp), en el sector oriental y sur-oriental.

Ambos tipos pertenecerían a un batolito principal, asignado por los autores mencionados al Cretácico Superior.

De acuerdo a los estudios petrográficos del presente trabajo, ambos cuerpos principales -Stock Bandurrias Oeste y Stock Bandurrias Este- así como los filones-manto y diques asociados a ellos, podrían englobarse en un sólo tipo litológico: *pórfido diorítico*, cuya edad máxima, en el área, sería post-Formación Totoralillo.

Abad (1976), en su estudio del área al noreste de Vallenar (28°-28°30' Lat.S), describe cuerpos de características similares, asignándolos a un complejo plutónico de granodioritas y dioritas que intruye a las secuencias del Neocomiano (Grupo Chañarcillo), produciendo recristalización, rocas córneas y skarn. Este complejo pertenecería a un ciclo magmático desarrollado en el Cenomaniano y Turoniano (?), con seguridad, anterior a la Formación Cerrillos que cubre, en discordancia, al Grupo Chañarcillo.

La situación de los diques dioríticos, que cortan tanto a las rocas calcáreas como a los mantos mineralizados, no es clara. Aun cuando no están visiblemente relacionados con los stocks, las características petrográficas son similares (pórfido diorítico). Probablemente, pertenezcan a una fase intrusiva posterior. La determinación de este problema podría ayudar a ubicar, temporalmente, la etapa de mineralización principal.

Los diques de pórfidos riolíticos, muy escasos en el área, serían bastante más tardíos. Segerstrom (1959) asignó, a cuerpos similares, una edad terciaria media a superior (?). Abad (1976) concluyó que serían post-Eoceno.

CARACTERISTICAS TEXTURALES DE LA MINERALIZACION

Para facilitar la descripción, las muestras se han dividido en cuatro grupos, correspondientes a diferentes sectores, a lo largo del rumbo del yacimiento. Las muestras fueron tomadas en la unidad calcárea con mantos intercalados (ver Rocas Estratificadas del Yacimiento), con énfasis en el contacto manto mineralizado-caliza estéril. Las observaciones microscópicas se hicieron en cortes transparentes y pulidos de una misma sección, a fin de complementar las observaciones con luz transmitida y reflejada.

SECTOR SUR

En las muestras calcáreas, prácticamente no quedan vestigios de la roca original. Predomina el material carbonatado oscurecido, con evidencias de dolomitización y limonitización. La limonita, formada a partir de alteración de la magnetita, se ubica en los planos de clivaje y macla de la dolomita (Foto 1).

Los granates (andradita), claramente anteriores a la mineralización (Foto 3 y 5), se presentan elongados y deformados. Las vetillas de yeso, posteriores a la mineralización, aparecen deformadas. Ambos fenómenos pueden estar relacionados al fallamiento que afecta a este sector.

La mineralización, magnetita parcialmente martitizada, se presenta en cristales euhedrales a subhedrales, diseminados o en forma maciza. Las texturas observadas indican una formación posterior a la de la caliza (Foto 2). Se encuentra goetita, de textura coloforme, relleno de cavidades o como producto de alteración de magnetita-hematita.

En las cavidades ocupadas por esparita limpia (calcita II), de algunas muestras (por ejemplo: Muestra 25; Foto 4) aparecen vestigios de opacos, pero éstos no siguen el clivaje de la calcita, sino que insinúan formas pseudocúbicas. Los opacos son, generalmente, limonita pero, en algunos casos, pueden ser magnetita. La impresión visual es que la esparita reemplazaría a los opacos por el núcleo, dejando los bordes, pero esto no es aceptable desde el punto de vista físico-químico. Más probable sería que la limonita y/o la magnetita, de una fase posterior, reemplazarán a la calcita.

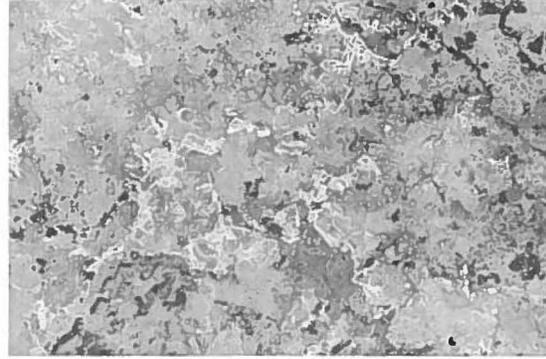


FOTO 1. Muestra 22a. Magnetita y limonita (blanco) siguiendo los planos de clivaje de los carbonatos (gris). Luz reflejada. 80X.

