



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DE MINA CARMEN,  
REGIÓN DE ATACAMA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA**

**PATRICIA ALEJANDRA GÁLVEZ SOTO**

**PROFESORA GUÍA  
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA  
MARISOL LARA CASTILLO**

**SANTIAGO DE CHILE  
2013**

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE:** Geóloga  
**POR:** Patricia Alejandra Gálvez Soto  
**FECHA:** Octubre de 2013  
**PROFESOR GUÍA:** Sofía Rebolledo Lemus

## **CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DE MINA CARMEN, REGIÓN DE ATACAMA**

El presente estudio consiste en la caracterización del macizo rocoso en Mina Carmen, depósito de hierro ubicado en la Tercera Región de Atacama

Para ello se levantó la litología y fallas locales, elaborándose también ventanas geotécnicas y registro de sondajes geotécnicos. Esto se hizo en las galerías subterráneas existentes, y los sectores accesibles del rajo Carmen. Posteriormente se analizaron los datos recogidos; se distinguieron estructuras destacadas, se definieron dominios estructurales, se caracterizó el macizo rocoso y se sugirió un posible reforzamiento, obteniéndose los siguientes resultados

Mina Carmen presenta cuatro unidades litológicas: andesitas, brechas hidrotermales, diorita y diques. Predominan la alteración calcosódica, cloritización y argilización. La mineralización corresponde a una veta de hierro masivo con hierro semimasivo en los sectores distales. Se reconocen dos estructuras principales EW y NNE, las que controlan la mineralización; también se identifican nueve fallas importantes, con orientaciones EW, NW y NE.

Se definen seis dominios estructurales, separados por fallas principales o importantes; también se usaron contactos litológicos como límites. En general los sistemas preferenciales de estructuras son EW y NW, identificándose tanto a nivel de dominio estructural como de depósito.

El macizo rocoso en general tiene bloques tamaño medio (3-10 ff /m<sup>3</sup>). Presenta calidad que varía entre mala (4A) y Regular (3A) de acuerdo a RMR de Laubscher, predominando la roca regular (3A); según Q de Barton el macizo califica en su mayor parte como roca Mala, variando entre roca Mala y Media (1,13-5,63). La calidad media de la roca no varía mayormente entre dominios, hay diferencias entre tipo de roca, destacando Hierro masivo y semimasivo con la mejor calidad se acuerdo a RMR<sub>L</sub>.

Finalmente se sugiere sostenimiento en las galerías subterráneas por medio de Q de Barton, el que consiste principalmente en mantenimiento y acuñadura sistemática; En cinco sectores se recomienda reforzamiento con pernos sistemáticos de 2m de largo, separados por 2,5m, con shotcrete proyectado de espesor 40-100mm; estas zonas coinciden con los túneles de mayores dimensiones.

## **DEDICATORIA**

**A Madre, Padre y Hermanas.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Son varias las personas que han hecho posible este trabajo y a quienes quiero agradecer.

Primero, gracias a Marisol Filgueira y George Even, de SRK Consulting, por darme la oportunidad de participar en el proyecto y desarrollarlo como tema de memoria; también a Minera Santa Fe. A Ingrid Smoje, con quien aprendí mucho y siempre me dio facilidades y ánimo.

A Kathy Toro, porque su apoyo ha sido invaluable.

A Pancho Hervé, porque su conversación fue el impulso para atreverme con la Geología.

A mi comisión, Sofía Rebolledo. Sergio Sepúlveda y Marisol Lara. Especialmente Sofía, quien ha tenido una paciencia increíble, estando siempre dispuesta a orientarme y ayudarme. Gracias Sofía.

Al Departamento de Geología, porque desde el principio me hicieron sentir una más. Quilo y Carlos, que siempre se han preocupado; Blanca, que me ha ayudado con el proceso. Y María Rosa, que es absolutamente inigualable.

A la biblioteca de la escuela por introducirme al mundo de la ciencia ficción.

Por supuesto, tengo que darle las gracias a mi familia. Porque siempre han sido incondicionales, incluso cuando las decisiones parecían alocadas o no tan tradicionales. Gracias Mamá, Papá, Catty y Chel, porque sin ustedes no habría podido hacerlo. Y a la Bónomi que estuvo al comienzo y la Ele que está al final.

A todos los que, en distintas etapas, han estado conmigo. El grupo de primer año, incluyendo a Ingrid y Pancho, mi héroe personal; mis compañeros de geología, mis compañeros de terreno en Carmen (en especial Domi y Joselo). Matty, que entre muchas cosas ayudó a que me decidiera por la Escuela. También Claudia H y Ale V.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1	Antecedentes generales del estudio .....	1
1.2	Formulación general.....	1
1.3	Ubicación y vías de acceso.....	1
1.4	Objetivos .....	2
1.4.1	Objetivo general.....	2
1.4.2	Objetivos específicos.....	2
1.5	Zona de estudio .....	3
1.6	Trabajos anteriores .....	4
1.7	Metodología de trabajo.....	5
1.7.1	Medición de orientación de estructuras .....	5
1.7.2	Mapeo geológico .....	6
1.7.3	Mapeo estructural .....	6
1.7.4	Levantamiento de ventanas geotécnicas.....	7
1.7.5	Registro de sondajes .....	8
1.7.6	Definición de Dominios Estructurales .....	9
1.7.7	Cálculo de RMR y Q de Barton y clasificación del macizo .....	9
<b>2</b>	<b>Geología.....</b>	<b>10</b>
2.1	Marco geológico regional .....	10
2.2	Marco geológico distrital.....	11
2.2.1	Rocas Estratificadas .....	11
2.2.2	Depósitos no consolidados.....	12

2.2.3	Rocas Intrusivas .....	12
2.3	Geología Estructural.....	12
2.4	Metalogénesis .....	13
2.5	Geología Local .....	15
2.5.1	Litología .....	15
2.5.2	Mineralización.....	20
2.5.3	Alteración.....	22
<b>3</b>	<b>Estructuras y geotecnia Local .....</b>	<b>24</b>
3.1	Estructuras locales .....	24
3.2	Fallas Principales .....	25
3.2.1	Falla A .....	26
3.2.2	Falla B .....	29
3.3	Fallas importantes.....	30
3.3.1	Falla W .....	32
3.3.2	Falla P .....	32
3.3.3	Falla T.....	32
3.3.4	Falla Z.....	32
3.3.5	Falla X .....	32
3.3.6	Falla Q.....	33
3.3.7	Falla R .....	33
3.3.8	Falla Y .....	33
3.3.9	Falla U .....	33
3.4	Subsistemas de fallas .....	35

