

**3-38** GEOLOGIA DE "MINA SUSANA".

"Un yacimiento novedoso en Carolina de Michilla"

\* Héctor Soto P.

\*\* Hans Dreyer P.

## R E S U M E N

En este trabajo se describe el yacimiento, cuya parte principal está localizada en el borde occidental de una columna de brechas, subvertical, de unos 120 a 150 m de diámetro y más de 350 m de profundidad. La franja mineralizada tiene más de 25 m de ancho y profundidad también sin determinar. La mineralización se restringe a la matriz de la brecha y consiste en una zona inferior con pirita-calcopirita y hematita que, hacia arriba, da paso a abundante calcosina-hematita y óxidos de cobre. La alteración de la roca consiste en albitización y cloritización con cantidades menores de cuarzo y sericita.

Un estudio de detalle permite concluir que se trata de una chimenea de brecha mineralizada (breccia pipe), de origen volcánico, cuya presencia en un área de mineralizaciones predominantemente mantiformes, es bastante novedosa.

## A B S T R A C T

This paper describes the orebody which main part is located along the western periphery of a nearly vertical column of brecciated rock with more than 350 m of depth and ranging from 120 to 150 m in diameter. The mineralization is restricted to the matrix of the breccia and is composed of a lower zone with pyrite-chalcopyrite and hematite and an upper part with abundant chalcocite-hematite. Hydrothermal alteration assemblages consists of albite-chlorite-quartz with minor sericite.

This mineralized breccia pipe structure is a new type of ore deposit in a district with abundant stratabound and/or vein type deposits.

\* Depto. de Geociencias, Universidad del Norte-Antofagasta.

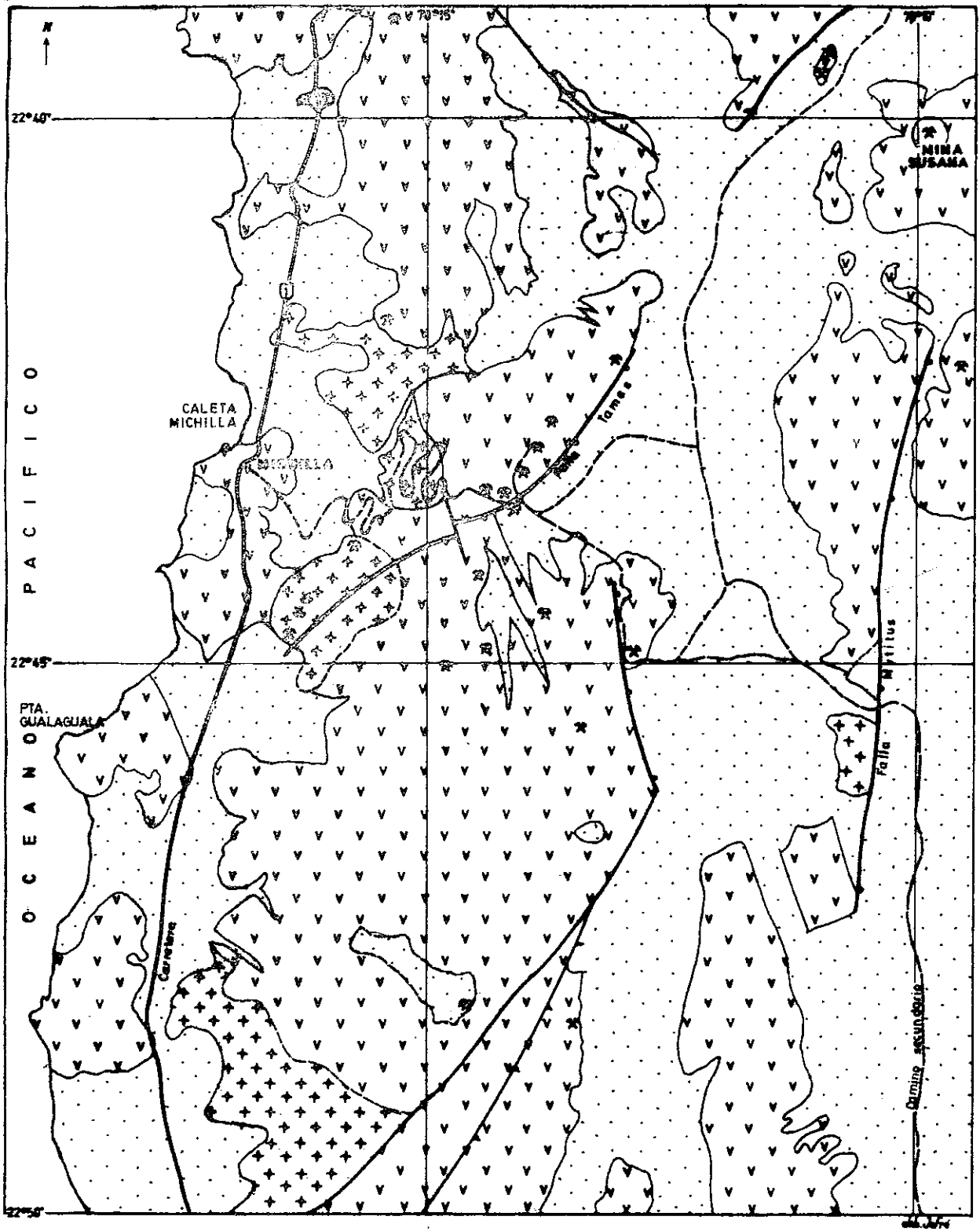
\*\* Compañía Minera Carolina de Michilla.

## INTRODUCCION

Las mineralizaciones que conforman el distrito minero "Carolina de Michilla", están situadas sobre los acantilados costeros de la Segunda Región, unos 110 km al norte de Antofagasta y esparcidas en un área de 15 por 30 km. Se accede al lugar viajando por la carretera costera N°1 que une los puertos de Antofagasta y Tocopilla. En el punto llamado Caleta Michilla, se encuentran la planta de lixiviación y el campamento base de "Compañía Minera Carolina de Michilla" empresa propietaria del distrito. Desde este lugar y enfilando hacia el este, se desprende un camino de tierra el que, trepando en zig zag por los acantilados, alcanza alturas variables entre 850 y 1100 m para unir - las diversas minas con la planta de beneficio. El mineral es transportado en camiones, un viaje mina-planta puede demorar entre 2 y 4 horas tiempo que depende de la ubicación del frente en explotación con respecto de la planta (Fig. 1).

Al igual como ha sucedido con otras mineralizaciones de oxidados de cobre aflorantes en el Desierto de Atacama, algunos lugares de este distrito han sido explotados desde épocas prehispánicas. La actividad minera documentada de escala industrial, se hizo presente a mediados del siglo pasado. Por regla general, las explotaciones se han limitado a extraer minerales desde la zona de oxidación de depósitos vetiformes, estratiformes y de formas irregulares. La presencia de - zonas de sulfuros, de indudable origen primario, sólo ha sido reconocida en los últimos años mediante sondeos.

Hasta la fecha, tanto por el interés histórico como por su producción, han destacado las siguientes operaciones: "Veta Carolina", comenzada a explotar en 1863 por Dn. José Santos Ossa, este nombre se conserva hoy para designar a todo el distrito; "Mina Juárez", yacimiento estratiforme cuya explotación comenzó en 1963, y fué la de mayor volumen hasta que, en 1979, se consolidó el desarrollo de "Mina Susana"



- |   |                    |   |                              |
|---|--------------------|---|------------------------------|
|  | Formación La Negra |  | Fallas                       |
|  | Botalito costero   |  | Principales minas del sector |
|  | Cubierta aluvial   |  | Caminos                      |

ESCALA 1:100.000

0 3 Km.

FIG N°1 MAPA DE UBICACION, DISTRITO CAROLINA DE MICHELLA

yacimiento que, hoy, es el más importante del distrito. De este último depósito se extrae el 90% de las 1700 toneladas que se envían diariamente a planta.