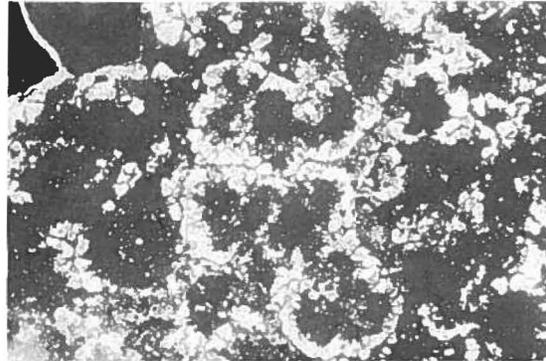


FOTO 2. Muestra 22a. Textura de atolón: núcleo de magnetita (negro) rodeado por calcita (blanco) de aspecto "craquelado". Luz transmitida. 25X.

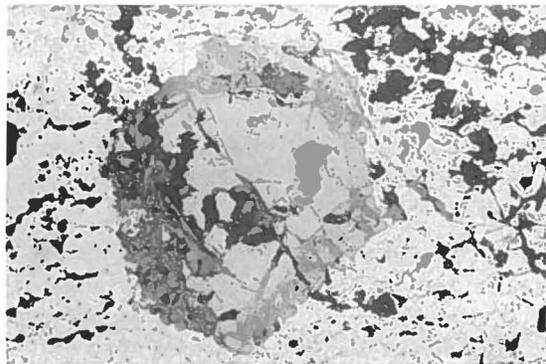


FOTO 3. Muestra 25. Granate zonado (gris medio-oscuro) rodeado por magnetita (gris claro). Luz reflejada. 80X.

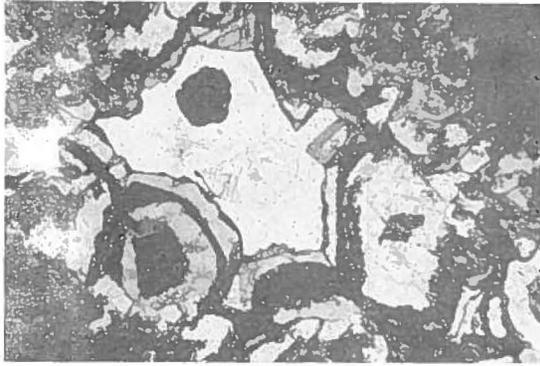


FOTO 4. Muestra 25. Calcita (esparita) posterior a la mineralización, ocupando cavidades. Luz transmitida, 25X.

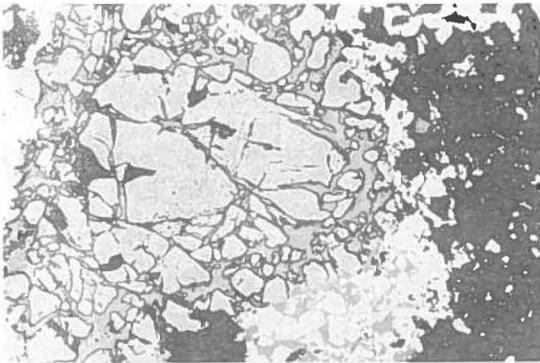


FOTO 5. Muestra 26. Granate residual (gris medio) alterado a calcita (gris oscuro) y rodeado por magnetita (blanco). Luz reflejada, 80X.

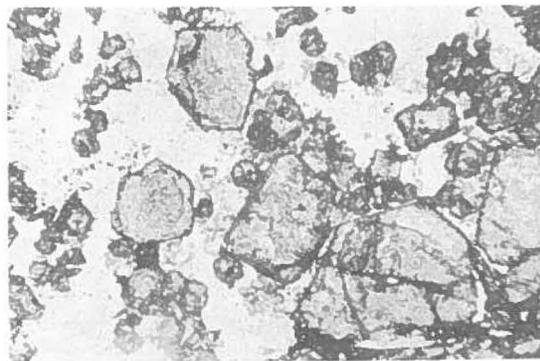


FOTO 6. Muestra 36. Caliza metamorfozada con granates zonados (gris oscuro). Luz transmitida, 25X.