3.5	Ventanas Geotécnicas .....	37
3.6	Dominios Estructurales .....	41
3.6.1	Dominio I .....	42
3.6.2	Dominio II .....	43
3.6.3	Dominio III .....	44
3.6.4	Dominio IV .....	45
3.6.5	Dominio V .....	46
3.6.6	Dominio VI .....	47
3.6.7	Estructuras Integradas de Mina Carmen .....	49
3.7	Caracterización del Macizo Rocoso .....	52
3.7.1	Cálculo $RMR_L$ en Ventanas Geotécnicas. ....	52
3.7.2	Cálculo Q de Barton en ventanas geotécnicas.....	54
3.7.3	$RMR_L$ en sondajes.....	56
3.7.4	Sostenimientos sugeridos.....	58
<b>4</b>	<b>Discusiones y Conclusiones .....</b>	<b>62</b>
4.1	Discusiones .....	62
4.1.1	Definición de dominios estructurales .....	62
4.1.2	Información empleada en análisis de dominios .....	62
4.1.3	$RMR_L$ en ventanas y sondajes.....	63
4.1.4	Comparación de $RMR_L$ y Q .....	63
4.1.5	Categorización de fallas .....	63
4.1.6	Otras consideraciones .....	64
4.2	Conclusiones.....	65

<b>5</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>67</b>
<b>6</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>69</b>
6.1	Anexo A: Cartillas de registro de datos .....	69
6.2	Anexo B: Sistemas de clasificación del macizo rocoso .....	74
6.2.1	RQD.....	74
6.2.2	GSI (Hoek, 1994; Hoek, Kaiser y Brown, 1995).....	75
6.2.3	Q de Barton .....	76
6.2.4	RMR .....	81
6.3	Anexo C: Tablas de cálculos RMR y Q en ventanas geotécnicas.....	85
6.4	Anexo D: Planos de Litología y Mineralización .....	89
6.5	Anexo E: Planos de estructuras niveles .....	94

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Clasificación de fallas.....	24
Tabla 3-2: Fallas Importantes y secundarias Principal.....	24
Tabla 3-3: Resumen fallas principales Mina Carmen .....	30
Tabla 3-4: Resumen fallas importantes Mina Carmen .....	34
Tabla 3-5: Orientaciones preferenciales fallas principales e importantes.....	35
Tabla 3-6: Ubicación y dimensiones de las ventanas geotécnicas levantadas en Mina Carmen. ....	37
Tabla 3-7: Resumen ventanas geotécnicas Mina Carmen.....	38
Tabla 3-8: Sets estructurales de Dominio I. Incluye diaclasas y fallas. ....	43
Tabla 3-9: Sets estructurales de Dominio II. Incluye diaclasas y fallas .....	44
Tabla 3-10: Sets estructurales de Dominio III. Incluye diaclasas y fallas .....	45
Tabla 3-11: Sets estructurales de Dominio IV. Incluye diaclasas y fallas.....	46
Tabla 3-12: Sets estructurales de Dominio V. Incluye diaclasas y fallas.....	47
Tabla 3-13: Sets estructurales de Dominio VI. Incluye diaclasas y fallas.....	48
Tabla 3-14: Sets estructurales de Mina Carmen, integrado. Incluye diaclasas y fallas..	51
Tabla 3-15: Presencia de orientaciones preferenciales de fallas principales e importantes en dominios estructurales.....	51
Tabla 3-16: Comparación sistemas principales de estructuras por dominio. ....	51
Tabla 3-17: Categorías de RMR Laubscher 1990.....	52
Tabla 3-18: Categorías Q de Barton .....	52
Tabla 3-19: $RMR_L$ por ventana geotécnica.....	53
Tabla 3-20: RMR Laubscher (RQD+JS) de acuerdo a litología.....	53
Tabla 3-21: Comparación $RMR_L$ (RQD+JS) entre dominios estructurales .....	54

Tabla 3-22: Q de Barton de ventanas geotécnicas subterráneas.....	54
Tabla 3-23: Comparación de Q de Barton de acuerdo a litología.....	55
Tabla 3-24: Comparación Q de Barton entre dominios estructurales.....	55
Tabla 3-25: Azimut, inclinación y largo de sondajes con cálculo de RMR Laubscher ....	56
Tabla 3-26: Diámetro equivalente asociado a cada ventana geotécnica, considerando valores de ESR 5 y 2.....	59
Tabla 3-27: Sostenimiento recomendado por ventana geotécnica en niveles 1, 2 y 3, ESR=2.....	60
Tabla 6-1: Cartilla de levantamiento geológico.....	70
Tabla 6-2: Cartilla de registro de estructuras.....	71
Tabla 6-3: Cartilla para elaboración de ventanas geotécnicas.....	72
Tabla 6-4: Cartilla de registro geotécnico de sondajes.....	73
Tabla 6-5: Clasificación de la roca de acuerdo a RQD (Deere, 1989).....	74
Tabla 6-6: Clasificación del macizo de acuerdo a Q de Barton.....	77
Tabla 6-7: Valores de $J_n$ .....	77
Tabla 6-8: Valores de $J_r$ .....	78
Tabla 6-9: Valores de $J_a$ .....	79
Tabla 6-10: Valores de $J_w$ .....	80
Tabla 6-11: Valores de SRF.....	80
Tabla 6-12: Valores de SRF (continuación).....	81
Tabla 6-13: Puntajes de IRS, RQD, FF.....	82
Tabla 6-14: Puntajes de condición de diaclasas y agua (Laubscher, 1990).....	84
Tabla 6-15: Clasificación RMR de Laubscher 1990.....	84
Tabla 6-16: Cálculos RMR ventanas Niveles 1 y 2.....	86

Tabla 6-17: Planilla de cálculos RMR ventanas Nivel 3 y superficie .....	87
Tabla 6-18: Planilla de cálculo de Q de Barton en ventanas subterráneas .....	88