Las particularidades morfológicas y la geología de este yacimiento, que difieren de lo usualmente descrito para los yacimientos chilenos "tipo manto", constituyen el tema central de este artículo. La información que se entrega es producto de un trabajo geológico de detalle, iniciado en Marzo de 1983, y cuyos resultados, esperamos, sean una real contribución a los estudios que se realizan para esclarecer el origen, hasta ahora algo controversial, de estas mineralizaciones.

#### MARCO GEOLOGICO

En todo el distrito, y en Mina Susana en particular, los afloramientos suelen estar conformados por dos tipos litológicos básicos: rocas estratificadas volcánico sedimentarias y rocas intrusivas de diversas composiciones.

Las rocas estratificadas más importantes pertenecen a la "Formación La Negra" (GARCIA, 1967). Los afloramientos de esta unidad volcanoclástica están presentes en todo el litoral de la Segunda Región y constituyen, en gran medida, la roca huésped de las mineralizaciones cupríferas de la costa. En la zona de Michilla, suelen conformar potentes paquetes rocosos de rumbos y manteos variables, de colores grisáceos interrumpidos por sectores alterados de tonos marrones, castaños y blancos (Fig.1). La columna no ha sido descrita en detalle y, en consecuencia, poco es lo que se puede afirmar respecto del desarrollo del volcanismo y la sedimentación en esta cuenca. Varios trabajos, por lo regular de geología regional o de estudios de yacimientos, la describen como una sucesión de lavas andesíticas porfídicas, con sectores amigdaloidales, en intercalaciones con lavas basálticas, conglomerados, brechas volcanoclásticas, tobas, areniscas y niveles calcáreos.

Los niveles detríticos son más abundantes en el tercio inferior de la columna y, a veces, alcanzan espesores métricos. Los niveles calcáreos también están presentes en esta porción basal y contienen fósiles de pelecípodos y gasterópodos mal conservados (MAKSAEV Y MARINOVIC, 1980 y ASTUDILLO, 1983). Según se progresa hacia techo, la columna se caracteriza por el predominio de las lavas andesíticas con esporádicos, y mal documentados, episodios dacíticos y riolíticos; los niveles terrígenos se hacen muy escasos.

En las cercanías de Taital, la Formación aparece apoyada, mediante discordancia de erosión, sobre sedimentos marinos del Lías Inferior (ORTIZ Y OTROS, 1960); mientras que al sur de Antofagasta, en el sector del Way, se le observa subyaciendo, bajo discordancia angular, a sedimentos del Cretácico Inferior (ALARCON Y VERGARA, 1964). En este distrito, su límite inferior no está expuesto, mientras que el superior puede aparecer subyaciendo, discordantemente, a sedimentos cuaternarios marinos de la Formación Mejillones (FERRARIS Y DI BIASE, 1978) según se observa en la zona costera, o bien, directamente bajo materiales aluviales o coluviales, como es el caso de los afloramientos de las serranías interiores. Se le han estimado espesores variables entre - 3.500 y 10.000 m y, según varios autores, sus depósitos corresponden a un periodo de volcanismo desarrollado en un arco volcánico de margen continental, en cuyos inicios alternaron episodios de volcanismo y sedimentación marina de tipo somero, con sedimentación continental litoral. Posteriormente los depósitos se habrían vuelto predominantemente subáereo.

Desde el punto de vista regional y estratigráfico, no se ha observado ninguna clase de preferencia, por parte de las zonas de alteración, a instalarse en un nivel o niveles determinados de esta columna; por el contrario, las mineralizaciones, con excepción de algunos mantos, muestran definida relación espacial con elementos tales como estructuras y cuerpos intrusivos menores, muchos de ellos discordantes

con la estratificación.

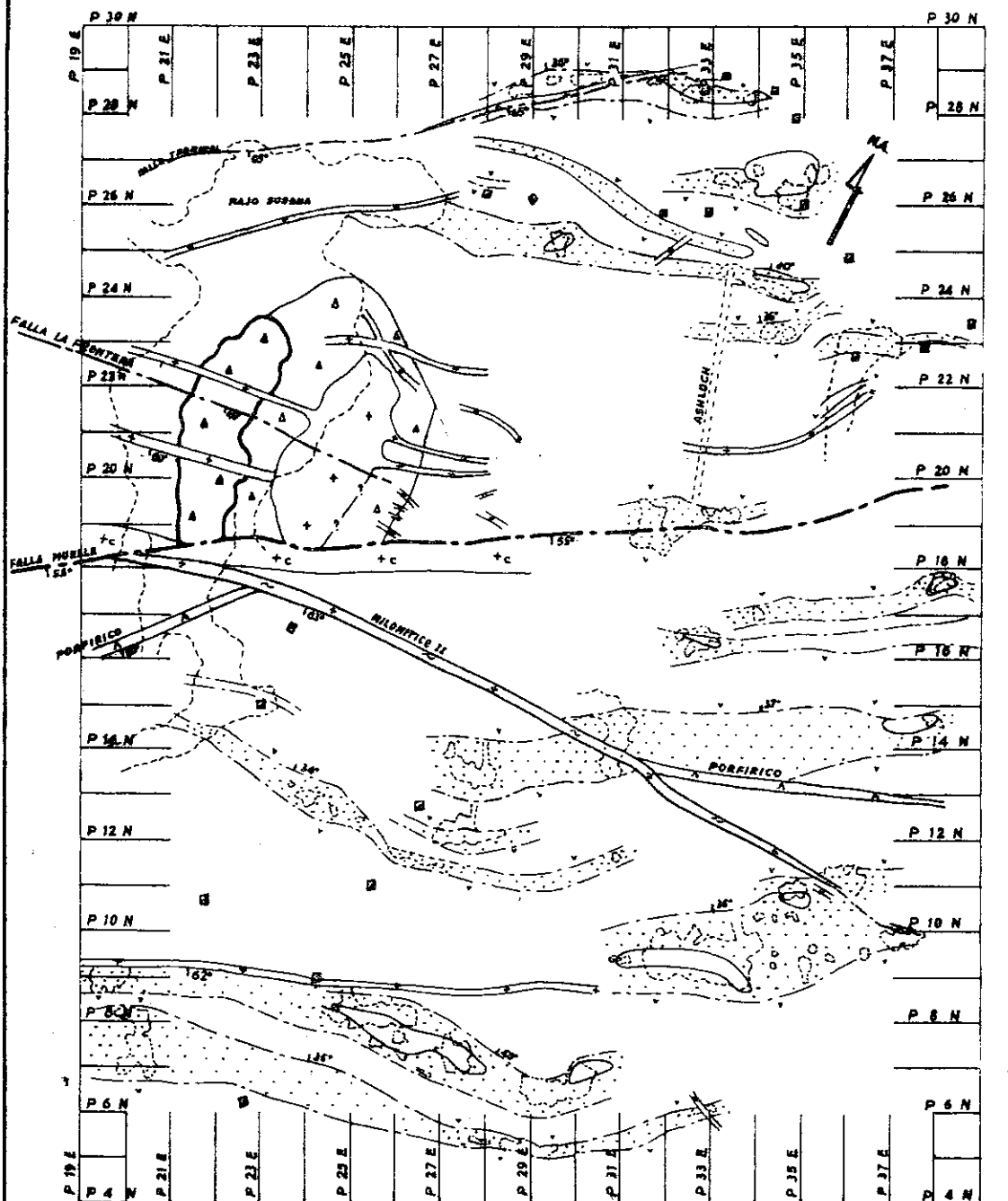
Las rocas intrusivas del área están pobremente estudiadas, los afloramientos más importantes se exponen en el sector costero, formando una faja elongada de dirección norte-sur (Fig.1). Son granodioritas y dioritas, de colores grises y grano medio a grueso, que intruyen a las lavas de la Formación La Negra, produciendo en ellas halos de silicificación (PALACIOS, 1974). Son la expresión local del llamado Batolito Costero y que, en la Cordillera de la Costa de la Segunda Región, está conformado por cuerpos plutónicos de variadas composiciones y edades radiométricas distribuidas entre el Jurásico Medio y el Cretácico Inferior, según diversas determinaciones. Suelen estar intruidos por cuerpos ácidos (PALACIOS y ESPINOZA, 1982) además, de una serie de cuerpos diquiformes e intrusivos menores cuyas relaciones de campo no están bien descritas. La disposición general de estos cuerpos en relación a las lavas jurásicas y el rango de edades que se ha definido, sugieren algún grado de continuidad en el proceso magmático que ha dado origen a estas rocas.

