

Geología y mineralización del distrito ferrífero Cerro Imán, Copiapó, Chile

Waldo Vivallo

Departamento de Geología, Universidad de Chile,
Casilla 13518, Correo 21, Santiago, Chile

Sergio Espinoza

Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte,
Casilla 1280, Antofagasta, Chile

Fernando Henríquez

Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Santiago de Chile,
Casilla 12233, Santiago, Chile

RESUMEN

El distrito ferrífero Cerro Imán, ubicado en la Cordillera de la Costa inmediatamente al noroeste de Copiapó, se compone de cuerpos macizos y diseminados de hierro, alojados en rocas volcánicas andesíticas de edad neocomiana. Hacia el oeste, el distrito está limitado por una falla de dirección aproximada NNE y una franja de rocas miloníticas con igual orientación. La magnetita es el principal mineral de mena y presenta distintos grados de oxidación a hematita, los minerales de ganga más comunes son apatita y actinolita. Los cuerpos de mena subverticales presentan formas variables, por ejemplo, cónica, tabular (diques) o irregular; localmente se observan pequeños cuerpos macizos subhorizontales y probablemente concordantes con la estratificación. La presencia de texturas dendríticas en la magnetita, vesículas o pequeñas drusas milimétricas rellenas con cristalitos de magnetita y pirita, estructuras brechosas y vesículas centimétricas en parte de los cuerpos de mena subhorizontales, permiten interpretar la mineralización de hierro del distrito como originada por el emplazamiento de un magma de mena en, o muy próximo a la superficie. Este emplazamiento sería contemporáneo con la actividad volcánica y habría dado lugar a una actividad hidrotermal que originó una alteración zonada en la roca de caja andesítica. En la zona más próxima a la mena, la andesita fue alterada a una roca de actinolita y generalmente se presenta atravesada por guías de magnetita y magnetita-actinolita originando una mineralización tipo 'stockwork'. Esta roca de actinolita mineralizada grada hacia afuera a roca actinolítica sin mineralización. Sobreimpuesta a esta alteración existe silicificación y turmalinización la que se expresa como un difuso halo externo. El área del distrito es parte del Sistema de la Falla de Atacama, y a cuya evolución se relaciona la generación de las rocas miloníticas aquí presentes y el alzamiento del bloque ubicado al oeste del yacimiento Cerro Imán. Este alzamiento favoreció la erosión de su cubierta volcánica, permitiendo así la exposición de la franja milonítica. Relacionado con el proceso de milonitización se originó un evento mineralizador, el que dio lugar a la formación de vetas de cuarzo+magnetita-hematita+turmalina+óxidos de cobre, paralelas a la exfoliación de las rocas miloníticas.

Palabras claves: Hierro, Alteración hidrotermal, Franja ferrífera cretácica, Cerro Imán.

ABSTRACT

Geology and mineralization of Cerro Imán ferriferous district, Copiapó, Chile. The Cerro Imán iron ore district is located in the Coastal Cordillera, near Copiapó, in northern Chile. It consists of massive and disseminated orebodies hosted by neocomian andesitic rocks. The district is flanked to the west by a NNE trending belt of mylonitic rocks which belongs to the Atacama Fault zone. Magnetite partially altered to hematite is the main ore mineral; the gangue consists mainly of apatite and actinolite. The shape of the subvertical orebodies is variable *e.g.*, cone-like, tabular (dyke) or irregular shaped; locally there are small stratiform massive ore bodies. Dendritic magnetite, massive bodies of magnetite with vesicles and slag-like material are consistent with a magmatic origin of the iron ore, where an ore-magma was emplaced close to or at the

surface. The iron ore was formed contemporaneously with the andesitic volcanism, and the emplacement of the ore-magma was followed by hydrothermal activity producing wallrock alteration. This alteration displays a zoned pattern, with actinolite-rich rocks close to the massive ores grading outwards to silicified and tourmaline-rich rocks. The internal part of the actinolite-rich halo is often crosscut by magnetite and magnetite-actinolite veinlets producing disseminated and stockwork ore. The geological evolution of the district has been affected by the Atacama Fault zone, whose movement produced the mylonitic rocks and the relative uplift of the western block of the district. Magnetite-hematite-tourmaline-copper oxide minerals bearing quartz-veins, probably, formed during the mylonitic deformation.

Key words: Iron, Hydrothermal alteration, Cretaceous iron belt, Cerro Imán.

INTRODUCCION

El distrito ferrífero Cerro Imán, ubicado en la Cordillera de la Costa inmediatamente al noroeste de la ciudad de Copiapó, fue explotado en los años sesenta, extrayéndose de él ca. 20 millones de toneladas de mineral de hierro con leyes superiores a 60% de Fe. El distrito, de aproximadamente 3 x 2 km, lo forman el yacimiento Cerro Imán y algunas vetas y cuerpos de magnetita de menor importancia (Fig. 1). Estos yacimientos se consideran hoy agotados, y los

niveles inferiores del rajo del yacimiento Cerro Imán se encuentran anegados.

El distrito Cerro Imán, al igual que los otros yacimientos de la Franja Ferrífera Cretácica (FFC), está constituido por cuerpos de magnetita, predominantemente maciza, emplazados en rocas volcánicas de edad cretácica (Segestrom y Ruiz, 1962). Una de las características del yacimiento Cerro Imán es su alto contenido de S, el que en sus niveles más

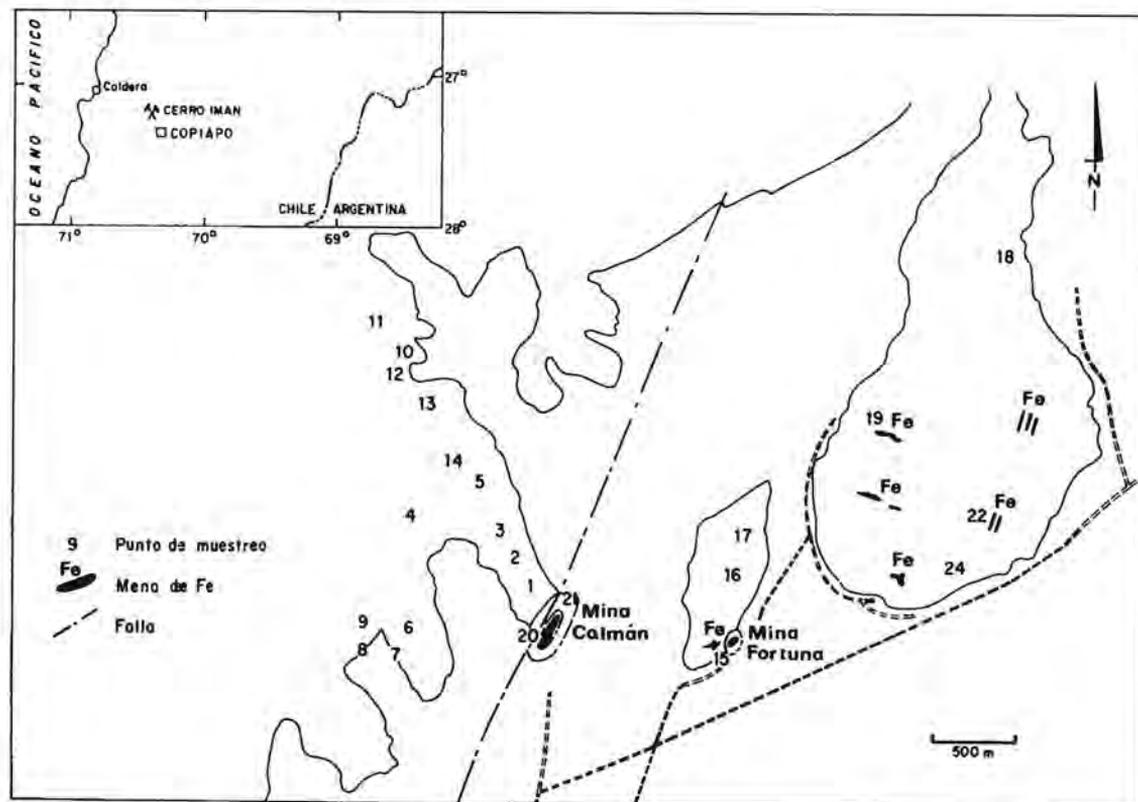


FIG. 1. Mapa esquemático del distrito Cerro Imán, indicando los puntos de muestreo. El recuadro muestra la ubicación del distrito.

profundos alcanza valores de ca. 1% (Alarcón, 1964). El S se presenta en las zonas con mineralización primaria, en forma de pirita y en menor proporción, pirrotina y calcopirita. En algunos de los depósitos menores, aledaños al yacimiento Cerro Imán, además de hierro se ha explotado oro.