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1-1: Ubicación y accesos área de estudio. Modificada a partir de maps.google.cl. .....	2
Figura 1-2: Rajo Mina Carmen. Se aprecia parte de los dos bancos cartografiados (zona iluminada a la derecha de la fotografía). Desde el punto que se tomó la foto hasta la pared este la distancia es de 360m aproximadamente .....	3
Figura 1-3: Planta de Rajo Mina Carmen. La zona coloreada representa los sectores con levantamiento geológico-estructural-geotécnico; a: entrada, b: banco 1, c: banco 2, d: pit. ....	4
Figura 1-4: Plano esquemático de galerías subterráneas y rajo de Mina Carmen. Vista inclinada hacia el sur.....	4
Figura 1-5: Punto de referencia, en verde. Fotografía mirando al sur.....	5
Figura 2-1: Plano geológico regional. Modificado de SERNAGEOMIN 2003, escala 1:1.000.000. La estrella roja indica la ubicación de Mina Carmen. ....	10
Figura 2-2: Configuración geológica en las inmediaciones del yacimiento de Hierro de Mina Carmen, marcada en con una estrella roja. (Godoy y Lara, 2005). ....	11
Figura 2-3: Sistema de Fallas de Atacama, segmento El Salado. En rojo se señala la ubicación de Mina Carmen. Modificada de Brown et al., 1993.....	13
Figura 2-4: Franja Ferrífera Chilena, con Mina Carmen señalizada en rojo. Modificado de Maksaev, 2001.....	14
Figura 2-5: Litología y mineralización Nivel 1.....	16
Figura 2-6: Litología y mineralización Nivel 2.....	16
Figura 2-7: Litología y mineralización Nivel 3.....	17
Figura 2-8: Litología y mineralización en rajo mina Carmen. ....	17

Figura 2-9: Brechas hidrotermales. Fotografía mirando al sur. ....	19
Figura 2-10: Dique 3 en Nivel 2, de 1,5m de espesor (delineado en blanco). Fotografía mirando al norte. ....	20
Figura 2-11: Veta-falla de Hierro Masivo, en techo de Nivel 1 de Mina Carmen (delineada en blanco). Fotografía mirando al oeste. ....	21
Figura 2-12: Hierro semimasivo reconocido en Rajo Mina Carmen. ....	22
Figura 2-13: Alteración calcosódica intensa en hierro semimasivo. Ap: apatito; Act: actinolita .....	23
Figura 3-1: Falla principal A en Nivel 1, en color rojo. ....	25
Figura 3-2: Falla A en Nivel 2. ....	25
Figura 3-3: Fallas A y B en Nivel 3. ....	26
Figura 3-4: Fallas A y B en superficie. La cuadrícula tiene una separación de 40 m. ....	26
Figura 3-5: Vista al SE del rajo Carmen. La falla A está remarcada en amarillo en la fotografía. ....	27
Figura 3-6: Vista hacia el este de componente de estructura componente de Falla A en Nivel 2 (resaltada en blanco). ....	28
Figura 3-7: Vista al NW del Rajo Carmen. En el centro (en rojo) puede observarse la falla B atravesando tres bancos. ....	29
Figura 3-8: Vista parcial al noroeste de falla F11, que representa la porción subterránea (Nivel 3) de Falla Principal B. ....	30
Figura 3-9: Fallas W, Z, X y U en Nivel 1. ....	31
Figura 3-10: Falla Y, Q, X, T, W y U en Nivel 2. ....	31
Figura 3-11: Fallas W, P, X y R en Nivel 3. ....	31
Figura 3-12: Estereograma fallas importantes y relevantes .....	34
Figura 3-13: Perfil esquemático E-W a lo largo de la coordenada N 7085740. ....	36

Figura 3-14: Ubicación Perfil con respecto a niveles subterráneos y rajo mina Carmen. .....	36
Figura 3-15: Ubicación de ventanas geotécnicas en Nivel 1.....	39
Figura 3-16: Ubicación de ventanas geotécnicas en Nivel 2.....	39
Figura 3-17: Ubicación de ventanas geotécnicas en Nivel 3.....	40
Figura 3-18: Ubicación de ventanas geotécnicas en Rajo Carmen.....	40
Figura 3-19: Dominios estructurales en Nivel 1.....	41
Figura 3-20: Dominios estructurales en Nivel 2.....	41
Figura 3-21: Dominios estructurales en Nivel 3.....	42
Figura 3-22: Dominios estructurales identificados en Rajo Carmen.....	42
Figura 3-23: Estereograma de estructuras Dominio I. En rojo: diaclasas; en azul, fallas. .....	43
Figura 3-24: Estereograma de estructuras Dominio II. En rojo: diaclasas; en azul, fallas. .....	44
Figura 3-25: Estereograma de estructuras Dominio III. En rojo: diaclasas; en azul, fallas. .....	45
Figura 3-26: Estereograma de estructuras Dominio IV. En rojo: diaclasas; en azul, fallas. .....	46
Figura 3-27: Estereograma de estructuras Dominio V. En rojo: diaclasas; en azul, fallas. .....	47
Figura 3-28: Estereograma de estructuras Dominio VI. En rojo: diaclasas; en azul, fallas. .....	48
Figura 3-29: Estereograma de estructuras integradas Mina Carmen.....	49
Figura 3-30: ejemplos de macizo rocoso en Carmen.....	55
Figura 3-31: Ubicación sondajes CARD-45 y CARD-46 con respecto al rajo Mina Carmen. En rojo: caminos.....	56

Figura 3-32: Parámetro $RMR_L$ a lo largo del sondaje CARD-45. La línea roja indica el límite “Roca Mala”-“Roca Regular”.....	57
Figura 3-33: Parámetro $RMR_L$ a lo largo del sondaje CARD-46. La línea roja indica el límite “Roca Mala”-“Roca Regular”.....	57
Figura 3-34: Gráfico de sostenimiento recomendado de acuerdo a la calidad de roca (Q). Barton, 2000. En celeste: diámetro equivalente con $ESR=5$ ; en rojo: diámetro equivalente con $ESR=2$ .....	59
Figura 6-1: Forma correcta de medir el largo de un trozo de testigo. Modificado de Deere, 1989.....	74
Figura 6-2: Clasificación GSI (Hoek and Marinos, 2000) .....	76
Figura 6-3: Curvas de determinación de IRS ponderado para macizos con zonas débiles y resistentes .....	82
Figura 6-4: Asignación de puntaje por espaciamiento de diaclasas.....	83
Figura 6-5: Litología y mineralización en Nivel 1 .....	90
Figura 6-6: Litología y mineralización en Nivel 2.....	91
Figura 6-7: Litología y mineralización en Nivel 3.....	92
Figura 6-8: Litología y mineralización en Rajo Mina Carmen .....	93
Figura 6-9: Estructuras levantadas en Nivel 1.....	95
Figura 6-10: Estructuras levantadas en Nivel 2.....	96
Figura 6-11: Estructuras levantadas en Nivel 3.....	97
Figura 6-12. Estructuras levantadas en Rajo Mina Carmen.....	98