#### GEOLOGIA DE MINA SUSANA

La zona superior del yacimiento, predominantemente mantiforme, comenzó a ser explotada a comienzos de 1981, mediante el sistema de rajo abierto. En la primera mitad de 1983, y a través del levantamiento geológico de detalle, el Departamento de Geología de la empresa, definió la presencia de un cuerpo de rocas brechizadas, de posición subvertical y que contenía altas leyes minerales. Consecuentemente, el método de extracción a cielo abierto, fue reemplazado por un sistema de rampas en espiral que permite profundizar las labores alrededor del cuerpo mineral y extraerlo según distintos niveles de producción (Figs.2 y 3).

Adosadas al flanco occidental de esta columna de brechas

### MINA SUSANA BRECHA MINERALIZADA Y MANTOS



**LEYENDA**

- |    |                     |   |                                       |
|----|---------------------|---|---------------------------------------|
| ▲  | BRECHA MINERALIZADA | — | FALLA                                 |
| △  | BRECHA SECA         | ■ | LABOR                                 |
| +  | DIORITA             | ■ | MANTOS                                |
| +c | INTRUSIVO TIPO "C"  | □ | PIQUE                                 |
| v  | ANDESITA            | ○ | P 25 E - P 14 N PERFILES ESTE Y NORTE |
| A  | DIQUE PORFIRICO     | ○ | CUBIERTA LIXIVIADA                    |

0 25 50 75 m.  
ESCALA GRAFICA

FIG. 2

CIA. MINERA CAROLINA DE MICHELLA S.A.  
DEPARTAMENTO GEOLOGIA  
GEO. : H. DREYER P.  
DIB. : C. ENCALABA S.R. MARZO 1965  
MODIFICADO POR: S. ASTRODELLO - H. DREYER, AGOSTO 65

se presentan numerosas mineralizaciones mantiformes íntimamente asociadas a ella. Por otra parte, en el área existen numerosos mantos mineralizados y sus afloramientos, que en general siguen el rumbo N60E de las lavas, ocupan un área de 500 x 700 m aproximadamente. Las actuales operaciones de Mina Susana extraen minerales, indistintamente desde la brecha y sus mantos asociados, como desde las zonas mantiformes de los alrededores (ver Figs. 2 y 3).

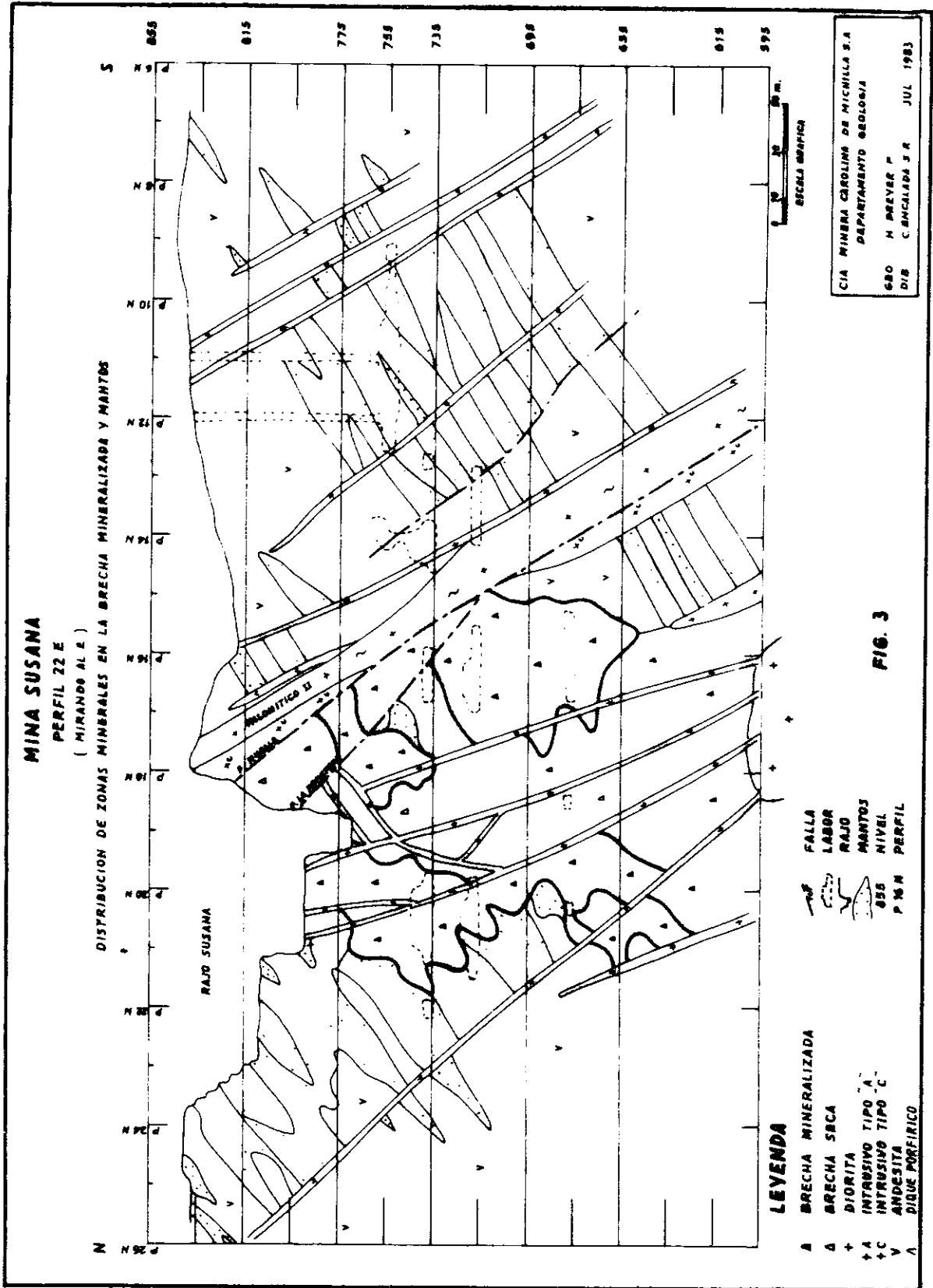
La presencia de este cuerpo de brechas, netamente discordante, en un distrito cuyas mineralizaciones han sido siempre descritas como mantiformes, su tamaño y profundidad; leyes medias y, por sobre todo, la detección de "zonas" de sulfuros primarios en algunos sondeos, hicieron aconsejable afinar el registro geológico durante la extracción del cuerpo, pues ésta se consideró una buena oportunidad para mejorar el conocimiento del depósito, usar este conocimiento en labores de exploración y, por último, contribuir al estudio del origen, hasta ahora incierto de estas mineralizaciones.

Los resultados iniciales de este estudio, aún en plena marcha, son verticales en este informe y nos indican que en la parte mejor conocida del yacimiento, se han reconocido tres tipos de brechas de origen ígneo y varios intrusivos de probable filiación subvolcánica. A continuación, se describen los caracteres básicos de los cuerpos más importantes.

#### BRECHA SUSANA

Es la brecha de mayor volumen y se presenta casi desprovista de mineralización útil, por este hecho también se le ha llamado - "Brecha Seca". Consiste en un cuerpo subvertical que, en planta, tiene apariencia circular aunque de contornos muy irregulares. Su diámetro supera los 130 m y su profundidad total, aún sin determinar, supera los 280 m. Alguna información de sondeos sugiere que esta parte in





ferior estaría ramificada. (Fig.3).