El presente trabajo tiene como objetivo específico entregar una caracterización general de la geología del distrito y nuevos antecedentes referentes a la génesis de los yacimientos de magnetita-apatita de la FFC.

METODO DE TRABAJO

El área de estudio fue mapeada y muestreada utilizando una fotografía aérea, a escala aproximada de 1:60.000, ampliada cuatro veces. Se realizó un muestreo a lo largo de perfiles, en los cuales se recolectaron muestras representativas de todas las unidades litológicas definidas en terreno. Las menas y sus rocas de caja fueron muestreadas en detalle en cada uno de los yacimientos accesibles (Fig. 1). La

petrografía de las muestras fue estudiada al microscopio utilizando secciones transparentes y pulidas. Los análisis químicos fueron realizados en los laboratorios de X-Ral en Ontario, Canada, utilizando una combinación de métodos que incluyen fluorescencia de rayos X (elementos mayores, Rb, Zr), leco para S, ICP para Ni y Zn, activación neutrónica para U, DCP para V y vía húmeda para el F.

GEOLOGIA

El distrito ferrífero Cerro Imán pertenece a la FFC, la que se extiende en dirección norte-sur a lo largo de la Cordillera de la Costa, aproximadamente entre los 26° y 31°S (Ruiz *et al.*, 1965). La mayoría de los yacimientos de hierro de esta provincia metalogénica están albergados en rocas volcánicas cretácicas, mayoritariamente de composición andesítica, pertenecientes a la Formación Bandurrias (Segerstrom y Ruiz, 1962; Segerstrom, 1968; Moscoso *et al.*, 1982), y en menor proporción en rocas sedimentarias del Grupo Chañarcillo (Corvalán, 1974; Arévalo y Mpodozis, 1991). Solamente algunos depósitos se

emplazan en rocas intrusivas de edad cretácica inferior (Tilling, 1976). El conjunto de las unidades que hospedan los yacimientos de hierro de la FFC forman parte de un sistema arco magmático-cuenca trasarco desarrollada durante el Cretácico (Åberg *et al.*, 1984).

Numerosos yacimientos de cobre se ubican en la zona de transición entre el ambiente de arco magmático y la cuenca de tras-arco. Sin embargo, la mayoría de los yacimientos de hierro se ubican próximos al Sistema de la Falla de Atacama, y genéticamente se relacionan con la evolución del arco magmático (*e.g.*, Espinoza, 1979, 1990).

EL DISTRITO CERRO IMAN

Los depósitos de hierro que constituyen el distrito son principalmente de carácter macizo y se componen mayoritariamente de magnetita y cantidades subordinadas de actinolita, apatita, pirita y calcopirita. Los cuerpos de magnetita están albergados en rocas de actinolita y roca de actinolita brechizada por guías de magnetita, cuarzo y pirita, pero al alejarse de los yacimientos estas rocas gradan a volcanitas de composición andesítica, las que son asignadas a la unidad estratigráfica conocida como Grupo o Formación

Bandurrias (Segerstrom, 1968) (Fig. 2). Estas rocas, las más antiguas de la zona estudiada, están en contacto por falla con milonitas que se disponen en la parte oeste del área, definiendo una franja de dirección NNE, con un ancho promedio de 1,5 km. Hacia occidente, las milonitas gradan a rocas intrusivas plutónicas de composición intermedia.

La parte central y sureste del área estudiada está cubierta por aluvios plio-pleistocénicos.

casos, de forma paralela, sugiriendo claramente una estructura fluidal. Como minerales secundarios, en la masa fundamental, se observan clorita, epidota, calcita, titanita, y turmalina. Localmente, las andesitas presentan amígdalas rellenas con clorita, epidota, cuarzo, actinolita, minerales que ocurren solos, o bien, en pareja.

En las proximidades de los cuerpos de mena las andesitas presentan, en algunos casos, silicificación y aumento de la cantidad de anfíbola secundaria (actinolita), la que se expresa en forma de diseminación en la masa fundamental, pero principalmente rellenando fracturas junto con magnetita. En el caso de una alta densidad de vetillas, la andesita presenta aspecto de brecha hidrotermal.

Rocas de actinolita hospedan a la mena de hierro. Ellas corresponden a rocas de color verde oscuro, equigranulares en las cuales la textura de la roca original ha sido comúnmente destruida, presentando distintos grados de reemplazo por actinolita. El grado de anfíbolización decrece paulatinamente desde la mena hacia afuera. Ocasionalmente, se pueden observar reliquios de fenocristales de plagioclasa con distintos grados de alteración a sericita o epidota, en una masa fundamental constituida por actinolita, epidota, clorita, cuarzo, y magnetita. Epidota y clorita generalmente reemplazan a la actinolita.

En los contactos con los cuerpos macizos de mena de hierro las rocas de actinolita se presentan brechizadas, en metros a decenas de metros. El aspecto brechoso de estas rocas se debe a la presencia en ellas de vetillas polidireccionales, de hasta 1 cm de espesor, formadas, principalmente, por magnetita±actinolita±apatita±cuarzo, con o sin sulfuros. Las vetillas de magnetita pueden estar atravesadas por

otras de actinolita-plagioclasa y estas, a su vez, cortadas por vetillas de epidota-calcita, calcita o vetillas de cuarzo. Estas rocas brechosas presentan además, diseminación de magnetita y constituyen la mineralización diseminada o de tipo 'stockwork' comúnmente presente en los yacimientos de hierro de la FFC.

Un importante cuerpo de roca milonitizada se ubica en la parte oeste del área estudiada (Figs. 2 y 3), constituyendo una faja de más de 1 km de ancho y de dirección NNE. Hacia el este está limitado por una falla, que también constituye el límite oeste del yacimiento Cerro Imán. Hacia el oeste gradúa a una roca intrusiva fanerítica de composición intermedia.

La milonita se presenta como una roca esquistosa, en parte bandeada, con bandas de espesores centimétricos a métricos y rumbo variable entre N20°E a N30°E. Las dos variedades principales de milonita corresponden a una milonita gris y otra de aspecto aplítico y color blanco. La milonita gris está constituida, principalmente, por cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico(?), clorita, restos de anfíbola y epidota. Al microscopio se observa un bandeamiento con alternancia de bandas ricas en minerales félsicos y otras ricas en minerales ferromagnesianos (anfíbola, clorita, epidota, titanita). En general, todos los minerales se presentan orientados paralelamente, y presentan una fuerte recrystalización. En parte, se observan porfiroblastos de cuarzo y plagioclasa, los que se presentan comúnmente deformados y recrystalizados. La plagioclasa presenta sericitización, o bien, está reemplazada por epidota y calcita, mientras que la anfíbola está reemplazada por epidota y titanita.