SECTOR CENTRAL

La caliza con cristales de calcita en mosaico, en su mayor parte, ha sido transformada en una granatita, por efecto del metamorfismo de contacto (Foto 6).

Los granates (andradita) son zonados y no presentan deformación; se conservan como relicto también en la parte mineralizada.

La mineralización de magnetita se presenta maciza o en cristales euhedrales a subhedrales, que se ubican entre los cristales de calcita del mosaico (Foto 7).

La magnetita está parcialmente reemplazada por hematita, a través de fracturas o de la partición octaédrica. El reemplazo es preferentemente desde la periferia hacia el centro, sin embargo, un porcentaje importante de cristales presenta núcleo de hematita y borde de magnetita (indicando proximidad al equilibrio magnetita-hematita).

Algunos niveles, en el contacto caliza-mineralización, tienen aspecto megascópico de brecha, con "clastos" de caliza y "cemento" de opacos.

SECTOR CENTRAL-NORTE

En las muestras de este sector, la mineralización de magnetita se presenta en cristales anhedrales a subhedrales, a veces reorientados, dispuestos entre los cristales del mosaico de la caliza. También se encuentra magnetita, en finas guiecillas que nacen en los sectores de mineralización maciza y penetran en la caliza estéril (Foto 8).

Se conservan restos de cristales de pirita, anteriores a la mineralización, pertenecientes a una primera generación de ese mineral.

Los poros y cavidades están ocupados por esparita (calcita II) y cuarzo, en la caliza; y clorita, goetita y limonita, en la parte mineralizada; además, se encuentra goetita como pseudomorfo de magnetita.

En el contacto mineralización-caliza se aprecian finas agujas de hematita, producto, tal vez, de removilización posterior (Foto 9).

SECTOR NORTE

La caliza original aparece como un agregado de cristales de calcita, en mosaico, o como una masa oscurecida, con evidencias de dolomitización y limonitización (Foto 10). En sectores se observan

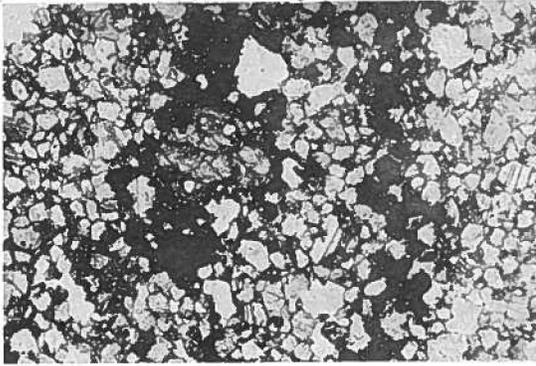


FOTO 7. Muestra 84. Cristales de magnetita (negro) entre cristales de calcita (gris claro). Al centro, cristal de granate (gris oscuro). Luz transmitida. 25X.

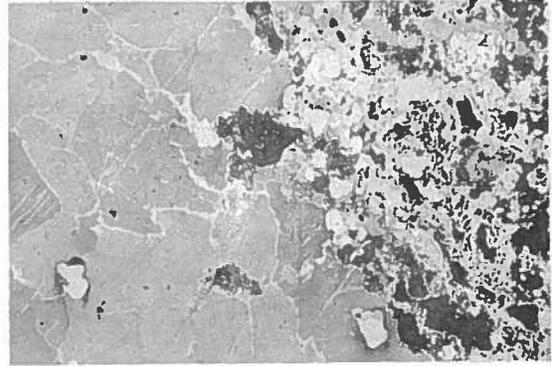


FOTO 8. Muestra 44. Contacto caliza-mineralización. Guías de magnetita-goetita (gris claro-blanco) que penetran en la caliza estéril (gris oscuro). Luz reflejada. 80X.