El eje principal de esta columna brechoide tiene buzamientos promedios entre 55 a 60° al Suroeste, produciendo sensación de perpendicularidad con respecto a la estratificación de las lavas. Su forma original se encuentra perturbada por numerosas intrusiones, entre las que destaca un cuerpo de composición gabroide que se ha instalado en la zona central de la columna, destruyendo gran parte de su estructura interna y produciendo efectos de alteración entre los que destaca un halo cálcico con gran desarrollo de plagioclasas en las matrices de las brechas. Esta situación ha obligado a describir a la Brecha Susana - por los caracteres que presenta en una zona semianular oriental pues, a su vez, en el flanco occidental de este anillo se ha emplazado una nueva brecha, llamada "Brecha Mineral" por contener la mineralización económica que ha sido fundamental para el desarrollo de Mina Susana (Figs.2 y 3).

De este modo, la estructura interna de la brecha se caracteriza por la presencia de clastos angulosos a subredondeados, de rocas volcánicas andesíticas insertas en un material interfragmental de la misma composición. Los tamaños de los clastos pueden variar desde finas partículas hasta bloques de más de 2 m de diámetro, se ha observado que hay una gradación de tamaños medios en la vertical, correspondiendo los tamaños mayores al aumento de la profundidad. En el hecho, los niveles inferiores de la mina (675 y 655) se caracterizan por exhibir abundantes megaclastos.

La brecha posee abundante material interfragmental el que, en ocasiones, supera el volumen de los clastos. Esta relación que es muy acentuada en los niveles superiores, produce la sensación de una textura "abierta"; es decir, cierto grado de separación entre los fragmentos, a esto se une un discreto nivel de "desorden" en la disposición de los fragmentos; en efecto, los hay que evidencian movimientos de ro

tación y traslación pues sus contornos, que no poseen halos de alteración, tienen pocas posibilidades de ajuste con los fragmentos vecinos. En algunos puntos, se han descrito verdaderas estructuras de "slumping" afectando matrices con texturas fluidales de aspecto ígneo. También se ha descrito, la presencia de "relictos" de planos de estratificación en absoluto desorden. Abundantes cavidades producidas por liberación de gases, surcan la roca y afectan, de preferencia, a la matriz de la brecha; sus diámetros alcanzan hasta unos 5 cm y en ocasiones son verdaderos conductos a través del material rocoso.

Según se progresa en profundidad, la textura de la brecha se hace más "cerrada" pues hay disminución de volumen en el material aglutinante, menor presencia de cavidades, aumento del tamaño medio de los clastos y menos desorden en su posición. En lo que concierne a los fragmentos algunos megaclastos presentes en el nivel 695 (fondo de la mina), muestran evidencias de haber sido desprendidos de la roca estratificada para formar parte de la brecha, ellas permanecen a corta distancia del contacto sugiriendo que en profundidad los movimientos de traslación de material han sido de menor magnitud que en la parte superior. Esta zona se caracteriza, además, por la disminución del número de cavidades y de la intensidad de los fenómenos de meteorización.

Los fragmentos son de origen andesítico e incluyen abundantes estructuras de brechas volcanoclásticas; en ocasiones, aparecen trozos de niveles de areniscas muy alterados. Se han encontrado fragmentos dioríticos, generalmente frescos y cuya presencia aumenta notoriamente hacia el contacto con un cuerpo intrusivo diorítico, localmente conocido como "Intrusivo C".

Los fragmentos andesíticos suelen ser de colores pardos - con algunos tintes rojizos, poseen texturas porfídicas caracterizadas por abundantes fenocristales euhedrales de plagioclasas y máficos de aspecto pulverulento. La masa fundamental es pilotaxítica a intersep

tal, la mayor parte de esta masa así como los fenocristales de máficos, se presentan parcial a totalmente alterados a actinolita, característica muy común en las lavas de la zona. Los clastos de mayores tamaños suelen poseer delgado halo limonítico, de probable origen meteórico. Mientras que los de menores tamaños pueden estar parcial a totalmente alterados (limonitizados), la intensidad de esta alteración suele ir en relación inversa al tamaño del fragmento.

La matriz, que se presenta alterada, está formada por un agregado de pequeños fragmentos de andesitas insertos en una masa de cuarzo criptocrystalino y minerales opacos (especularita fina). Posee una fuerte alteración arcillosa (caolín) y algo de clorita y epidota. Se ha observado cierto aumento de matriz con aspecto andesítico hacia la parte inferior de la columna. Estos dos últimos minerales pueden estar también presentes en fracturas de la brecha o tapizando las cavidades ya descritas. En forma ocasional aparecen pirita y calcopirita, coexistiendo con agregados de hematita y magnetita, las figuras 3 y 4 entregan una visión global de la forma de esta brecha.

Los episodios intrusivos que han afectado a la Brecha Susana alteraron su forma original la que, probablemente, poseía una sección horizontal de forma subpoligonal con bordes semi recto que tienden a curvarse en las intersecciones con otro borde. Esta disposición, consecuencia típica de la formación de fallas de colapso (Sheet Fractures) durante el desarrollo de una estructura del tipo "chimenea de brecha" (Breccia Pipe), es aún observable en el sector occidental, sin perturbar, de la columna. (Fig.2).

#### BRECHA MINERAL

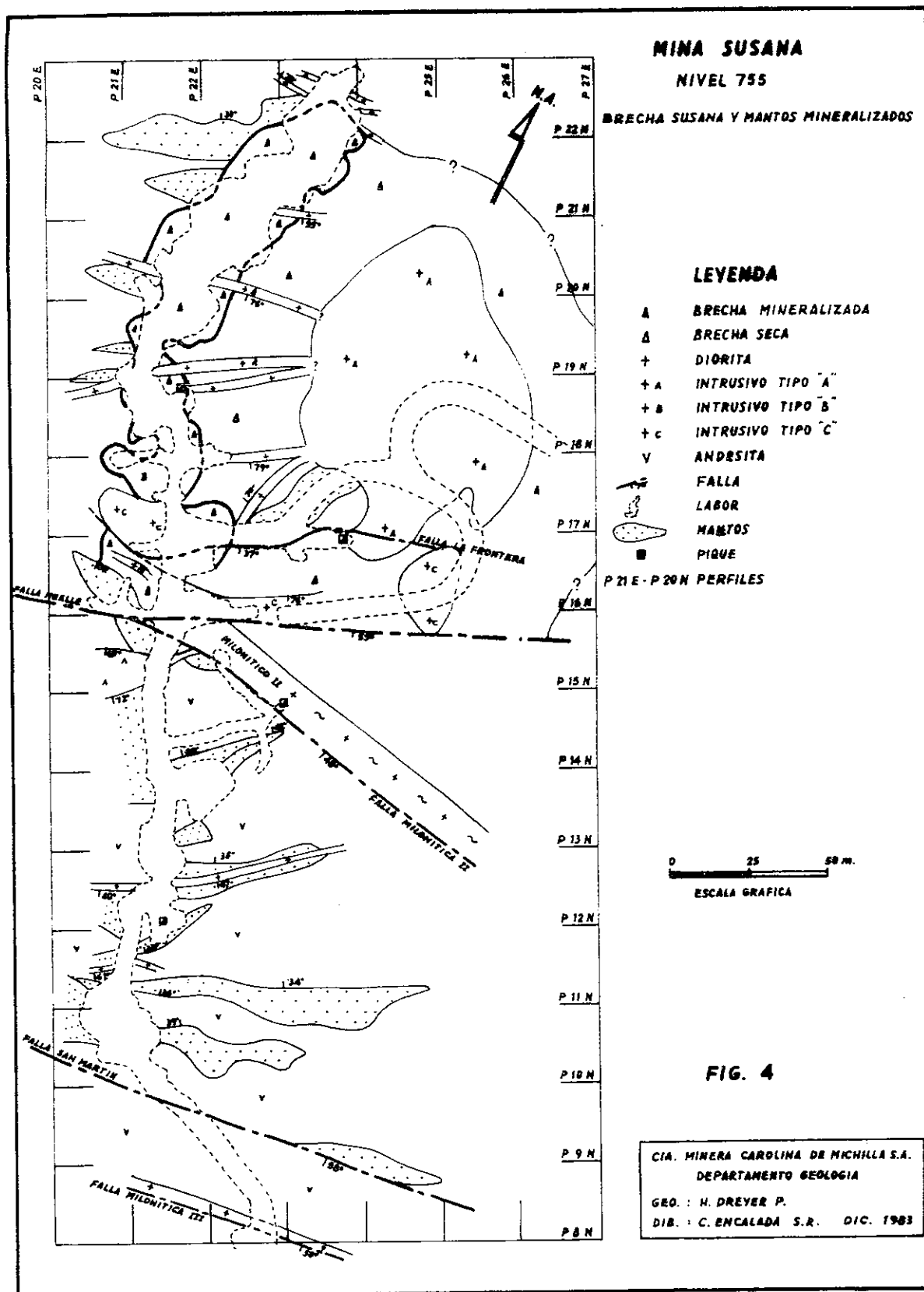
Como se indicó anteriormente, ocupa el flanco occidental de la columna de brechas y constituye el cuerpo de mayor importancia económica del área Susana.