La milonita de color blanco y aspecto aplítico está constituida, mayoritariamente, por cuarzo, plagioclasa,

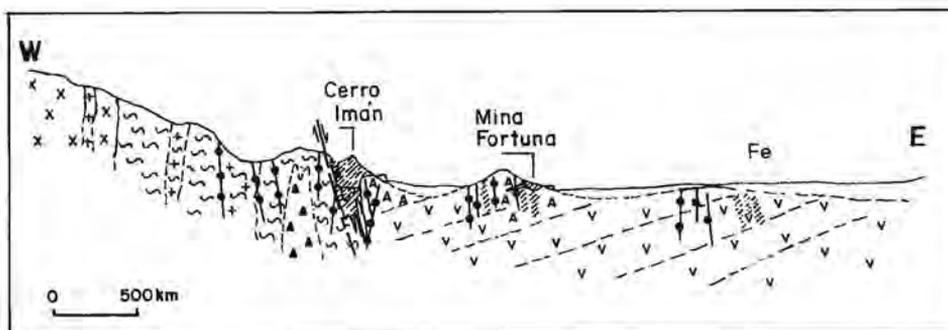


FIG. 3. Perfil esquemático del distrito Cerro Imán, mostrando la relación entre las rocas miloníticas y la mena de hierro de los depósitos Cerro Imán y Mina Fortuna. Los símbolos se indican en la figura 2.

feldespato potásico, titanita, muscovita, clorita y epidota, estos tres últimos en pequeñas cantidades. El feldespato está sericitizado localmente, y en general todos los minerales presentan recristalización; en algunos casos se presentan porfiroblastos de cuarzo y plagioclasa, los que se presentan redondeados y rotados.

Vetillas y lentes de cuarzo y cuarzo-turmalina±calcita, que pueden alcanzar hasta 2 m de largo y 20 cm de espesor, paralelos a la esquistosidad, son comunes en la milonita. Junto a las vetillas y lentes de cuarzo-turmalina se presentan, también, lentes de cuarzo-epidota-calcita-magnetita y de granate-epidota-cuarzo-calcita-actinolita. Además, alojadas en la franja de milonita, se observan numerosas vetas de cuarzo-(magnetita)-hematita con diseminación de calcita y óxidos de cobre. Estas vetas, comúnmente, no superan 1 m de espesor, pero pueden ser de varios centenares de metros de largo, no presentan deformación y son también aproximadamente paralelas a la esquistosidad. En general, se observa un incremento de la cantidad de vetillas de cuarzo-turmalina al aproximarse hacia las zonas con mineralización de hierro.

Diques de composición intermedia atraviesan tanto a la milonita como a las andesitas, menas de hierro y fallas. Estos son de aproximadamente 1-10 m de espesor, y presentan un rumbo preferencial N10°W a N20°W, siendo muy abundantes en el extremo este del área estudiada. La roca presenta textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa y/o anfíbola en una masa fundamental afanítica, constituida por plagioclasa, anfíbola, clorita, cuarzo, minerales opacos. Estos diques no presentan deformación, y la plagioclasa puede estar argilizada o alterada a epidota, mientras que la anfíbola es reemplazada por calcita-clorita o epidota.

Diques de una generación anterior se encuentran incluidos dentro de la milonita. Estos presentan una fuerte esquistosidad y en parte bandeamiento, el cual se observa principalmente al microscopio, con ban-

das ricas en anfíbola alternando con bandas de plagioclasa-cuarzo. Presentan recristalización y los minerales están fracturados y deformados. La anfíbola puede ocurrir también como fenocristales.

Un cuerpo de brecha ígnea, de sección aproximadamente circular, 100-200 m de diámetro, aflora al oeste del yacimiento Cerro Imán (Fig. 2). Este cuerpo intruye a la unidad milonítica y no presenta deformación. Contiene fragmentos de hasta 10 cm, subredondeados a angulosos, que corresponden a un granitoide de composición intermedia, pero también otros fragmentos de composición máfica y de grano muy fino, compuesto principalmente por anfíbola y clorita. La matriz es ígnea, de textura porfídica, grano fino, decreciendo el tamaño del grano hacia los contactos (bordes de enfriamiento). Al microscopio, presenta fenocristales de plagioclasa, total o parcialmente reemplazados por epidota y fenocristales de anfíbola, en una masa fundamental conformada mayoritariamente por cuarzo-feldespato, anfíbola, epidota y clorita, y con abundante diseminación de magnetita. Los cristallitos de plagioclasa de la masa fundamental se presentan orientados, definiendo una estructura fluidal.

Rocas plutónicas faneríticas están presentes en el borde oeste del área (Fig. 2), las cuales, con el incremento de la deformación, gradan hacia el este a la unidad milonítica. Tienen una composición intermedia, variable, entre rocas constituidas por plagioclasa-anfíbola-cuarzo, plagioclasa-feldespato potásico-cuarzo y plagioclasa-cuarzo-biotita-piroxena como minerales principales, con cantidades menores de epidota, titanita, sericita, minerales opacos y calcita.

Intruyendo a las plutonitas existen cuerpos alargados, como lentes o diques de aplita, los que presentan color blanco y grano fino. Están compuestos por plagioclasa-feldespato potásico-cuarzo como minerales principales y cantidades menores de epidota, anfíbola, clorita, biotita y minerales opacos. Generalmente, la plagioclasa presenta una débil sericitización.

GEOQUÍMICA

Las rocas volcánicas menos alteradas se caracterizan por tener contenidos de volátiles (LOI en Fig. 4) generalmente menores que 1% en peso. Sus contenidos de SO_2 , TiO_2 y Zr son compatibles con

una composición andesítica, y solamente una muestra indica la presencia de probables rocas dacíticas intercaladas en la secuencia volcánica. En los diagramas de variación de los distintos componentes

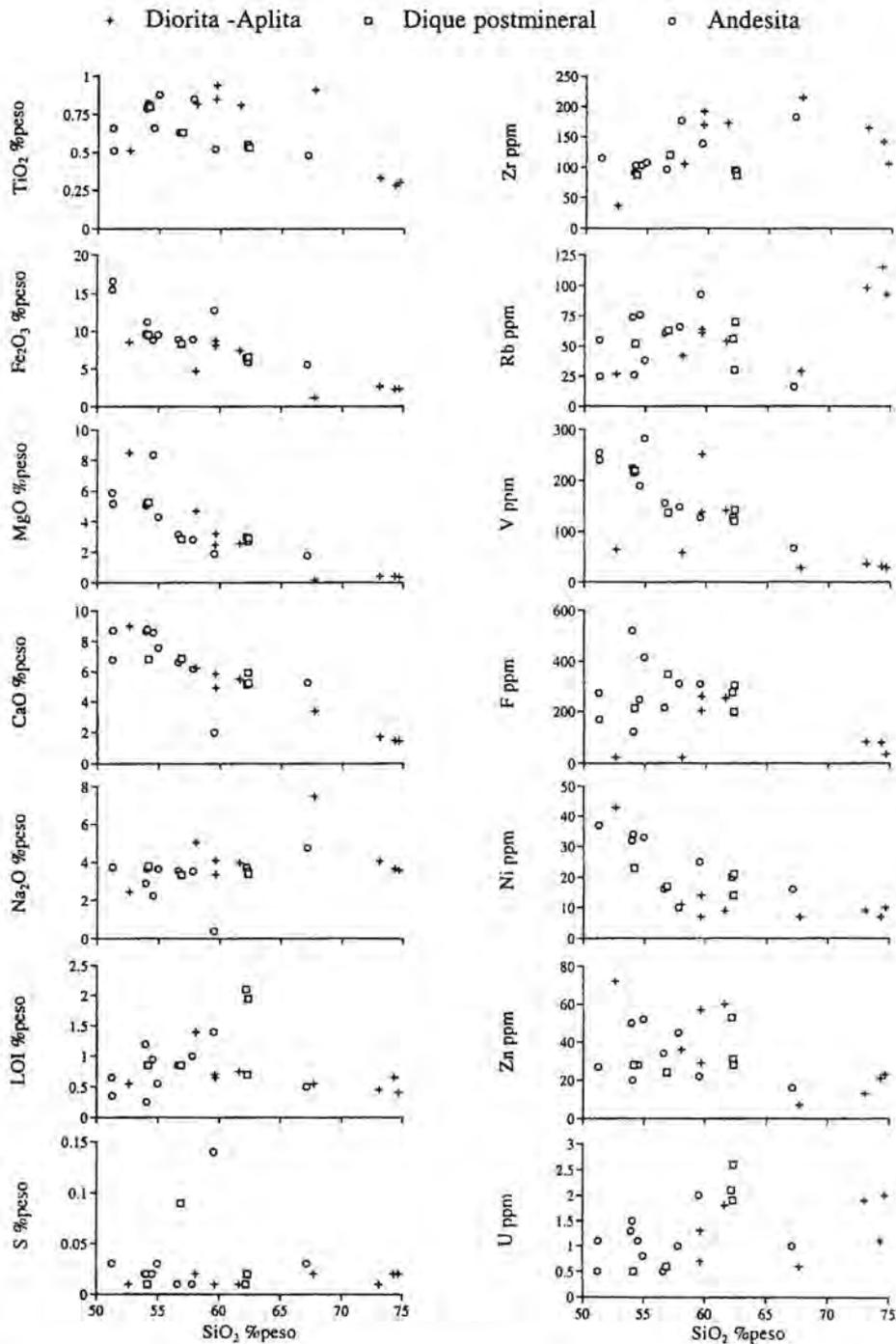


FIG. 4. Diagramas de variación de algunos de los elementos de las rocas volcánicas e intrusivos del distrito de Cerro Imán, con respecto a SiO_2 . Algunos de estos elementos, como por ejemplo CaO, muestran un comportamiento compatible con el proceso de diferenciación magmática, mientras que en otros casos se observa una gran dispersión y falta de correlación con SiO_2 , revelando un comportamiento móvil durante los procesos de alteración que afectaron a las rocas del área durante y después de su emplazamiento.