# **1 INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Antecedentes generales del estudio**

Este trabajo forma parte del “Estudio Geológico Geotécnico Mina Carmen”, realizado por la consultora SRK Chile entre 2010 – 2012 para Minera Santa Fe, entonces dueña de la mina. El proyecto tuvo como objetivo realizar una evaluación de los recursos existentes, así como estudiar las condiciones de estabilidad del macizo rocoso de la mina y proponer medidas de mitigación. La autora formó parte del proceso de levantamiento geológico geotécnico y estructural del macizo rocoso, así como de su interpretación; también participó del registro geotécnico de sondajes.

## **1.2 Formulación general**

Mina Carmen es un depósito de hierro en la provincia de Chañaral, tercera región de Atacama, inmediatamente al sur del distrito de Sierra Áspera; Gelsich et al. (1998) describe el yacimiento como un cuerpo lenticular de rumbo aproximado este-oeste, con mineralización de magnetita parcialmente martitizada. Detuvo su producción a principios de la década de 1980, quedando abandonadas las instalaciones que incluyen tres niveles subterráneos y un rajo. Sin embargo, desde 2010 se explotan las tortas de rechazo restantes y se realizó una campaña de sondajes de aire reverso con el fin de estimar los recursos existentes.

Durante esta campaña se consideró la idea de realizar perforaciones desde las galerías subterráneas existentes. Con el fin de posibilitar la planificación de trabajos en la mina y proponer la fortificación adecuada en las galerías para permitir la perforación de sondajes desde las mismas, fue necesario analizar la condición estructural de la Mina Carmen, tanto los niveles subterráneos como el rajo. Estos trabajos además permitieron complementar la información litológica obtenida a partir de los sondajes de aire reverso, que conformaban la base del modelo geológico existente.

Dentro de este análisis de condición estructural se realizó un levantamiento geológico-estructural de la mina, tanto galerías subterráneas como el rajo, lo que constituye el eje de este trabajo; además se mapearon geotécnicamente sondajes diamantinos. Estas labores, de las que la autora formó parte, constituyen este estudio.

## **1.3 Ubicación y vías de acceso**

El área de interés se encuentra en la tercera región de Atacama, provincia de Chañaral, a aproximadamente 12km al NW de la ciudad de Diego de Almagro y 70 km al este de Chañaral. Se puede acceder por medio de las rutas C-151 y C-161 (Figura 1-1).



Figura 1-1: Ubicación y accesos área de estudio. Modificada a partir de maps.google.cl.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es caracterizar el macizo rocoso de Mina Carmen, identificando litología, arreglos estructurales y propiedades geotécnicas, clasificándolo de acuerdo a Q de Barton en galerías subterráneas y RMR de Laubscher (1990) en sectores subterráneos y superficie.

### 1.4.2 Objetivos específicos

Para lograr el objetivo general, se han planteado los siguientes objetivos específicos:

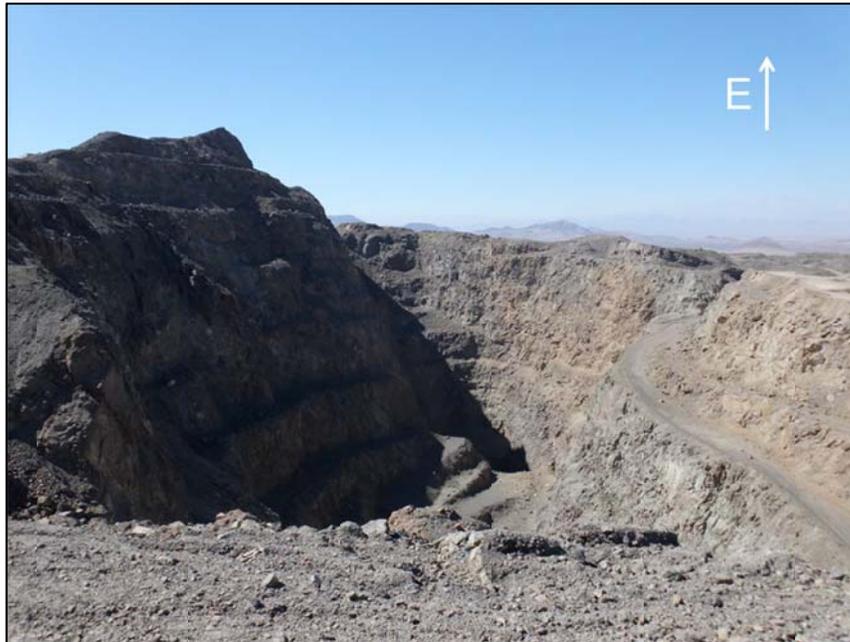
- Reconocimiento de la litología y alteración del sector.
- Reconocimiento estructural del área.
- Recolección de parámetros geotécnicos del macizo (ventanas geotécnicas).
- Elaboración de plantas en 2D de litología y estructuras.
- Definición de dominios estructurales.

- Análisis geotécnico de los dominios estructurales.