Al igual que la Brecha Susana, su límite inferior, probablemente irregular y ramificado, está sin determinar; algunos sondeos la detectan a profundidades superiores a 300 m y entregan información que sugiere un desarrollo en forma de espiral envolvente sobre la periferie occidental de la brecha mayor. En sección horizontal muestra forma semianular con anchos variables entre 20 a 30 m; su desarrollo, semicircular, alcanza una extensión superior a los 170 m según su eje mayor.

Su estructura interna se caracteriza por la presencia de clastos, subredondeados a redondeados, de rocas andesíticas e intrusivas insertas en una matriz fina de la misma composición pero muy bien cementada con sulfuros de cobre y hierro.

La variabilidad de tamaños de los clastos es tan extensa como en la Brecha Susana, mientras que en la vertical continúa indicando aumento de diámetros hacia abajo. Sin embargo, a simple vista es posible observar un notorio aumento del número de fragmentos con diámetros entre 0,3 a 2 cm, esto ha sido confirmado mediante una estadística de frecuencias de tamaños en ambas brechas. Esta circunstancia le comunica una textura de apariencia más "cerrada", y a ello contribuyen la intensa alteración hidrotermal y supergénica de la brecha, además, del sellado de las cavidades gaseosas por los minerales agregados.

En general, las características básicas de esta brecha son idénticas a las de la Brecha Susana. La posible inyección de fluidos hidrotermales, a través de las zonas de contacto entre brechas y lavas, probablemente aprovechando planos de debilidad proveídos por fallas de colapso (Sheet fractures), ha causado modificaciones, tales como: nuevos fracturamientos, alteración y mineralización en una franja de unos 20 a 30 m de espesor, en el sector periférico de la Brecha Susana (Fig. 2 y 4). También, ha causado nueva mineralización en algunos niveles receptivos (por su permeabilidad) de las lavas; las estructuras aquí creadas han sido llamadas "Brechas Compuestas" y se describen más ade



lante. La intensidad de estos esfuerzos de deformación y ruptura han quedado evidenciados, en el caso de los clastos, por la producción de numerosas microfracturas que, entre otros efectos, suelen romper y desordenar cristales de plagioclasas; también se ha descrito la presencia de "megaclastos de Brecha Susana" formando parte de la Brecha Mineral (Brecha en Brecha). Esta intrusión ha quedado también reflejada en el tipo de contacto entre ambas brechas; en efecto, éste se caracteriza por numerosas digitaciones de la brecha mineralizada en la brecha estéril.

La mineralización de sulfuros de cobre y hierro se ha emplazado en la matriz de la nueva brecha, mostrando abundantes texturas de fluidez y disponiéndose alrededor de los fragmentos, tal y como si hubiesen sido inyectados a presión en un medio con algún estado de plasticidad; junto con ello, se ha producido una intensa corrosión química de esta matriz y de los clastos.

La alteración de los fragmentos es intensa, tanto que aquellos de diámetro inferior a 2 cm han sido totalmente obliterados. Sólo es posible describir la litología de los fragmentos mayores, los que indican una presencia mayoritaria de clastos andesíticos de colores pardo rojizos surcados por fracturas que contienen minerales de alteración y óxidos de cobre y hierro; su textura es generalmente porfídica con masa fundamental pilotaxítica a interseptal y, a veces, microfítica. Desarrollan halos de alteración de color gris rosáceo, cuyo espesor suele ser mayor en profundidad, indicando mayor intensidad de los procesos. A nivel microscópico se ha determinado que este halo de alteración es producto de una albitización, dada por la presencia de finos cúmulos de albita acompañada por finos agregados de cuarzo; en algunos casos se suman a esta albitización la presencia de sericita en cúmulos radiales. Del mismo modo, algunos fenocristales de plagioclasas y de máficos se presentan sericitizadas. Tal y como se observó en la Brecha Susana, algunos clastos de roca diorítica han sido encontrados bajo el nivel

790 y muy cerca del contacto con el Intrusivo "C". Esta unidad está afectada por una cáscara de alteración, como será descrita más adelante.

En general, es muy común observar un teñido hematítico de los clastos, especialmente en los niveles superiores y ellos nos inducen a pensar que este teñido es de origen meteórico.

Como se dijo, la matriz está compuesta por sulfuros de cobre y hierro así como minerales de alteración. En profundidad se compone de pirita finamente diseminada con menor contenido de calcopirita y esporádica bornita. En estas zonas piritosas se ha observado presencia de alteración clorítica-sericítica en la matriz agregada a los fenómenos de albitización. Aunque no ha sido posible efectuar un estudio detallado de la zonación horizontal y vertical de estas alteraciones, es posible suponer, por la observación de terreno, que la albitización es un fenómeno presente a lo largo de toda la zona central de la brecha, mientras que la clorita y sericita aumentan en profundidad y hacia la periferia, en todas éstas zonas de alteración abundan los óxidos de hierro.

La instalación de la brecha hidrotermal, ha creado un halo de specularita que sobrepasa, en unos 10 a 15 m, el límite de ella. Esta es una zona muy útil para la explotación, pues cuando las labores de los mineros avanzan desde el estéril hacia la brecha mineralizada, la presencia de esta zona con abundante specularita suele indicar la proximidad a la mena. (Figs. 3 y 4).

#### BRECHAS COMPUESTAS

Son, como su nombre lo indica, estructuras producidas por combinación de fenómenos de autobrechización, en niveles de lavas e introducción de fluidos hidrotermales aprovechando estos horizontes



permeables.

Una serie de mantos mineralizados, íntimamente asociados a la columna de brechas, son aquellos que nacen desde el flanco occidental de la brecha mineralizada (Figs.2 y 4), para extenderse con rumbo e inclinación coincidente con la tendencia distrital. Esta circunstancia ha permitido que estén siendo explotados en conjunto con la brecha; esto ha proveído buenas oportunidades para observar su estructura interna. Sus zonas de contacto con la brecha suelen tener apariencia similar a ésta, sin embargo, algunos nivelillos de yeso introducidos según la estratificación relictas, suelen ayudar a reconocerlos. En este caso, el manto presenta una estructura totalmente caótica en la que se observan clastos de roca brechosa, completamente alterados, y rodeados de una matriz, también lávica, pero sometida a una intensa corrosión química. Según nos alejamos de la "Brecha Mineral" esta intensa perturbación comienza a decrecer y la estructura se caracteriza por megaclastos de lavas, todavía alterados, y menor cantidad de material interfragmental. En forma gradual se arriba a zonas de fracturamientos con franco decrecimiento de la alteración y mineralización, finalmente el manto se agota por acuñamiento en la horizontal. Cerca de la brecha, la matriz y las cavidades de la lava están muy bien mineralizadas con calcosina pulverulenta mezclada con óxidos de cobre y de hierro, estas zonas entregan excelentes leyes de cobre, mayores que los otros mantos del área; al alejarse de las brechas, comienzan a predominar óxidos de cobre de tipo atacamita y crisocola. Este desarrollo rara vez supera los 30 m en la horizontal.

#### ROCAS INTRUSIVAS

Como ya se ha dicho, las rocas intrusivas de la costa de la Segunda Región, están pobremente estudiadas. Mina Susana y el distrito no escapan a este hecho. Sin embargo, con el avance de la mina se han ido describiendo algunas facies que, por el momento, no tienen equi

valentes a nivel regional, por lo tanto, poco es lo que se puede hacer para situar a estas facies locales en el contexto de las rocas intrusivas regionales.