con respecto a SiO_2 (Fig. 4) se aprecian varios tipos de comportamientos, por ejemplo, elementos como Fe_2O_3 y CaO muestran una buena correlación con SiO_2 compatible con un proceso de diferenciación magmática. Otros elementos tales como Rb, Zn y U se caracterizan por una gran dispersión de sus valores, sin correlación o variación sistemática con respecto a los valores de SiO_2 , sugiriendo una alta movilidad para tales elementos durante los procesos que siguieron a la formación de estas rocas.

Las rocas intrusivas muestran un rango composicional mucho más amplio; los diques postmineral, en general, presentan una composición química muy similar a la de las rocas volcánicas mientras que las rocas intrusivas más diferenciadas corresponden a los cuerpos aplíricos. En general, el comportamiento de los distintos elementos respecto de SiO_2 es igual al descrito para las rocas volcánicas. En términos de

sus contenidos de SiO_2 los granitoides presentan una clara tendencia a una distribución bimodal (Fig. 4), caracterizada por la presencia de rocas de composición diorítica y granítica.

Comparadas con las rocas volcánicas menos alteradas, las rocas actinolizadas (rocas alteradas en Fig. 5) muestran contenidos de volátiles (LOI en Fig. 5) generalmente superiores al 1% en peso, dependiendo su valor del grado de actinolización que las afecta. La mayoría de sus componentes muestran en los diagramas de variación (Fig. 5) una gran dispersión, sin variaciones sistemáticas con respecto a los cambios en los contenidos de SiO_2 . La actinolización de las rocas volcánicas resulta, principalmente, en un incremento de los contenidos de Fe_2O_3 , CaO , MgO , V, F(?) y pérdida de SiO_2 , TiO_2 , Na_2O . Los otros elementos presentan comportamientos más erráticos en términos de ganancias o pérdidas.

ESTRUCTURA

Los rasgos estructurales más destacados en el área estudiada corresponde a la franja de milonitas y la zona de falla que constituye su límite oriental. La esquistosidad de las rocas miloníticas tiene un rumbo general NNE y manteo aproximadamente vertical a subvertical (75°E). A esta franja de deformación dúctil se sobrepone una zona de falla cuyo rumbo es subparalelo a la esquistosidad de las milonitas. En la pared oeste del rajo, en el yacimiento Cerro Imán, la zona de cizalle dúctil se observa como una franja de varios metros de espesor, subvertical, de rocas miloníticas banceadas. Entre las bandas se aprecian fragmentos de la mena de hierro. Una zona de falla, subparalela a la esquistosidad, marca el límite entre

las rocas miloníticas y la mena de hierro. Un dique de composición intermedia, de dirección $\text{N}10^\circ\text{W}$, corta a la mena de hierro, milonitas y a la zona de falla, sin ser afectado por ella o por la deformación.

Numerosas fallas de rumbo NNE y noroeste y manteo vertical, cortan a los cuerpos de mena de hierro, originando pequeños desplazamientos.

En general, entre las rocas volcánicas no se aprecian evidencias de estratificación, con excepción de una secuencia que aflora en la parte noreste del área de estudio. Aquí se observa una secuencia de flujos de andesita porfídica alternando con otros afaníticos cuya estratificación muestra una disposición $\text{N}15^\circ\text{W}/40^\circ\text{SW}$.

ALTERACION

Las alteraciones más importantes corresponden a **actinolización, silicificación y turmalinización**. La actinolización está restringida a halos en torno a la mineralización de hierro y afecta exclusivamente a las rocas volcánicas. En los casos más extremos, la mineralogía original de las andesitas ha sido totalmente reemplazada por actinolita. La intensidad de la actinolización disminuye con la distancia a los cuerpos de mena, expresándose en las partes más exter-

nas como diseminación de actinolita en las andesitas. Localmente, las rocas actinolizadas pueden presentar silicificación o una fuerte epidotización, en cuyo caso la actinolita es total o parcialmente reemplazada por epidota. La extensión de los halos de rocas actinolizadas es directamente proporcional al tamaño de los cuerpos de mena.

La silicificación ocurre fundamentalmente en las márgenes externas de las zonas actinolizadas. Se