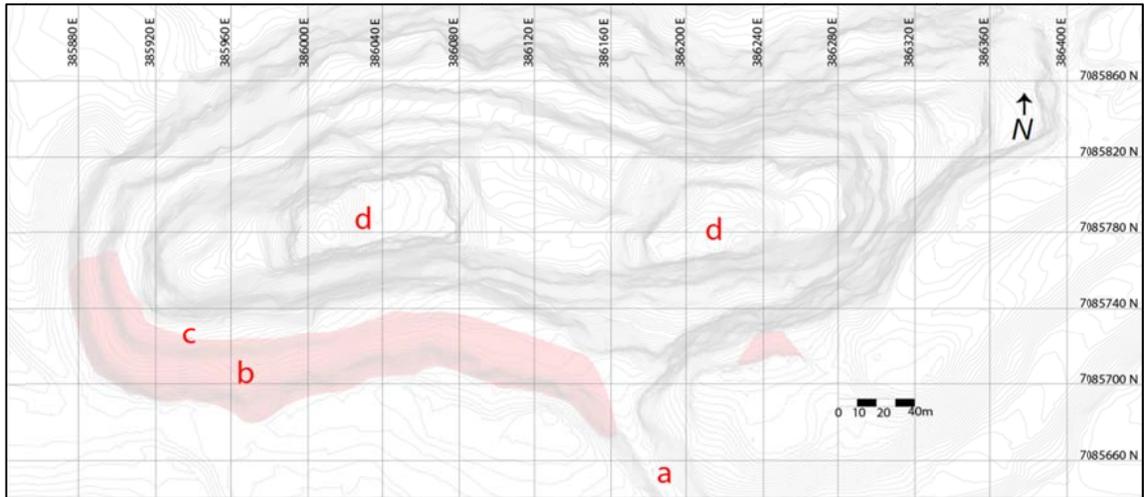
## 1.5 Zona de estudio

Las áreas estudiadas de la Mina Carmen comprendidas en este trabajo son:

- Galerías subterráneas, compuestas por tres niveles que aumentan su profundidad hacia el oeste. El más superficial, Nivel 1, tiene una profundidad promedio de 829 m.s.n.m., con una rampa que va desde los 875 a 774 m s.n.m. El intermedio, Nivel 2, tiene en promedio 809 m.s.n.m, entre 804-813 m s.n.m. Por último, el nivel más profundo, Nivel 3, tiene 790 m.s.n.m., variando entre 791-815 m s.n.m. En total son aproximadamente 6700m lineales.
- Rajo Mina Carmen, ubicado sobre las labores subterráneas. Por razones de seguridad, sólo fue posible acceder a los bancos superiores de los lados sur y oeste del rajo (Figura 1-2 y Figura 1-3), así como a la parte superior del sector este, lo que suma aproximadamente 550m lineales.

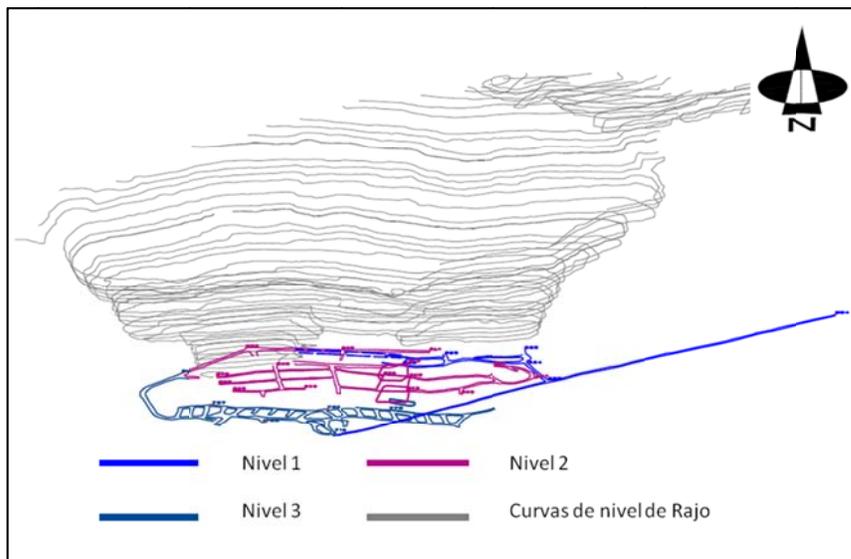


**Figura 1-2: Rajo Mina Carmen. Se aprecia parte de los dos bancos cartografiados (zona iluminada a la derecha de la fotografía). Desde el punto que se tomó la foto hasta la pared este la distancia es de 360m aproximadamente**



**Figura 1-3: Planta de Rajo Mina Carmen. La zona coloreada representa los sectores con levantamiento geológico-estructural-geotécnico; a: entrada, b: banco 1, c: banco 2, d: pit.**

Un esquema de la distribución de los tres niveles subterráneos con respecto al rajo de Mina Carmen se incluye en la Figura 1-4.



**Figura 1-4: Plano esquemático de galerías subterráneas y rajo de Mina Carmen. Vista inclinada hacia el sur.**

## 1.6 Trabajos anteriores

En forma conjunta a los trabajos realizados por el Sernageomin, los que se detallan en la sección Marco geológico regional y distrital (página 10), se usó como referencia un reporte interno del año 2010:

- Carmen Mineral Source Report (Even, G; Jaramillo, E; Jara, J.L. SRK, 2010). Reporte de la estimación de recursos en Mina Carmen a partir de 19 sondajes de aire reverse.

## 1.7 Metodología de trabajo

El presente estudio se realizó en las dependencias de Mina Carmen, en esa entonces propiedad de Minera Santa Fe.

Entre febrero y junio de 2011, se efectuó el levantamiento geológico-geotécnico y estructural de Mina Carmen. Se comenzó con las galerías subterráneas, trabajo realizado por Marisol Filgueira, Beatriz Martínez, Katherine Toro y Patricia Gálvez; esto fue seguido por las zonas accesibles del rajo. El segundo semestre de 2011 se realizó el registro geotécnico de sondajes, el que estuvo a cargo de Katherine Toro, Miguel Varela y Patricia Gálvez.

Para realizar los trabajos en los niveles subterráneos, sus paredes fueron lavadas; además se marcaron puntos aproximadamente cada 10 m. (Figura 1-5), cuyas coordenadas se levantaron por medio de topografía. Toda la información recogida (ubicación de estructuras y ventanas geotécnicas, límites de tramos geológicos) fue referenciada a estas marcas, tanto en las planillas de mapeo como en los planos generados. El sistema de coordenadas utilizado fue PSAD 56.



Figura 1-5: Punto de referencia, en verde. Fotografía mirando al sur.

A modo de líneas de detalle se utilizaron los muros de las galerías, así como las paredes del rajo en los sectores registrados; sus orientaciones fueron las utilizadas para generar las travesas en los estereogramas de estructuras.