#### INTRUSIVOS MICRODIORITICOS

Se agrupan bajo esta denominación varios tipos de rocas dioríticas, de grano fino que, en superficie, suelen aflorar como diques de diversos espesores, probables sills, y cuerpos irregulares de diversos tamaños; sus texturas varían de equigranular a porfídica, el avance de la mina ha permitido definirle, en los sectores bajo la brecha, características de alteración y mineralización que se describen a continuación.

Bajo el microscopio se presenta como una diorita de piroxeno, con abundantes plagioclasas que, en la mina, tienen aspecto pulverulento pues están alteradas a sericita y/o mineral de arcilla, posee clinopiroxenos (augita) cloritizadas. Cuando es porfídica, la masa fundamental es aproximadamente intersticial y está compuesta por arreglos pseudo ofíticos de plagioclasa, también pulverulenta, masas de albita y feldespatos de potasio (?), esta alteración va acompañada de abundante material metálico (Magnetita-Hematita) en vetillas y diseminación además, de clorita en grietas y cavidades. En profundidad, tanto las labores como los sondeos indican que tiene tendencia a adquirir formas de stock, introducido en sistemas de fallas E-W y N-W, se le ha reconocido casi un kilómetro de extensión en estas estructuras profundas. Al microscopio las muestras de estos sectores evidencian abundantes efectos de cataclasis, consistentes en un intenso microfracturamiento que suele romper y desordenar las plagioclasas. Las vetillas de Hematita-Magnetita aumentan y los bordes de estas grietecillas polidireccionales, suelen mostrar halos de feldespato sódico sugiriendo un incipiente metasomatismo alcalino. En forma local, los óxidos de hierro pueden llegar a constituir más del 3%, en volumen, de la roca. A

la fecha, no se han reconocido sulfuros en esta unidad, cuyo nombre local es "Intrusivo C".

Una facies diorítica más fina, pero seguramente relacionada con este stock, irrumpe hacia arriba, a través de las brechas, en forma de enjambre de diques cuyo desarrollo dicotómico respeta, casi a la perfección, los límites de la Brecha Mineral (ver figs. 3 y 4). Esta probable facies tardía del stock, llamado "Intrusivo B", es claramente posterior a la brecha y posee numerosos amígdalas rellenas de clorita y calcita.

En lo concerniente al stock "C", su posición coincidente, en la vertical, con la columna de brechas mineralizadas, el débil grado de alteración que presenta hacia los contactos con ella y su mineralización en óxidos de hierro, hicieron aconsejable examinar las posibilidades que hubiese tenido alguna participación en el proceso mineralizador de la brecha. Para ello, se mapearon cuidadosamente algunos contactos con las lavas en zonas mineralizadas y estériles. Los resultados de este trabajo indicaron zonas de alteración térmica, en la roca de caja estéril, debido a la intrusión provocando alguna apariencia córnea en la lava; bajo el microscopio, se encontraron algunas pequeñas inclusiones de lavas alteradas. Junto a ello, un muestreo realizado indicó anomalías de cobre, hasta 2500 ppm, sólo en la zona de contacto; mientras que hacia afuera el intrusivo es totalmente fresco y con contenidos normales de cobre. Estos hechos, unido a la total ausencia de sulfuros de cobre, su débil metasomatismo sódico y la presencia de clastos dioríticos en la brecha, nos hacen pensar que esta roca es anterior o contemporánea a la mineralización. Muchas de estas dudas se resolverán cuando se conozcan mejor sus relaciones con el límite inferior de la Brecha Mineral.

#### INTRUSIVO "A"

Es un cuerpo de aspecto porfídico y de composición gábrica

que se encuentra emplazado en el centro de la columna de brechas y, al igual que ésta, posee una sección irregular con tendencia circular y diámetros variables entre 30 a  $\pm$  60 m, medidos en las zonas superiores de la mina. Hacia abajo muestra tendencia a engrosar y según sus exposiciones en labores y sondeos profundos del área Susana y alrededores, parece convertirse en un gran cuerpo (¿o cuerpos?) con variaciones texturales; sus probables digitaciones afloran en superficie aprovechando todo plano de debilidad como en el caso de Brecha Susana (fig.5). En efecto, recientes levantamientos de detalle, hecho en varios prospectos cercanos a Susana, coinciden en detectar numerosos cuerpos dioríticos y/o gábricos, además de andesitas, emplazadas en forma de diques, pequeños sills o en masas irregulares de mayores tamaños. Afloran indistintamente en zonas mineralizadas o completamente estériles. Sus relaciones temporales son complejas, con excepción de los diques andesíticos y dacíticos que son tardíos, pues suelen cortar a todos los demás.

DEFINIS, 1980; PALACIOS y DEFINIS, 1981; definen al cuerpo gábrico presente en las mineralizaciones de Buena Esperanza y Susana como un cuello volcánico, cuyo quimismo y mineralogía, le otorgan un parentesco magmático con las lavas.

En el caso de Susana, los levantamientos geológicos indican que el cuerpo posee relaciones tajantes con la Brecha Susana e incluso, en algunos lugares, se ha introducido según planos de fracturas curvas y algo concéntricas en relación a la periferia de la brecha. Sus bordes externos son bastante más porfídicos que en el centro y poseen - abundantes inclusiones de andesitas semi asimiladas, tiene gran cantidad de plagioclasas y augita y le rodea un halo de alteración en donde predominan: calcita, epidota, clorita, etc. No está en contacto con la brecha mineralizada y es totalmente fresco; algunos cuerpos menores que, aparentemente, emergen desde él, cortan a la mineralización. Actualmente se trabaja en establecer sus relaciones temporales con los intrusivos tipo "B" y "C", y todo tiende a indicar que es posterior a ellos.

Cabe mencionar que en la Mina Buena Esperanza, el cuerpo gábrico descrito por PALACIOS Y DEFINIS (op.cit.), es también de apariencia fresca y atraviesa el yacimiento en sentido vertical, a través de las lavas mineralizadas, para continuar hacia arriba y aflorar en la superficie, a 250 m sobre el yacimiento, conservando su frescura y falta de mineralización. (ESPINOZA, 1982). Podemos agregar que tampoco se observan señales evidentes de alteración en superficie.

## ESTRUCTURAS

Las zonas de fallas, son elementos muy importantes en el control de las mineralizaciones en el distrito; prácticamente todos los depósitos discordantes de mayor tamaño, están asociados a zonas estructurales de gran desarrollo y con claros indicios de actividad pre y post mineral, indicada por la presencia de rocas tectonizadas en sus cajas, además de las intensas deformaciones que se observan en las rocas intrusivas que se han emplazado en su interior.

En Susana destaca un sistema de dirección ENE a EW, cuyas estructuras más importantes son: la Falla Muelle, de dirección N55°E con manteos entre 50° y 60° al SE que corta y desplaza a una estructura de dirección E-W, la cual contiene un dique, de unos 12 m de ancho, completamente tectonizado; localmente se les llama "Diques Miloníticos".(Fig.2). Al sur de esta zona estructural, las mineralizaciones son mantiformes mientras que al norte, en el yacente, se encuentra la brecha (figs. 2 y 3). Esta situación sugiere que tanto esta estructura como otra parecida, situada más al sur (Milonítico III, ver fig.2); hayan jugado un papel importante no sólo en la formación del depósito sino que sus movimientos post-minerales hayan desplazado bloques mineralizados tanto en la horizontal como en la vertical. En este último caso, la figura N°3 nos muestra con claridad los desplazamientos que han sufrido los mantos al sur de la Falla Muelle, así como la posibilidad de que movimientos combinados de bloques hayan -

expuesto a la Brecha Susana como lo sugieren las características de su columna mineralizada, que se describe a continuación.

## MINERALIZACION

La figura 5 muestra la distribución vertical de la mineralización en la Brecha Mineral. Esta se localiza en la matriz de la brecha, los clastos son estériles y se mineralizan, ocasionalmente, en óxidos de cobre y hierro a través de fracturas y cavidades.