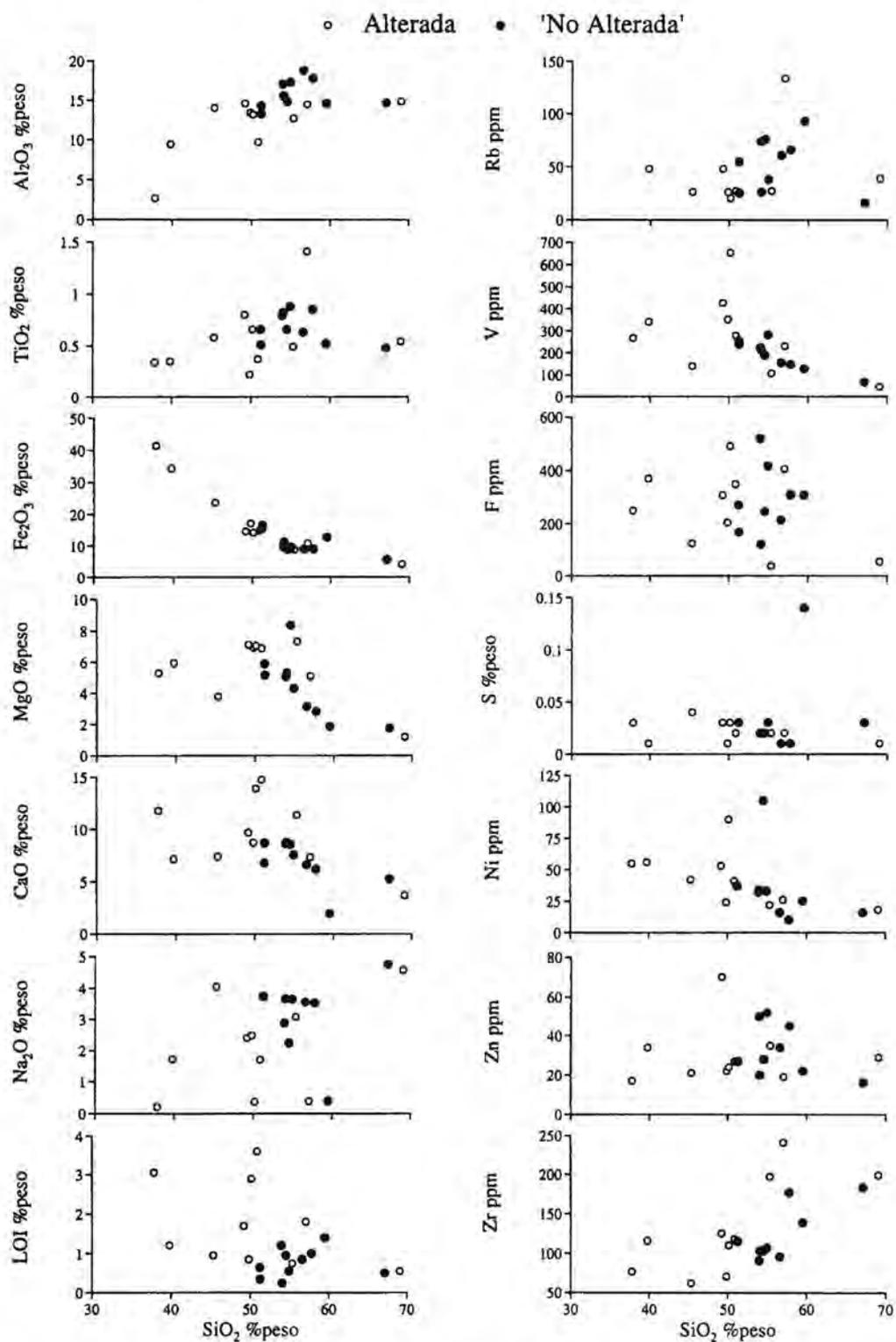


FIG. 5. Diagramas de variación para rocas volcánicas 'no alteradas' y alteradas (actinolitizadas) del distrito ferrífero Cerro Imán. En estos diagramas se aprecian claramente los cambios en la composición química de las rocas volcánicas producido por el proceso de actinolitización.

expresa en la formación de vetillas de cuarzo y en el caso de las andesitas, en la adición de cuarzo en su masa fundamental.

Con frecuencia, el cuarzo está acompañado de turmalina, conformando vetillas o vetas de estos minerales. Diseminación de turmalina, especialmente en fracturas y cavidades, también es habitual en los cuerpos de mena de hierro.

En la mena de hierro, o en sus proximidades, se

presentan, aunque en cantidades limitadas, vetillas y diseminación de calcita. Una epidotización generalizada, con o sin clorita, afecta a la casi totalidad de las unidades litológicas; generalmente la epidota reemplaza a la plagioclasa y más comúnmente a la anfíbola.

Localmente, y asociado a la mena de hierro de la Mina Fortuna, se observa la presencia de jarosita±alunita.

MINERALIZACIÓN

La mineralización principal del distrito corresponde a la mena de hierro, pero hacia el sector oeste y restringidas al cuerpo de milonita, se observan varias vetas de cuarzo-magnetita-hematita±turmalina conteniendo diseminación de óxidos de cobre. Cuerpos similares se observan en la periferia de los yacimientos de hierro del sector este (Fig. 2), pero en este caso la roca huésped es andesita.

La mayor parte de la mena de hierro del distrito presenta como cuerpos macizos, de formas aproximadamente cónicas (Fig. 3) y tabulares, verticales, constituidos por magnetita con grados variables de martitización. Actinolita, apatita, diseminación y vetillas de pirita±pirrotina±calcopirita son otros minerales menores comúnmente asociados con la mena. En los bordes de estos cuerpos macizos puede presentarse mineralización diseminada y en vetillas (tipo 'stockwork'), constituyendo un halo en torno a la parte maciza.

El yacimiento más importante del distrito corresponde al de la mina Cerro Imán, el cual estaba constituido por cuerpos macizos de sección elíptica y tendencia vertical a subvertical (Alarcón, 1964). Estos han sido en su mayor parte explotados, quedando hoy sólo restos de ellos. En la parte sur del rajo existen restos de estos cuerpos, y en este lugar se observa la mena maciza y la roca de caja actinolizada. La mena corresponde a magnetita, la que en las proximidades de la falla que limita el yacimiento por el oeste, se presenta muy fracturada y alterada, con abundante jarosita, sílice y hematita. Este cuerpo presenta una sección circular, y disposición vertical, presentando digitaciones hacia su parte alta. Localmente, la magnetita presenta una textura caracterizada por numerosos prismas paralelos, de mm a cm de longitud (Fig. 6a), los cuales en algunos casos definen bandas o estructuras de formas ligeramente ra-

diales. Este tipo de estructura es similar a las texturas dendríticas presentes en los cuerpos intrusivos de magnetita en el yacimiento El Laco (Henríquez y Martín, 1978). Localmente, las partes macizas de la mena, pueden presentar además cavidades milimétricas ('microdrusas' o vesículas) en cuyo interior se observa el crecimiento de minerales, tales como magnetita octaédrica y también pirita.

La mena está atravesada por vetillas centimétricas, de aspecto brechoso, en las cuales fragmentos de magnetita están contenidos en una matriz de sílice-turmalina-magnetita. Otros tipos de vetillas que cortan a la mena maciza están constituidos por actinolita±magnetita, magnetita y hematita. Sílice opalina, magnetita, calcita y turmalina son minerales que comúnmente cubren paredes de fracturas en los cuerpos de mena.

Algunos sectores de la mena pueden ser muy ricos en sulfuros, mayoritariamente pirita, la que se presenta diseminada y en vetillas, donde la pirita coexiste con magnetita. Calcopirita y pirrotina también se observan acompañando a la pirita. Las vetillas con sulfuros cortan a las vetillas de hematita. En general, la pirita diseminada se presenta en forma de megacristales sin deformación (cf. p. 210).

En la parte noroeste del rajo, en el yacimiento Cerro Imán, se observan restos de una serie de cuerpos menores de magnetita maciza, con aspecto de diques verticales, uno de los cuales en su parte alta se conecta con un cuerpo estratiforme, subhorizontal, de 20-30 m de largo y aproximadamente 5 m de potencia. Depósitos bandeados de dolomita, con intercalaciones de óxidos de hierro, rellenan fracturas subverticales en la mena de hierro.

Hacia el sector este del distrito, la mayor parte de la mineralización se presenta en forma de cuerpos macizos con forma de veta o dique. Su mineralogía es