### 1.7.1 Medición de orientación de estructuras

Debido a la naturaleza magnética del depósito y su posible influencia en la brújula, se recurrió a dos alternativas para medir la orientación de estructuras:

- Discontinuidades observables en dos paredes (caso típico de las galerías subterráneas): se midió su ubicación en ambas paredes a la misma altura; luego se dibujó en el plano y se calculó el dipdir en forma gráfica.

- Estructuras observadas en una sola pared: se proyectó su superficie en la pared opuesta o en el suelo, con ayuda de un puntero láser; con eso se lograban dos puntos que posteriormente podían dibujarse en el plano (caso de las galerías) o marcarse con estacas (caso rajo), para después traspasar al plano las coordenadas que definen la estructura y posteriormente medir el dipdir de forma gráfica,

En ambos caso el manteo se midió directamente con la brújula.

### **1.7.2 Mapeo geológico**

Se levantó la geología del sector, registrándola en planillas de mapeo por medio de tramos geológicos; éstos se escogieron de modo que la roca contenida tuviese propiedades homogéneas en cuanto a litología, alteración, o mineralización.

Las características consideradas fueron litología y textura de la roca; minerales de alteración, su intensidad y forma de ocurrencia, lo que define la alteración dominante; ocurrencia y porcentaje estimado de minerales de mena. Además se incluyó una breve descripción de la roca. La litología fue llevada a planos con escala 1:500.

La cartilla de mapeo se presenta en la Tabla 6-1 del Anexo A.

### **1.7.3 Mapeo estructural**

En conjunto con el mapeo geológico, se levantaron principalmente fallas presentes en galerías y superficie, además de las vetas y vetas fallas relevantes. Con esta información se generaron planos con escala 1:500. Los parámetros registrados fueron:

- Identificación: Número correlativo de la discontinuidad.
- Ubicación: Medida con respecto a los puntos más cercanos marcados por topografía.
- Tipo: Indica si la discontinuidad es falla, veta falla o veta.
- Orientación: Manteo y dirección de manteo de la estructura.
- Rugosidad: grado de aspereza de la discontinuidad, que tiene relación con la resistencia al cizalle. Se mide a escala macro (estructura completa) y micro (se analizan 10 cm de la discontinuidad).
- Relleno: Identificación de los minerales que rellenan las discontinuidades.
- Alteración de las paredes: compara la alteración de pared de la discontinuidad con respecto a la roca de caja, pudiendo ser mayor, menor o igual.
- Espesor: ancho del relleno.
- Continuidad: indica la persistencia de las discontinuidades tanto en el strike como en el manteo. Esto se hace identificando el largo observado en metros de la estructura y señalando si es interrumpida por otras discontinuidades.
- Zona de Influencia: zona afectada por alteración asociada a la estructura.

También se incluyó la categorización de la estructura, indicando si es menor, secundaria, importante o principal; esto detalla en la página 24. La cartilla de mapeo empleada se encuentra en la Tabla 6-2 del Anexo A.

#### **1.7.4 Levantamiento de ventanas geotécnicas**

Se entiende por macizo rocoso el conjunto de roca (matriz rocosa) y las discontinuidades que dividen la roca en bloques. La caracterización del macizo rocoso se enfoca principalmente en el estudio de las propiedades de las discontinuidades, lo que permite clasificarlo de acuerdo a su calidad.

Una ventana geotécnica es un tramo de longitud variable en que la roca presenta parámetros geotécnicos similares, representativos del macizo rocoso. En este estudio se utiliza la clasificación RMR de Laubscher (1990) para todas las ventanas y Q de Barton en las ventanas subterráneas; los parámetros y cálculos necesarios se explican en el Anexo B. En las ventanas levantadas en el interior de los túneles, se consideraron las estructuras presentes a ambas paredes, así como las del techo, formando una celda.

A continuación se explican brevemente los parámetros registrados en cada ventana, divididos según apliquen al macizo rocoso en general, o se midan por cada set de estructuras identificado.

##### **Matriz Rocosa**

- Litología: el tipo de roca que representa la ventana, acompañada de una descripción.
- Meteorización: Grado de meteorización que muestra el macizo; varía de roca fresca a altamente meteorizada.
- Resistencia (IRS): Estimación de la dureza de la roca, en MPa, utilizando un martillo o lápiz rayador.
- Condición de agua: Estimación de la presencia de agua en terreno. Su rango cubre desde roca seca a presencia de flujo de agua.
- GSI, Índice Geológico de Resistencia (Criterio H&B): Describe la geometría y tamaño de bloques presentes en el macizo rocoso, así como las condiciones de las superficies de las discontinuidades que forman estos bloques. En el Anexo B se muestra la forma de estimarlo.

##### **Sets de discontinuidades**

- Orientación: Manteo y dirección de manteo del set de discontinuidades.
- Tipo: Indica si el set descrito corresponde a diaclasas, vetillas, veta falla, falla.
- Espaciamiento: medición de la distancia mínima, máxima y media entre discontinuidades del set descrito.
- Número de estructuras por metro: se calcula de acuerdo a lo obtenido en el espaciamiento.
- Rugosidad: grado de aspereza de una discontinuidad, que tiene relación con la resistencia al cizalle. Se mide a escala macro (estructura) y micro (10 cm).
- Relleno: Identificación de los minerales que rellenan las discontinuidades.

- Alteración de las paredes: compara la alteración de la pared de la discontinuidad con respecto a la roca de caja, pudiendo ser mayor, menor o igual.
- Espesor: ancho del relleno típico.
- Continuidad: indica la persistencia de las discontinuidades tanto en el rumbo como en el manto.

Como puede observarse, a diferencia del registro de fallas del mapeo estructural, en la descripción de sistemas de diaclasas se incluye el espaciamiento,

Además, por cada ventana se calcula el RQD, índice de fracturamiento de la roca, basado en el número de discontinuidades total por metro. Su determinación se encuentra en el Anexo B. Si se considera necesario se pueden agregar observaciones.

La cartilla de mapeo de ventanas se encuentra en la Tabla A-3 del Anexo A.