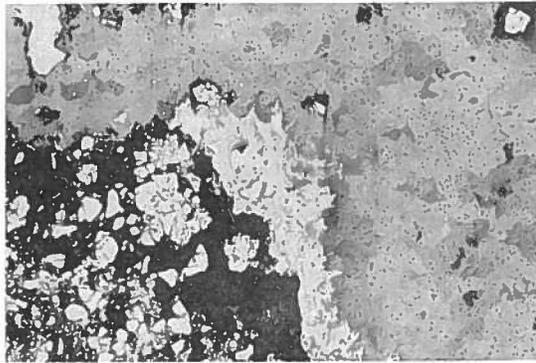


FOTO 9. Muestra 44. Agujas de hematita (blanco) en el contacto mineralización-caliza. Luz reflejada. 80X.

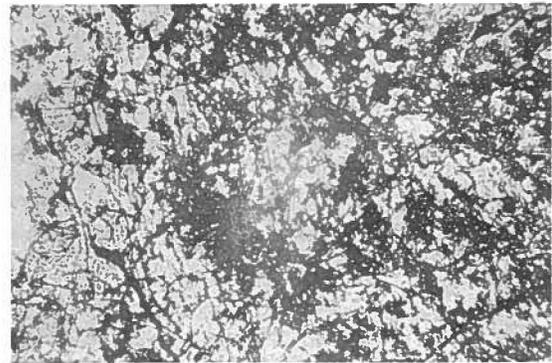


FOTO 10. Muestra 56. Limonitización en vetillas (negro) a través de una masa de carbonatos (gris claro). Luz transmitida. 25X.



FOTO 11. Muestra 56. Magnetita (negro) a través de los planos de clivaje de los carbonatos (gris claro). Luz transmitida. 100X.

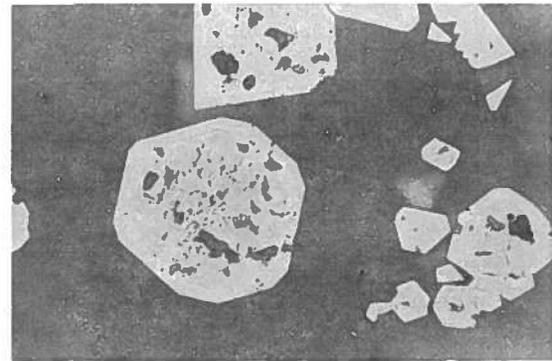


FOTO 12. Muestra 52. Cristales euhedrales de magnetita zonada (gris) con hematita (blanco) en las zonas de crecimiento. Luz reflejada. 400X.

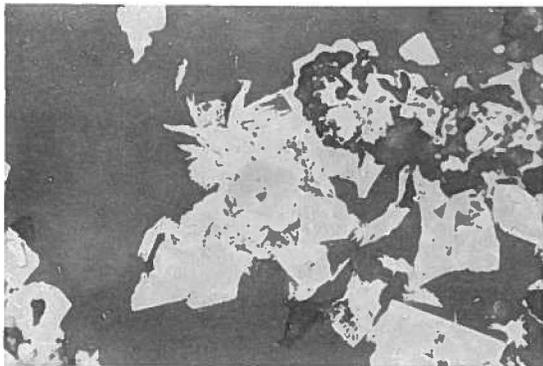


FOTO 13. Muestra 52. Cristales de magnetita martitizada (gris claro) rodeados por hematita acicular (blanco). Luz reflejada. 400X.

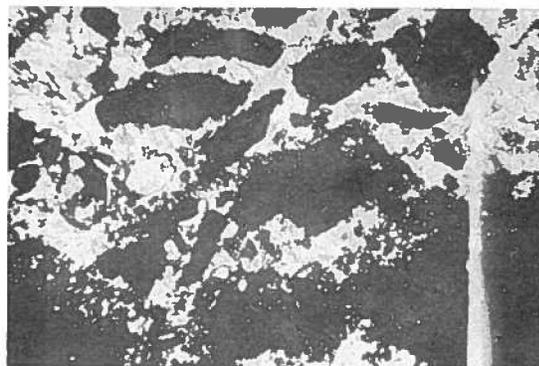


FOTO 14. Muestra 58. Niveles brechosos con "clastos" mineralizados (negro) y "cemento" de esparita (gris claro). Luz transmitida. 25X.

cristales euhedrales de carbonato (dolomita?) con magnetita, en los planos de clivaje (Foto 11).