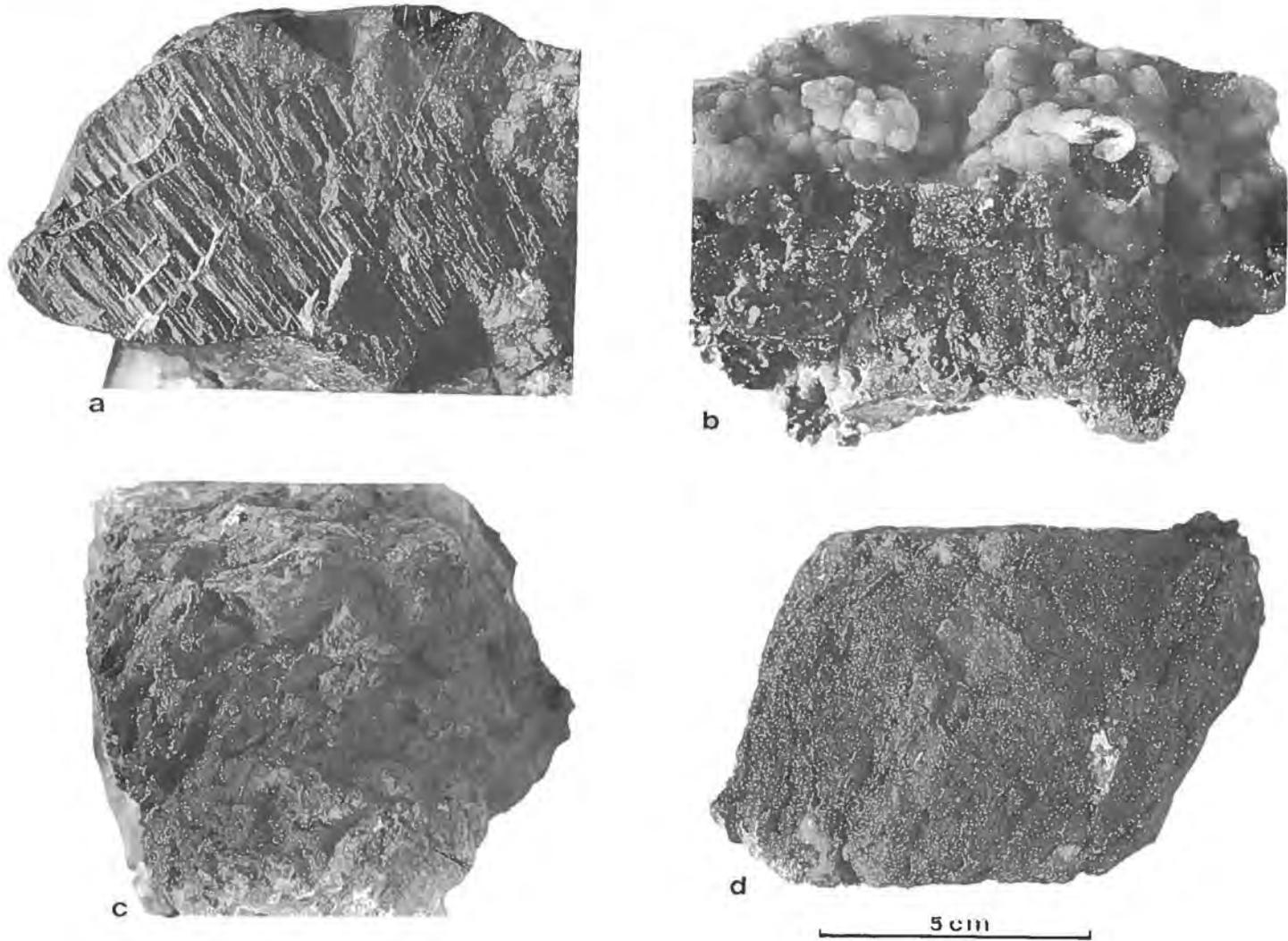


FIG. 6. a- magnetita con textura dendrítica del yacimiento Cerro Imán; b- magnetita escoriácea, con deposición de sílice opalina, representando la parte alta de un flujo de magnetita. c- magnetita de aspecto poroso, con abundantes cavidades que corresponden a vesículas originadas por escape de gases; d- depósito de magnetita con aspecto 'arenoso' y bandeamiento fino, interpretado como depósito piroclástico de magnetita. Escala gráfica es válida para todas las muestras.

similar a la observada en Cerro Imán, pero la extensión e intensidad de la actinolitización y brechización de las rocas de caja son mucho más restringidos (2-3 m) y con frecuencia los megacristales disseminados de pirita se presentan deformados y fracturados. Estos cuerpos son verticales, de hasta 10 m de espesor, dominando aquéllos de 2-3 m de ancho, y su largo comúnmente supera el centenar de metros. Su rumbo es variable.

En la mina Fortuna (Fig. 2) se pueden observar restos de cuerpos subhorizontales de magnetita, junto a cuerpos de disposición vertical. En fracturas que afectan a los cuerpos de magnetita, se aprecian depósitos bandeados de dolomita, similares a los observados en Cerro Imán. Los cuerpos subhori-

zontales de magnetita presentan en parte aspecto brechoso, fracturas y cavidades centimétricas, de forma irregular, rellenas con sílice coloidal (Fig. 6b). En bloques de mineral (2 x 2 m), se observa parte de cuerpos brechizados, con abundantes vesículas y amígdalas milimétricas a centimétricas (Fig. 6c); autobrechización, donde los fragmentos tienen bordes de grano más fino y estructura fluidal, presentando el aspecto de un flujo o colada de magnetita. Algunos bloques brechizados presentan, en la matriz, abundante jarosita-alunita y limonitas, y paredes de fracturas recubiertos con cristalitos de magnetita. Además, se observaron algunos bloques con aspecto de 'arena de magnetita', lo que podría representar algún tipo de depósito piroclástico (Fig. 6d).

DISCUSION

MILONITIZACION DE LAS ROCAS PLUTONICAS Y CARACTER DE LA ACTIVIDAD VOLCANICA

La geología del distrito Cerro Imán se encuentra dominada por una asociación de rocas volcánicas andesíticas y plutónicas de composición intermedia (Fig. 4). La transición observada desde las rocas plutónicas del borde oeste y hacia la unidad milonítica ubicada inmediatamente al este de ellas, permite inferir con bastante seguridad, que el protolito de las rocas milonitizadas corresponde a las rocas plutónicas anteriormente mencionadas. La presencia de extensas zonas milonitizadas en las proximidades de los depósitos, es un rasgo común a muchos de los yacimientos de hierro de la FFC (Ruiz *et al.*, 1965; Espinoza, 1984) y ha sido relacionada al desarrollo del Sistema de la Falla de Atacama, la cual registra actividad, por lo menos, desde el Jurásico Superior y hasta el presente (Thiele y Pincheira, 1987; Scheuber y Andriessen, 1990; Brown *et al.*, 1993a, 1993b).

La zona milonitizada presenta distintos tipos de vetas y vetillas, tales como vetas de cuarzo-óxidos de hierro±turmalina±óxidos de cobre, vetillas de epidota, granate-epidota-actinolita, las cuales en general son concordantes con la foliación, razón por la cual, ellas podrían ser sincrónicas con la deformación. Las dimensiones de la vetas de cuarzo-óxidos de hierro, anteriormente mencionadas, sugieren que asociado al proceso de milonitización, se originó una fase fluida importante, capaz de transportar elementos y dar origen a nuevas fases minerales. El evento térmico

asociado a la generación de esta fase fluida no habría sobrepasado el rango de temperatura asignado a las facies de esquistos verdes, como se puede deducir de la presencia de vetillas con epidota, y epidota-granate-actinolita-calcita (Winkler, 1976). Este rango de temperatura es compatible con el indicado por Scheuber y Andriessen (1990) y Brown *et al.* (1993a, 1993b) para la deformación dúctil a lo largo de la zona de la Falla Atacama, durante el Cretácico Inferior (130-126 Ma, Brown *et al.*, 1993b).

Regionalmente, este sector de la FFC se caracteriza por el predominio de rocas volcánicas andesíticas (Seegerstrom y Ruiz, 1962). Las características de las rocas volcánicas del área son compatibles con una actividad volcánica subaérea. El predominio de flujos de lavas sobre otros tipos de depósitos volcánicos, junto con la abundante presencia de diques de composición intermedia (Fig. 4), sugieren además que ellos representan facies proximales de una estructura volcánica mayor, como por ejemplo un estrato-volcán andesítico. La intensa actividad volcánica fue acompañada por el emplazamiento de cuerpos plutónicos, los que posteriormente, debido a la actividad de la falla que divide el distrito en dos dominios, fueron deformados y el bloque occidental sollevado. Producto del alzamiento del bloque occidental se produjo, en éste, una intensa erosión que lo despojó de su cubierta volcánica.

Las últimas manifestaciones del magmatismo en el distrito, corresponden al emplazamiento de los diques tardíos que cortan a la zona de falla, milonita

y mena de hierro. Probablemente, en forma contemporánea con este evento se produjo el emplazamiento de la brecha ígnea aflorante al oeste del depósito Cerro Imán (Fig. 2).

MINERALIZACIÓN DE HIERRO Y ALTERACION HIDROTHERMAL ASOCIADA

El origen de los yacimientos de hierro de la FFC, particularmente de aquéllos asociados con el complejo volcánico-intrusivo, representado por el arco magmático cretácico, ha sido explicado recurriendo a diferentes procesos, por ejemplo, metamorfismo de contacto (Alarcón, 1964), actividad deutérica-hidrotermal (Ruiz, 1943), generación por diferenciación magmática (Geijer, 1931). Todos ellos tienen en común que el proceso favorecido siempre está relacionado con los procesos magmáticos generados durante la evolución del arco. La presencia en el distrito Cerro Imán de cuerpos macizos de magnetita con texturas dendríticas (Fig. 6a), similares a las observadas en cuerpos intrusivos de magnetita, de origen magmático, en el yacimiento El Lago (Henríquez y Martín, 1978), y los depósitos con características de flujos de lava de magnetita presentes en Mina Fortuna (Figs. 6b, 6c y 6d), constituyen importantes evidencias que permiten sugerir que los yacimientos de hierro del distrito tienen su origen en el emplazamiento de un magma de mena, generado durante el desarrollo del arco magmático. Este magma de mena habría generado tanto cuerpos intrusivos como extrusivos de magnetita. La relación espacial y temporal de las menas de hierro con las rocas volcánicas andesíticas, contribuye a dar mayor peso a la interpretación antes señalada. Una datación K/Ar en muscovita (Zentilli, 1974) de un cuerpo vetiforme que corta la mineralización de hierro en Cerro Imán, indica una edad de 102 Ma, lo cual es consistente con la idea de un emplazamiento de la mena contemporáneo con la actividad volcánica. Una edad comprendida entre 110 Ma y 117 Ma (McNutt *et al.*, 1975) ha sido asignada al volcanismo andesítico que aloja la mineralización de hierro de la FFC, entre los 26°-29°S.