### **1.7.5 Registro de sondajes**

Este mapeo está enfocado en levantar la información necesaria para describir el macizo rocoso a lo largo del sondaje y permitir su clasificación. Su base son los intervalos geotécnicos, los que se definen de manera que en ellos la roca presente características geotécnicas similares, quedando limitados por cambios de litología, alteración, IRS, frecuencia de estructuras o mineralización. Así, cada tramo es representativo de las condiciones reales de la roca, sin estar limitado a un soporte fijo. En este caso, se utilizaron tramos con extensión mayor a 30 cm. e inferior a 15 m, con excepción de las fallas cuyo largo supere los 10 cm., las que se consideraron como intervalos independientes.

La información registrada es la siguiente:

- Recuperación: Metraje total de testigo recuperado en el intervalo geotécnico, medidos a lo largo su eje. En porcentaje se calcula como la recuperación en metros dividida por la longitud del intervalo geotécnico.
- RQD: medida del fracturamiento de la roca; expresado en metros. Su cálculo se explica en detalle en el Anexo B. Antes de utilizarlo en el cálculo de parámetros se transformó a porcentaje.
- Resistencia de la Roca Intacta: estimación de la dureza de la roca en MPa. Se puede realizar con martillo o lápiz rayador.
- Meteorización: Se describe la meteorización por medio de una escala cualitativa de cinco grados, que varían de “roca fresca” a “completamente meteorizada”.
- Litología: registro del tipo de roca que compone el tramo. En caso de que el tramo sea una falla, se especifica en la litología.
- Número y sets de estructuras: Se definen los sets de estructuras de acuerdo a su orientación con respecto al eje del testigo: entre 0°-30°, 30°-60° y 60°-90° y se registra el número de discontinuidades por cada set. Estas pueden ser fracturas, diaclasas abiertas o fallas. Es importante descartar las estructuras inducidas por el proceso de perforación y manejo del testigo; una discontinuidad con bordes irregulares, o con rellenos frescos puede considerarse inducida.

- Caracterización de los sistemas de estructuras: Por cada sistema definido se incluye el tipo de estructura (fracturas, diaclasas abiertas o fallas), rugosidad a nivel micro y macro, relleno y espesor típico, alteración de las paredes y número de familias de diaclasas identificadas por sistema.
- Vetillas: se incluye el número presente en el intervalo y su relleno.
- GSI.

Adicionalmente se incluye una descripción breve del tramo, con el tipo de roca, textura, color, alteración y los comentarios que se estimen necesarios. La hoja de registro geotécnico se encuentra en el Anexo A (Tabla 6-4).

En este trabajo sólo se incluyen los sondajes CARD-45 y CARD-46, ya que por su ubicación y la profundidad que alcanzan, contribuyen a mejorar la comprensión de los niveles subterráneos.

### **1.7.6 Definición de Dominios Estructurales**

La información de fallas, diaclasas y otras estructuras recogida en terreno se usó para determinar orientaciones preferenciales de discontinuidades, por medio del software DIPS. Posteriormente se integró con los datos de litología, alteración y mineralización para definir dominios estructurales.

### **1.7.7 Cálculo de RMR y Q de Barton y clasificación del macizo**

A partir de la información recopilada a través de ventanas geotécnicas y sondajes, se calculó el índice Q de Barton en ventanas subterráneas y el parámetro RMR en ventanas y sondaje; sin embargo, no se aplicaron los ajustes para calcular MRMR asociado. La descripción y fórmulas de estas clasificaciones se encuentran en el Anexo B.

## 2 GEOLOGÍA

### 2.1 Marco geológico regional

La región estudiada (Figura 2-1) está dominada por afloramientos de rocas volcánicas del Jurásico y el Cretácico Inferior, que cubren en discordancia a un complejo epimetamórfico paleozoico y rocas sedimentarias triásicas, intruídas por granitoides de edades comprendidas entre el Triásico y Jurásico Inferior. Las rocas volcánicas están intruídas por granitoides generalmente de edad decreciente de oeste a este, jurásica media a cretácica inferior (Godoy y Lara, 1998).

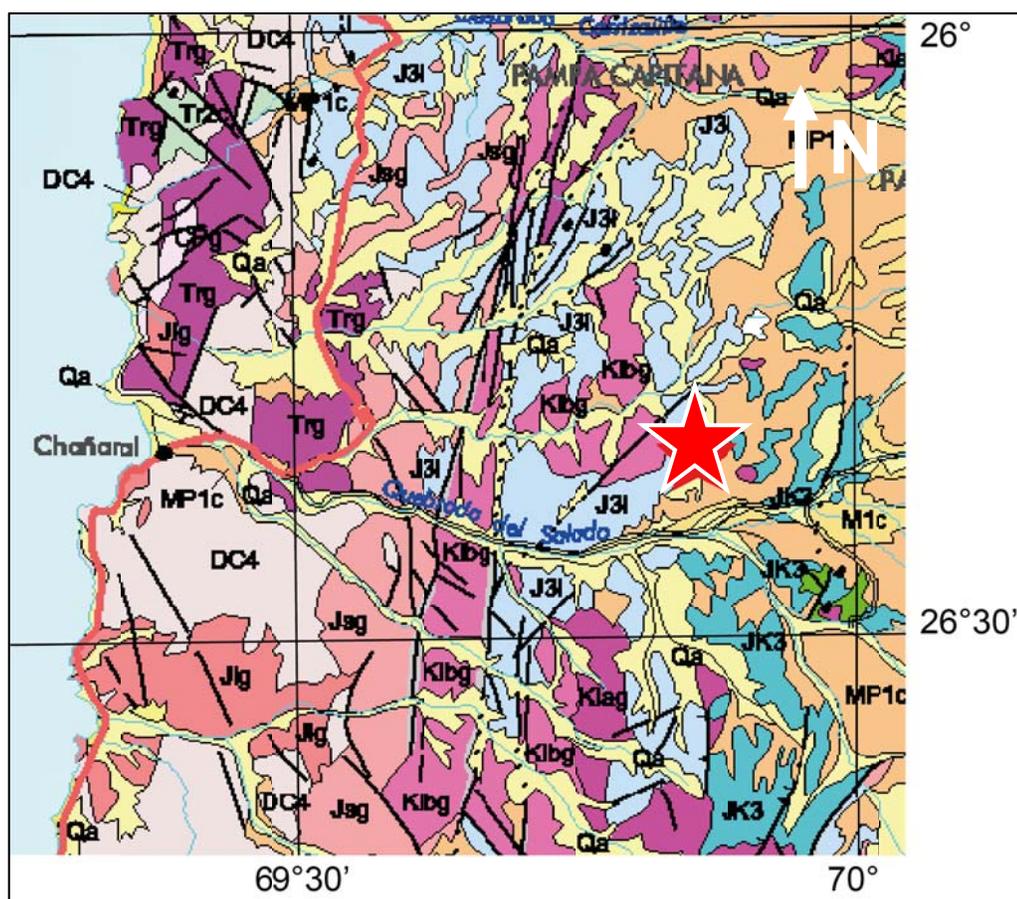


Figura 2-1: Plano geológico regional. Modificado de SERNAGEOMIN 2003, escala 1:1.000.000. La estrella roja indica la ubicación de Mina Carmen.