En la caliza, se conservan esqueletos de cristales de pirita reemplazados por calcita-dolomita oscurecida.

La magnetita, en vetillas o en agregados cristalinicos zonados diseminados es, sin duda, posterior a la caliza metamorfizada. La martitización se produce en las zonas de crecimiento y no en los planos octaédricos (Foto 12). En los bordes de las masas de magnetita se observa hematita en tablillas

o agujas finas, formadas presumiblemente a partir de la alteración de la magnetita (Foto 13).

Algunas muestras presentan una "seudolaminación", marcada por magnetita maciza y magnetita granular.

Los niveles de aspecto brechoso, muestran "clastos" mineralizados o de caliza parcialmente mineralizada. El cemento es esparita limpia (calcita II). La brechización fue precedida por fracturamiento, sin desplazamiento relativo (Foto 14).

RESUMEN DE LAS OBSERVACIONES

Considerando los antecedentes expuestos en los capítulos anteriores, el yacimiento Bandurrias se caracteriza por:

- El mineral principal de hierro es magnetita, sin trazas de recristalización; sólo localmente se encuentran cristales quebrados o "craquelados".
- La textura de la magnetita es mayoritariamente granular.
- La magnetita se presenta, comúnmente, martitizada y, sólo en forma local, se observan cristales de hematita en los bordes de las masas de magnetita. No hay otro tipo de hematita.
- Al considerar el contacto caliza-manto mineralizado, se observa que la magnetita se distribuye en cristales aislados, en guías y venillas, a veces formando un fino reticulado, a veces penetran-

do entre los cristales de calcita del mosaico recristalizado.

- La mineralización es posterior a los granates y, por lo tanto, posterior al metamorfismo de contacto. Las guiecillas que penetran en la caliza lo hacen *entre* los cristales del mosaico de calcita, por lo tanto, son posteriores (por lo menos en una etapa) a la recristalización de la caliza.
- En muchos sectores, aparentemente con más frecuencia en las cercanías de diques y filones, la caliza se presenta oscurecida, con evidencias de dolomitización (cristales anhedrales y zonados) y limonitización selectiva a través de planos de clivaje y maclas.
- Estas masas oscurecidas penetran, a través de vetas y guías, a la caliza en mosaico, produciendo

- do muchas veces un aspecto brechizado en que los "clastos" son de calcita en mosaico y la matriz, de carbonatos oscurecidos por limonita.
- Hay dos generaciones de pirita, una anterior y otra posterior (o simultánea) a la mineralización principal. La segunda es la más importante y sólo se encuentra en profundidad.
 - En superficie, el azufre está contenido en yeso que ocupa guicillas y venillas.
 - La granatización está restringida a ciertos ni-

- veles, en el límite entre la unidad inferior, principalmente calcárea (Formación Nantoco) y la unidad superior, principalmente clástica (Formación Totoralillo). La composición original, responsable seguramente de esta restricción, no es determinable debido a la recristalización.
- La mineralización se asocia a la zona de granate y, por lo tanto, está restringida a la parte más alta de la secuencia sedimentaria inferior.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

De acuerdo a los trabajos citados, el yacimiento Bandurrias ha sido considerado, mayoritariamente, como de reemplazo metasomático, en niveles sedimentarios favorables. Sin embargo, últimamente se le ha mencionado (Espinoza, 1979) como un ejemplo de yacimiento singenético -hierro sedimentario y/o asociado a procesos volcánicos exhalativos- enmascarado, en parte, por procesos metamórficos posteriores.

El autor citado lo incluyó en la Categoría 4 -Cuerpos estratiformes en rocas calcáreas- de su esquema tipológico para los yacimientos de la Franja Ferrífera Principal. De acuerdo a este autor el carácter singenético estaría avalado por:

- la disposición de la mineralización en mantos concordantes con la estratificación de las calizas;
- la ausencia de diseminación en las rocas de caja;
- la presencia de una paragénesis (yeso, pirita, calcita) totalmente diferente a los otros tipos paragenéticos principales (Categorías 1, 2, 3), donde abundan actinolita, apatita, escapolita, turmalina, granate y titanita, formados en un ambiente de metamorfismo de contacto.