La columna comienza con una zona, de 98 m de espesor, con predominio de óxidos de cobre (atacamita-crisocola) y de hierro (limonitas y hematita); hay ocasionales ocurrencias de calcosina (-covelina) siempre cubiertas por hematita roja. Hacia abajo, y hasta los 229 m, se extiende la "zona de mixtos". Aquí, la calcosina gris pulverulenta o acerada, muestra un progresivo aumento en profundidad hasta igualar, e incluso superar, el contenido de óxidos de cobre. Esta circunstancia produce zonas con leyes superiores a 5% de cobre total, como es el caso de los niveles 735 a 655 (ver figura 5).

Finalmente, y a través de una pequeña zona de 6 m de espesor, con neto predominio de calcosina acerada y covelina, se alcanza una zona primaria con presencia exclusiva de pirita y calcopirita en proporciones variables. El límite inferior de esta zona no es bien conocido, pues sólo unos pocos sondeos penetran hasta ella. Uno de estos sondeos es con recuperación de testigos y, en estos testigos, es posible observar la mineralización de pirita-calcopirita (acompañada por clorita y specularita) dispuesta en finos granos insertos en la matriz. En algunos casos, los minerales dan la impresión de fluir a través de una matriz muy corroída, y dar lugar a estructuras pseudo concéntricas alrededor de los fragmentos, éstos últimos se muestran completamente estériles. Como se ha dicho, el conocimiento de esta zona es aún parcial y se ignora si es representativa de la mineralización

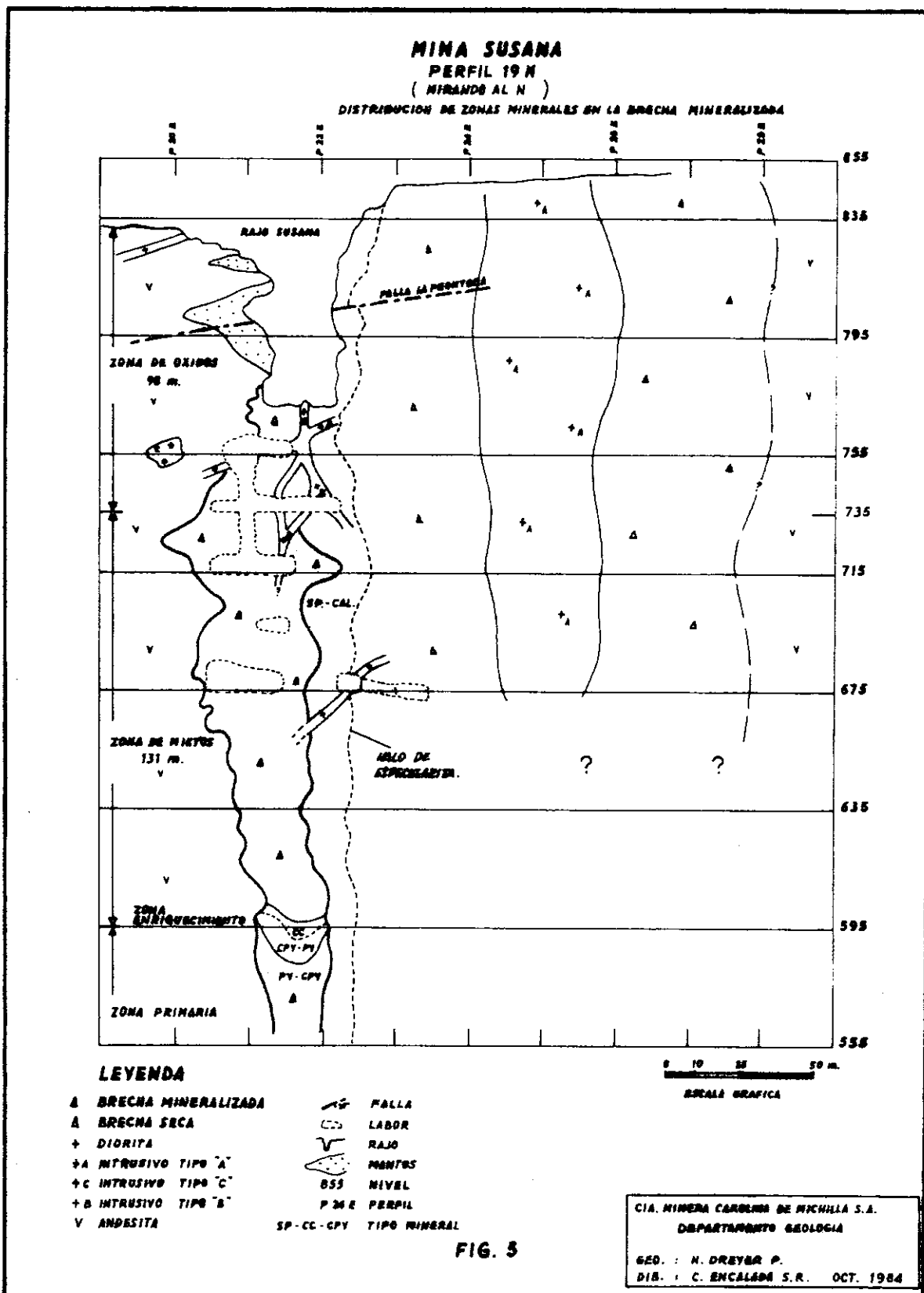


FIG. 5

primaria del área.

Un estudio calcográfico, realizado en la vertical, muestra regular abundancia de texturas de enriquecimiento secundario, especialmente en la zona de mixtos. Si bien, es posible que gran parte de la calcosina presente pueda provenir de procesos de lixiviación hipógena de sulfuros primarios, según se ha descrito en otros yacimientos chilenos de este tipo; tanto las leyes medias, como las texturas mencionadas indican un incuestionable grado de enriquecimiento secundario para esta columna.

Por otra parte, las asociaciones de bornita-digenita (calcosina)-calcopirita en vesículas y fracturas de lavas, tan comunes en los yacimientos chilenos tipo manto; hasta donde sabemos, son realmente escasas en Michilla. En efecto, aparte de lo ya descrito en la Brecha Susana, otro lugar en donde se conoce mineralización primaria es la "Punta Guala Guala", sector costero situado unos 8 km al sur de Planta Michilla. Aquí, se exponen andesitas alteradas y mineralizadas con abundante pirita (menor calcopirita), en granos aislados y como gruesos rellenos de cavidades, esta vez con cuarzo opalino; también se presentan algunos nivelillos de areniscas con pirita en diseminación o depositada en fracturas discordantes con la estratificación. Al igual que en las zonas inferiores de Brecha Susana, aquí también predomina un primario compuesto por abundante pirita y menor calcopirita. No obstante, se debe establecer que, en general, las zonas profundas del distrito son poco conocidas.

En lo que respecta a la mineralización de plata, análisis de compuestos y determinaciones en microsonda, indican que está ligada a los sulfuros y que su presencia aumenta en las zonas enriquecidas superiores, en íntima asociación con calcosina.



## CONCLUSIONES

La presencia de cuerpos brechosos, discordantes y mineralizados, en los yacimientos volcanogénicos de Chile, es un hecho común. Se les ha mencionado en varios trabajos aunque, por desgracia, rara vez descrito en detalle. Los escasos antecedentes publicados sugieren que se trata de estructuras mas bien pequeñas e irregulares, asociadas a procesos tectónicos (?) que no están bien documentados.