En los yacimientos del distrito Cerro Imán se observa un amplio predominio de los cuerpos de mena intrusivos sobre los extrusivos, encontrándose estos últimos sólo como relictos. La presencia de magnetita emplazada en forma de depósitos efusivos y la de 'microdrusas' o vesículas observadas en los cuerpos intrusivos de magnetita, evidencian su emplazamiento muy próximo a la superficie.

La presencia de andesitas alteradas a rocas y brechas de actinolita, sólo en las proximidades de los cuerpos de mena, es indicativo de la relación genética entre la mineralización de magnetita y las rocas de actinolita. La presencia de bordes brechizados, con mineralización diseminada y tipo 'stockwork', en torno a los cuerpos macizos de magnetita, como asimismo la presencia de vetillas de distinta composición que cortan a la mena, dan testimonio del desarrollo de una etapa deutérica-hidrotermal que acompañó al emplazamiento de los cuerpos macizos de magnetita. La presencia en la mena de diseminación de actinolita, vetillas de este mineral que la cortan y la brechización de la roca de actinolita por vetillas de magnetita, y en parte el reemplazo de la roca de caja por magnetita, indican una evolución compleja y una estrecha relación temporal entre los procesos de emplazamiento de la mena y actinolitización de las rocas de caja. La sobreimposición de la silicificación y turmalinización a las rocas anfibolitizadas y las menas, expresada por la presencia de vetillas de estos minerales que las cortan, sugiere que este proceso puede representar una actividad hidrotermal tardía en el proceso de mineralización-alteración que dio origen al distrito. El proceso de epidotización ocurre con posterioridad a la anfibolitización, puesto que las rocas de actinolita son reemplazadas por este mineral o cortadas por vetillas conteniendo epidota, sin embargo su relación con la silicificación-turmalinización no está clara. Es probable que exista epidota de distintos orígenes, por ejemplo hidrotermal o metamórfica, y no necesariamente relacionada con el proceso mineralizador. La amplia distribución de epidota en rocas andesíticas que no contienen mineralización sugiere, que al menos parte de ella es de carácter regional, probablemente relacionada al proceso general evolutivo del sistema arco magmático cuenca-trasarco, por ejemplo, un proceso de metamorfismo de carga (Åberg *et al.*, 1984). El proceso de milonitización que afecta a parte de las rocas del área también permitió la formación de epidota.

La distribución espacial y relaciones temporales entre las rocas alteradas, como se indica por las relaciones de terreno, sugieren que durante el proceso de consolidación de la mena de hierro se generó, inicialmente, un fluido hidrotermal de alta temperatura, reflejado por la presencia de vetillas de actinolita-plagioclasa, actinolita-magnetita (Liou *et al.*, 1974), rico en Fe, Ca, Mg, capaz de producir un fuerte metasomatismo en las rocas de caja, alterando las andesitas a rocas de actinolita (Fig. 5). La presencia en la mena

de vetillas o fracturas rellenas con dolomita, sílice y óxidos de hierro, podrían indicar la evolución del fluido inicial hacia uno de más baja temperatura y rico, además, en CO_2 . Posteriormente, un fluido mucho más rico en Fe, Si, B, fue capaz de producir brechización en la roca de actinolita, depositar en las zonas marginales del distrito algunas de las vetas y vetillas de cuarzo-turmalina±óxidos de hierro y rellenar fracturas en la mena de hierro y sus rocas de caja con turmalina, cuarzo y sílice opalina.

La evolución del proceso hidrotermal resultó finalmente, en una distribución zonada de la alteración, con un halo de roca de actinolita brechizada por magnetita, en la zona más próxima a la mena, seguido hacia afuera de rocas de actinolita, gradando hacia la periferia a un difuso halo externo con silicificación, escasa diseminación de actinolita y presencia de vetas y vetillas con cuarzo-turmalina±óxidos de hierro.

La pirita es un mineral particularmente abundante en el yacimiento Cerro Imán, pudiendo el contenido de S en la mena alcanzar valores ca. 1% en peso. Los sulfuros (pirita, pirrotina, calcopirita), particularmente pirita, se presentan en forma de megacristales diseminados y en vetillas. El hecho de que algunos de los cristales diseminados de pirita se presenten deformados y fracturados, sugiere una formación muy cercana con la mena de hierro, lo mismo indica la coexistencia de magnetita-pirita en vetillas que la cortan (cf. p. 206). La presencia de vetillas de cuarzo-pirita que cortan a vetillas tardías de hematita señalan la presencia de un segundo evento hidrotermal portador de sulfuros. En consecuencia, las relaciones texturales indican que, al menos, una parte de la mineralización de sulfuros puede ser contemporánea o muy cercana al emplazamiento de los cuerpos macizos de magnetita, pero la parte más importante parece relacionarse con eventos hidrotermales posteriores.

La presencia en la milonita de vetas y vetillas de cuarzo-turmalina-óxidos de hierro, vetas de cuarzo-óxidos de hierro-óxidos de cobre, y epidota-calcita-

granate, dispuestas paralelamente a la foliación, sugiere la posibilidad que durante el proceso de milonitización se haya originado una fase fluida responsable de estas mineralizaciones. Dado que la mena del yacimiento Cerro Imán es afectada por el fallamiento-deformación, esta vetas y vetillas alojadas en la milonita podrían corresponder a un evento mineralizador, diferente de aquel que generó las menas de hierro.

Sin embargo, la relación temporal entre el evento generador de las menas de hierro y el proceso de milonitización no está claro. De acuerdo a las edades radiométricas disponibles para el segmento del Sistema de la Falla de Atacama, ubicado al norte del distrito (26-27°S), la formación de las milonitas (130-126 Ma; Brown *et al.*, 1993b) sería anterior a la deposición de las rocas volcánicas que contienen la mineralización de hierro (107-117 Ma; McNutt *et al.*, 1975). Como se ha mencionado, el Sistema de la Falla de Atacama presenta una evolución compleja, con actividad desde el Jurásico Superior hasta el presente (Brown *et al.*, 1993b), razón por la cual no se puede descartar que las rocas volcánicas del distrito sean más antiguas que lo indicado por las edades informadas por McNutt *et al.* (1975), o bien, esa edad sea válida y lo que estamos observando en el distrito represente un evento de deformación más joven que el registrado por Brown *et al.* (1993b).

Comparando el distrito Cerro Imán con el distrito ferrífero Cerro Negro Norte, ubicado algunos kilómetros hacia el norte, ambos presentan importantes rasgos en común, por ejemplo, tipo de mena, forma y modo de emplazamiento de los cuerpos de magnetita, litología y alteración asociada a la mineralización, ambiente geológico común. Las principales diferencias residen en la ausencia, en Cerro Negro Norte, del extenso cuerpo de milonita que limita a Cerro Imán por el oeste, y la limitada ocurrencia de brechas hidrotermales de turmalina y anfíbola-turmalina en este último distrito.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los antecedentes de terreno, se puede inferir que la evolución geológica del distrito Cerro Imán, estuvo inicialmente marcada por una intensa actividad volcánica subaérea, de carácter andesítico. Probablemente en forma contemporánea con la actividad magmática, se produjo la generación

y emplazamiento de la mena maciza de hierro y su actividad hidrotermal asociada.