En Bandurrias, ninguna de las muestras observadas presenta texturas o facies originales (deposicionales o diagenéticas), que hagan pensar en una depositación de hierro sedimentario, las cuales son imprescindibles para catalogar un yacimiento como singenético (Sokolov y Grigor'ev, *in* Smirnov, 1977). Debe admitirse, para el yacimiento Bandurrias, la posibilidad de que el metamorfismo de contacto haya obliterado o borrado las facies originales.

Algunas características que permiten descartar un origen singenético para el yacimiento Bandurrias son:

- No se observan facies de calizas oolíticas.
- No hay goetita, hematita ni siderita primarias; la goetita presente está ligada, claramente, a una removilización posterior.
- La hematita se presenta casi exclusivamente como producto de martitización y/o removilización, en los bordes de las masas de magnetita.
- No aparecen bandas de magnetita asociadas a chert. Los niveles de chert se encuentran en la sección superior de la secuencia sedimentaria, sin relación con la mineralización.
- No hay evidencia de magnetita ligada singenéticamente a las calizas, si la hubiera, debería presentar rasgos de recristalización, debidos al metamorfismo, y éstos no se observan.
- No hay silicatos de hierro como chamosita, greenalita ni glauconita, asociados comunes en menas de origen sedimentarios (James, 1966).

En cambio, los antecedentes macroscópicos y microscópicos, obtenidos en el presente trabajo, son favorables al establecimiento de la siguiente secuencia de eventos de metamorfismo, mineralización y alteración:

1) Metamorfismo de contacto de la secuencia sedimentaria:

- Formación de granates en niveles favorables (también actinolita, feldespato alcalino, clinopiroxeno).
- Recristalización de caliza, formación de mosaico de cristales de calcita (Calcita I).
- Formación de pirita (primera generación), anterior o ligeramente contemporánea a la magnetita.

2) Mineralización principal

- Magnetita en textura de reemplazo metasomático.
- Formación de pirita (segunda generación).

3) Intrusión de diques y filones dioríticos.

4) Alteración de magnetita, con removilización del hierro y formación consecuente de goetita, hematita.

5) Alteración hidrotermal:

- Relleno de cavidades o reemplazo.
- Formación de calcita (calcita II), cuarzo, clori-

ta, yeso.

- Dolomitización (?).
- Limonitización (?).

Dada la orientación mineralógico-descriptiva de este trabajo, no se consideran otros tipos de criterios que también implican dificultades importantes para la aceptación de un modelo singenético. Por ejemplo, en un sedimento hidratado y a baja temperatura, la formación de óxido hidratado trivalente (goetita) se vería favorecida con respecto a la de la magnetita y, como se ha señalado, sería probable la presencia de bandas de sílice amorfa, suponiendo un origen exhalativo para el hierro introducido en la cuenca de sedimentación.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue ejecutado en el marco del proyecto chileno-francés para la investigación del hierro del Norte de Chile. La Compañía de Acero del Pacífico, a través del Jefe del Departamento de Geología, Sr. Leonardo Vergara, ha proporcionado facilidades logísticas y de información. La Universidad de Concepción, a través de su Vice-

rectoría de Investigación patrocina y financia las actividades del Proyecto en Chile.

Quisiera agradecer a mis colegas del Departamento de Geociencias, con quienes mantuve provechosas discusiones, especialmente al Dr. J. Oyarzún, coordinador del Proyecto, por su constructiva crítica a este trabajo.