Brecha Susana posee caracteres de forma, tamaño y estructura interna que la hacen diferir de las descripciones conocidas. Su forma semicircular en planta, y su gran desarrollo en la vertical, le asemejan a una gran perforación abierta a través de las rocas estratificadas, por procesos internos de cierta presión y dinámica. La estructura interna de esta columna de brechas muestra particularidades que refuerzan esta impresión. En efecto; en sentido vertical, se destacan: una zona inferior en la que predominan matrices ígneas de aspecto andesítico aglutinando clastos, generalmente de gran tamaño, con pocas evidencias de rotación o traslado; hacia arriba, y de manera gradual, se ingresa a zonas en que predominan matrices sedimentarias compuestas por fragmentos y polvo de roca andesítica, algo de ceniza volcánica, cuarzo fino y specularita, cementando clastos de gran diversidad de tamaño y con mayor desorden; este sector suele mostrar un gran volumen de huecos de origen gaseoso y presencia de estructuras de colapso en y alrededor de la columna. (Ver Fig.2). Junto a ello, en planta, se observa cierta tendencia de los clastos mayores a concentrarse hacia la periferia de la columna. En general, esta disposición interna sugiere que su formación es consecuencia de un proceso magmático local el que, probablemente, comenzó con la instalación de un magma, rico en gases, en fracturas de las capas superiores y a profundidad somera. Allí, el relajamiento súbito de la presión confinada de este magma, pudo haber dado lugar a explosiones con carga de gases y ceniza volcánica que irrumpe a través de las fisuras arrancando fragmentos de las paredes.

A medida que el conducto es ensanchado, los fragmentos arrancados son mayores, se producen fracturas de colapso, como las que hoy se observan limitando al cuerpo en su flanco oriental (Fig.2), y la corriente de gas y polvo circular hacia arriba. De este modo, el ambiente puede haberse convertido, en forma gradual, en un sistema convectivo similar a aquellos que se han descrito en otros ambientes volcánicos, con una parte central que expelle gases, partículas de roca y ceniza; mientras que los fragmentos mayores, especialmente aquellos arrancados de los muros, tienden a deslizar hacia abajo. El proceso no parece haber sido de gran violencia explosiva y, quizás, en alguna medida confinado; así lo indican los siguientes hechos: escasa presencia de material piroclástico - propiamente tal, el discreto nivel de desorden de los fragmentos y, sobre todo, las relaciones de terreno que muestran continuidad de la secuencia volcánica sobre la brecha. El resultado final de este proceso es un conducto volcánico con relleno fragmental (breccia pipe) con zonas inferiores que exhiben predominio de brechas intrusivas cuya matriz andesítica aglutina clastos de andesitas y menor cantidad de clastos - dioríticos. Hacia arriba, el conducto posee estructura interna diatremática con predominio de matrices sedimentarias.

La estructura descrita es posterior a la instalación de algunos cuerpos intrusivos de carácter subvolcánico como lo prueban los clastos dioríticos ya mencionados; y, a su vez, es claramente pre-mineral pues, hasta donde sabemos, las brechas hidrotermalmente alteradas y mineralizadas se restringen a zonas periféricas de la columna; sus contactos con las volcanitas y, especialmente con la brecha estéril, consisten en claras digitaciones de carácter intrusivo. Los clastos de ambas brechas son totalmente "estériles" y, en la Brecha Mineral, una intensa alteración hidrotermal, producida por probables aportes fumarólicos, afecta a la matriz sedimentaria corroyéndola y creando halos de alteración sobre los clastos; se depositan albita-clorita-sericita y cuarzo acompañadas por sulfuros de cobre y hierro. El proceso mineralizador parece haber culminado con una intensa depositación de hie-

ro y sílice cuyos testimonios más visibles son: gran cantidad de especularita que rellena todas las cavidades de la brecha mineralizada e incluso crea un halo alrededor de esta brecha (ver Fig.5); la presencia esporádica e irregular de estructuras jasperoides, teñidas con óxido de hierro, que suelen aflorar en estricta relación espacial con las zonas brechoides del sector Susana y los sectores Gambeta y Desierto, situadas en las cercanías. Estas estructuras conservan excelentes ejemplos de mineralización sulfurada de cobre-hierro (bornita-calcopirita-digenita).

En la actualidad se efectúan estudios mineralógicos y geoquímicos, mediante muestreos apropiados, con el fin de caracterizar los fenómenos aquí descritos.

Los clastos de roca diorítica que se encuentran en el interior de la brecha mineralizada, al igual que los clastos andesíticos, son totalmente frescos y estériles; por sí mismo no constituyen evidencia suficiente para sostener participación de procesos intrusivos en la mineralización. Sin embargo, indican que, en este ambiente volcánico en el que abundan evidencias de mineralización muy cercana al singenetismo propiamente tal, semejante a lo ya descrito por RUIZ y OTROS(1981) y SILLITOE (1977); también han existido periodos mineralizadores netamente posteriores a la depositación de las lavas, e incluso a la instalación de cuerpos intrusivos. Las mineralizaciones discordantes, especialmente vetiformes, son muy abundantes en Michilla y es común observar rocas de caja tectónicamente brechizadas y con intensa alteración hidrotermal muy localizada a lo largo de la fractura.

Con excepción de los clastos ya mencionados, las rocas intrusivas del área Susana son claramente post-minerales pues, se presentan totalmente frescas, introduciéndose en toda zona de debilidad existente y, en muchos casos, surcando a través de zonas previamente minaralizadas. Las evidencias de campo indican que los procesos que han da-

do origen a la mineralización de Brecha Susana y a la instalación de las rocas intrusivas son relativamente cercanos en el tiempo. La profundización de la mina entregará mayores antecedentes respecto de las relaciones entre ambos y con las restantes unidades intrusivas del distrito.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Gerencia de Operaciones de la Compañía Minera Carolina de Michilla S.A., la autorización otorgada a la presente publicación. Este trabajo ha sido respaldado por un Grant de investigación en Geología Económica, otorgado por la Universidad del Norte. Los estudios de laboratorio han sido realizados en el Departamento de Geociencias de esta Universidad y, en ellos, colaboraron los geólogos Sres. Raúl Venegas C. y Oscar Rodríguez C. a quienes se agradece cumplidamente.

## REFERENCIAS

- ALARCON, B. y VERGARA, M., 1964. Nuevos antecedentes de la geología de la Quebrada El Way. Bol. Inst. Geología. U. de Chile.
- ASTUDILLO, O., 1983. Geología y Metalogénesis del distrito minero Carolina de Michilla, Antofagasta, II Región. Chile. Memoria U. del Norte. Antofagasta.
- DEFINIS, A., 1980. Petrología, Alteración y Metalogénesis del intrusivo básico Buena Esperanza, Tocopilla, II Región, Chile. Memoria U. del Norte. Antofagasta.
- ESPINOZA, S., 1982. Definición del tipo "Diseminado Infravolcánico de Sulfuros de Cobre. Actas III Cong. Geol. Chileno, Concepción. Chile.
- FERRARIS, F. y DI BIASE, F., 1978. Hoja Antofagasta. Carta Geológica de Chile. Esc. 1:250.000. Inst. Invest. Geol., N°30.
- GARCIA, F., 1967. Geología del Norte Grande de Chile. Simposium sobre el Geosinclinal Andino. Soc. Geol. de Chile, N°3.
- MAKSAEV, V. y MARINOVIC, N., 1980. Geología de los cuadrángulos Cerro de la Mica; Quillagua; Cerro Posada y Oficina Prosperidad. Región de Antofagasta. Carta Geológica de Chile N°45-48. Esc. 1:50.000. Inst. Inv. Geol. Santiago.
- ORTIZ, F. y OTROS, 1960. Geología y Estratigrafía del área Chañaral-Taltal. Inst. Inv. Geol. N°30.
- PALACIOS, C., 1974. Geología y Metalogénesis de la Formación volcánica La Negra y las rocas graníticas en el área de Tocopilla. Provincia de Antofagasta. Depto. Geología, Univ. de Chile.
- PALACIOS, C. y DEFINIS, A., 1981. Geología del yacimiento estratiforme Susana, Distrito Michilla, Antofagasta. Actas 1er. Coloquio sobre Volcanismo y Metalogénesis. Depto. de Geociencias, Univ. del Norte.
- PALACIOS, C. y ESPINOZA, S., 1982. Geología y Petrología del complejo plutónico de la Cordillera de la Costa, entre Tocopilla y el Río Loa. 3er. Cong. Geol. Chileno, Concepción, Chile.
- RUIZ, C. y OTROS, 1971. Strata-bound copper sulphide deposits of Chile. Soc. Mining Geol. Japan. Spec. Issue 3.
- SILLITOE, R., 1977. Metallic mineralization affiliated to subaerial volcanism in "Volcanic processes in Ore Genesis". London Inst. Mining Metallurgy.