La actividad hidrotermal relacionada con el emplazamiento de la mena maciza de hierro, originó a nivel de yacimiento y distrito, una alteración zonada en las andesitas que constituyen la roca de caja de los

depósitos. En la zona más próxima a la mena, la roca de caja fue actinolitizada y brechizada por vetillas de magnetita y magnetita-actinolita, dando origen a la mineralización diseminada o tipo 'stockwork'. Esa zona brechizada grada hacia afuera a rocas fuertemente actinolitizadas.

Rodeando a la zona actinolitizada y sobreimpuesta a ella, existe un difuso halo externo silicificado y turmalinizado, con escasa actinolita diseminada. Durante la fase hidrotermal se depositó en fracturas una parte importante de la mineralización sulfurada, sobreimpuesta a la mena de hierro. La extensión de la zona de alteración es directamente proporcional a la dimensión de los cuerpos de mena.

El área ha sido afectada por procesos episódicos de deformación dúctil y frágil, relacionados con la evolución compleja del Sistema de la Falla de Atacama. Los movimientos ocurridos a lo largo de la zona de la Falla de Atacama serían los responsables de la

generación de las rocas miloníticas presentes en el área y del alzamiento del bloque ubicado hacia el oeste del distrito. Esta actividad permitió la erosión de la cubierta volcánica del bloque elevado, permitiendo la exposición en superficie de la franja de rocas miloníticas. Contemporáneamente con el proceso de deformación que dio origen a las rocas miloníticas, se produjo su silicificación local, y formación de vetas y vetillas de cuarzo±turmalina±óxidos de hierro±óxidos de cobre, además de vetillas con epidota-calcita-granate. Este evento mineralizador, que origina cuerpos vetiformes en la milonita, representa un evento mineralizador diferente de aquel que permitió la formación de la mena de hierro.

El último registro de actividad ígnea en el área, está indicado por los diques de composición intermedia y el cuerpo de brecha intrusiva, ubicado al oeste del yacimiento Cerro Imán, ambos emplazados con posterioridad al proceso de milonitización.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue financiado por los grants FONDECYT No. 91-1218 y SWESAREC 89-101. Los autores agradecen las facilidades otorgadas por el Departamento de Geología de la Universidad de Chile, Departamento de Ciencias Geológicas de la Universidad Católica del Norte y Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de Santiago de Chile, como así también las facilidades y apoyo otorgados por la Compañía Minera del Pacífico (CMP).

V. MaksaeV (Cambior Chile), M. Pincheira (Universidad de Concepción) y F. Camus (CODELCO), revisaron críticamente este trabajo formulando sugerencias que mejoraron la presentación del mismo. Los autores agradecen los comentarios y sugerencias de F. Hervé y J. Cembrado (Universidad de Chile). J. Oliva (Universidad de Chile), realizó las figuras e I. Aguilera las fotografías.

REFERENCIAS

- Aberg, G.; Aguirre, L.; Levi, B.; Nystrom, J. O. 1984. Spreading subsidence and generation of ensialic marginal basins: an example from the early Cretaceous of central Chile. In *Marginal Basin Geology: Volcanic and Associated Sedimentary and Tectonic Processes in Modern and Ancient Marginal Basins* (Kokelaar, B.P.; Howells, M.F.; editors). *Geological Society of London, Special Publication*, No. 16, p. 185-193.
- Alarcón, B. 1964. Depósito pirometasomático de magnetita-hematita de la mina Cerro Imán, Copiapó, Chile. Tesis (Inédito), *Universidad de Chile*, 69 p.
- Arévalo, C.; Mpodozis, C. 1991. Tectónica del Grupo Chañarcillo: Una faja de cabalgamientos con vergencia al oeste en el valle del Río Copiapó; Región de Atacama, Chile. In *Congreso Geológico Chileno, No. 6, Actas*, p. 81-83. Viña del Mar.
- Brown, M.; Díaz, F.; Grocott, J. 1993a. Displacement history of the Atacama fault system 25°00'S-27°00'S, northern Chile. *Geological Society of America, Bulletin*, Vol. 105, p. 1165-1174.
- Brown, M.; Dallmeyer, R. D.; Grocott, J. 1993b. Tectonic controls on Mesozoic arc magmatism in north Chile. *Andean Geodynamics. Second ISAG*, p. 167-170. Oxford.
- Corvalán, J. 1974. Estratigrafía de la región sur de Copiapó, Provincia de Atacama. *Revista Geológica de Chile*, No. 1, p. 13-36.
- Espinoza, S. 1979. Una hipótesis sobre la metalogénesis de la Franja Ferrífera Chilena. In *Congreso Geológico Chileno, No. 2, Actas*, Vol. 2, p. C1-C21.

- Espinoza, S. 1984. Dos perfiles por la franja milonítica de Atacama-Cocumbo y su alcance sobre la metalogénesis del hierro. *Universidad de Chile, Departamento de Geología, Comunicaciones*, No. 34, p. 75-81.
- Espinoza, S. 1990. The Atacama-Coquimbo Ferriferous Belt, Northern Chile. In *Stratabound ore deposits in the Andes* (Fonbcté, L.; Amstutz, G. C.; Cardoso, M.; Cedillo, E.; Frutos, J.; editors). *Springer-Verlag*, p. 353-364. Heidelberg, Berlin.
- Geijer, P. 1931. The iron ores of the Kiruna type. Geographical distribution, geological character, and origin. *Sveriges Geologiska Undersökning, Serie C 367*, 39 p.
- Henríquez, F.; Martín, R. F. 1978. Crystal-growth textures in magnetite flows and feeder dykes, El Laco, Chile. *Canadian Mineralogist*, Vol. 16, p. 581-589.
- Liou, J.B.; Kuniorsri, S.; Ito, K. 1974. Experimental studies of the phase relations between greenschist and amphibolite in a basaltic system. *American Journal of Science*, Vol. 274, p. 613-632.
- McNutt, R.H.; Crocket, J.H.; Clark, A.H.; Caelles, J.C.; Farrar, E.; Haynes, S.J.; Zentilli, M. 1975. Initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of plutonic and volcanic rocks of the Central Andes between latitudes 26° and 29° south. *Earth and Planetary Sciences Letters*, Vol. 27, p. 305-313.
- Moscoso, R.; Nasi, C.; Salinas, P. 1982. Hoja Vallenar y parte norte de La Serena, Regiones de Atacama y Coquimbo. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile*, No. 55, 100 p.
- Ruiz, C. 1943. Los yacimientos de hierro de la región nor-occidental de Copiapó, un tipo no descrito de yacimientos de contacto metamórfico. *Sociedad Nacional de Minería, Boletín Minero*, No. 552, p. 820-857.
- Ruiz, C.; Aguirre, L.; Corvalán, J.; Klohn, C.; Klohn, E.; Levi, B. 1965. Geología y yacimientos metalíferos de Chile. *Instituto de Investigaciones Geológicas*, 305 p. Santiago, Chile.
- Scheuber, E.; Andriessen, P. A. M. 1990. The kinematic and geodynamic significance of the Atacama fault zone, northern Chile. *Journal of Structural Geology*, Vol. 12, p. 243-257.
- Seegerstrom, K. 1968. Geología de las Hojas Copiapó y Ojos del Salado, Provincia de Atacama. *Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín*, No. 24, 58 p.
- Seegerstrom, K.; Ruiz, C. 1962. Cuadrángulo Copiapó. Provincia de Atacama. *Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile*, Vol. 3, No. 1, 115 p.
- Thiele, R.; Pincheira, M. 1987. Tectónica transpresiva y movimiento de desgaste en el segmento sur de la zona de Falla Atacama. *Revista Geológica de Chile*, No. 31, p. 77-94.
- Tilling, R. J. 1976. El Batolito Andino cerca de Copiapó, Provincia de Atacama, geología y petrología. *Revista Geológica de Chile*, No. 3, p. 1-24.
- Winkler, H.G.F. 1976. Petrogenesis of metamorphic rocks. Cuarta Edición, *Springer-Verlag*, 334 p. Heidelberg-Berlin.
- Zentilli, M. 1974. Geological evolution and metallogenetic relationship in the Andes of northern Chile between 26° and 29° lat. south. Ph.D. Thesis (Unpublished). *Queen's University*, 446 p. Kingston, Canada.