REFERENCIAS

- ABAD, E. 1976.** Geología de la Precordillera al noreste de Vallenar, entre latitudes 28° y 28° 30'S, provincia de Atacama. Memoria de Título, Univ. Chile, Depto. Geol., 213 p. Santiago.
- ABAD, E. 1977.** Acerca de la paleogeografía neocomiana en la región al sur de Copiapó, provincia de Atacama, Chile. *Asoc. Geol. Argent., Rev.*, Vol. 32, No. 1, p. 24-33.
- BIESE, W. 1942.** La distribución del Cretácico Inferior al sur de Copiapó. *In Congr. Panam. Ing. Minas y Geol.*, No. 1, An., Vol. 2, p. 429-466.
- CAPURRO, J. 1943.** Estudio magnético del mineral de fierro Bandurrias. 9 p. (inédito), Santiago.
- CHOQUETTE, P.; PRAY, L. 1970.** Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *Am. Assoc. Pet. Geol., Bull.*, Vol. 54, No. 2, p. 207-250.
- CONN, H. 1974.** Geología de la Hoja Chacritas, provincia de Atacama, Chile. Memoria de Título, Univ. Chile, Depto. Geol., 90 p. Santiago.
- CORVALAN, J. 1974.** Estratificación del Neocomiano marino al sur de Copiapó, provincia de Atacama. *Inst. Invest. Geol., Rev. Geol. Chile*, No. 1, p. 13-36.
- ESPINOZA, S. 1979.** Una hipótesis sobre la metalogénesis de la franja ferrífera chilena. *In Congr. Geol. Chileno*, No. 2, Actas, Vol. 2, p. Cl-C21. Arica.
- FRIEDMAN, G.M. 1965.** Terminology of crystallization texture and fabrics in sedimentary rocks. *J. Sediment. Petrol.*, Vol. 35, No. 3, p. 643-655.
- GAJARDO, A. 1978.** Distribución de estratos calcáreos y evaluación de su potencial económico en la secuencia sedimentaria neocomiana, III Región, Atacama, Chile. Memoria de Título, Univ. Chile, Depto. Geol., 174 p. Santiago.
- JAMES, H. 1966.** Chemistry of iron-rich sedimentary rocks. *Data of Geochemistry. U.S. Geol. Surv., Prof. Pap.*, No. 440-W, p. 17-27.
- KAISER, L. 1943.** Informe geológico sobre el yacimiento de fierro de Bandurrias. 7 p. (inédito), Santiago.
- MOSCOSO, R. 1979.** Geología de una franja transversal a la Cordillera de la Costa y Cordillera de los Andes a la latitud de Domeyko (29°S), Región de Atacama. Memoria de Título, Univ. Chile, Depto. Geol., 166 p. Santiago.
- SAINT CLAIR, D. 1965.** Bandurrias iron deposit, Atacama Province, Chile. *Cía. Minera Santa Bárbara* (inédito), 62 p.

- SEGERSTROM, K. 1959.** Cuadrángulo Los Loros, provincia de Atacama. Inst. Invest. Geol., Carta Geol. Chile, No. 1, 32 p.
- SEGERSTROM, K. 1962.** Structural effects related to hydration of anhydrite, Copiapó area, Chile. U.S. Geol. Surv., Prof. Pap., No. 450-C, p. 28-30.
- SEGERSTROM, K. 1963.** Engranaje de sedimentos calcáreos con rocas volcánicas y clásticas en el Neocomiano del Geosinclinal Andino. Soc. Geol. Chile, Simp. Geosinclinal Andino, No. 1, 6 p. Santiago.
- SEGERSTROM, K.; PARKER, R.L. 1959.** Cuadrángulo Cerrillos, provincia de Atacama. Inst. Invest. Geol., Carta Geol. Chile, No. 2, 32 p.
- SEGERSTROM, K.; RUIZ, C. 1962.** Cuadrángulo Copiapó, provincia de Atacama. Inst. Invest. Geol., Carta Geol. Chile, No. 6, 115 p.
- SEGERSTROM, K.; THOMAS, H.; TILLING, R. 1963.** Cuadrángulo Pintadas, provincia de Atacama. Inst. Invest. Geol., Carta Geol. Chile, No. 12, 52 p.
- SEGERSTROM, K.; MORAGA, A. 1964.** Cuadrángulo Chañarcillo, provincia de Atacama. Inst. Invest. Geol., Carta Geol. Chile, No. 13, 50 p.
- SOKOLOV, G.A.; GRIGO'EV, V.M. 1977.** Deposits of iron. *In* Ore deposits of the U.S.S.R. (Smirnov, V.; ed.), Pitman Publ. Co., 113 p. London.