Los depósitos minerales están, casi en su totalidad, alojados en las rocas ígneas, intrusivas y volcánicas, formadas durante el Jurásico y el Cretácico Inferior. Extensas secuencias de lavas andesíticas con intercalaciones clásticas y carbonatadas del Jurásico Medio a Superior (Formación La Negra) ocurren en la zona central de la Figura 2-1; intrusivos hipabisales, espacialmente asociados a las lavas, son particularmente abundantes en torno al pueblo de El Salado.

Las unidades volcánicas del Jurásico-Cretácico Inferior están intruídas por numerosos plutones graníticos con edades comprendidas entre los 93 y 160 Ma que en general, tienen formas alargadas N-S; algunos presentan bandas miloníticas en sus bordes. Los granitoides del Jurásico Medio-Superior afloran exclusivamente al oeste del Sistema de Fallas de Atacama (SFA), presentando una gran variabilidad composicional, con predominio de los términos básicos en la mitad sur y los intermedios a más félsicos en el sector septentrional del área (Godoy y Lara, 1998). Los granitoides del Cretácico Inferior incluyen desde dioritas a tonalitas, entre los cuales destacan algunos plutones elongados en dirección norte-sur, cuyos bordes afectados por deformación dúctil (milonita) sintectónica, coinciden con las principales trazas frágiles N-S del SFA.

## 2.2 Marco geológico distrital

La Figura 2-2 muestra las unidades litológicas presentes a nivel distrital, las que se detallan a continuación.

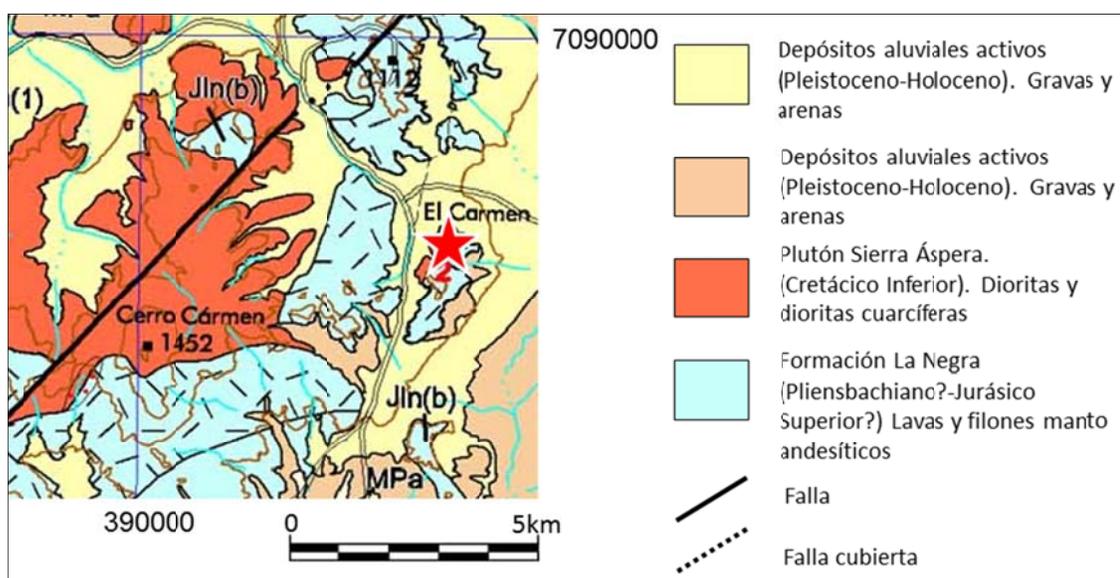


Figura 2-2: Configuración geológica en las inmediaciones del yacimiento de Hierro de Mina Carmen, marcada en con una estrella roja. (Godoy y Lara, 2005).

### 2.2.1 Rocas Estratificadas

#### Formación La Negra (¿Pliensbachiano?-¿Jurásico Superior?) (García, 1967)

Sucesión de lavas de composición andesítico-basáltica e intercalaciones sedimentarias marinas carbonatadas y epiclásticas de espesor cercano a los 2500 m. Se ubica concordantemente sobre los niveles carbonatados de la formación Pan de Azúcar, o en discordancia sobre el complejo epimetamórfico Chañaral.

Al noreste de El Salado las lavas se encuentran silicificadas; en otros afloramientos ubicados al oriente del SFA presentan alteración argílica. En la zona de estudio se compone de lavas andesíticas grises y negras (Godoy y Lara, 1998), con

intercalaciones de areniscas, areniscas calcáreas, delgadas ignimbritas riolíticas e intrusivos andesíticos filonianos. La intrusión del Plutón Sierra Áspera cornifica las rocas adyacentes; en sus cercanías anfíbola, calcita, clorita y esfeno reemplazan olivinos y piroxenos.

La edad mínima de la Formación La Negra está limitada por la relación de intrusión de los plutones las Ánimas y Agua del Sol (160-150 Ma y 150 Ma, respectivamente; ubicados al oeste y al sureste del área de estudio).

### **2.2.2 Depósitos no consolidados**

Depósitos Aluviales Antiguos (Mioceno Superior-Plioceno). Gravas, arenas y limos adosados a laderas y cortados por el drenaje actual. En la zona de estudio corresponden a depósitos monomícticos, de clastos angulosos, con pátinas de oxidación de color rojizo.

Depósitos Aluviales (Pleistoceno-Holoceno). Gravas, arenas y limos de selección variable. En la zona de estudio corresponden a depósitos inactivos; la consolidación es pobre y están compuestos principalmente de gravas y bloques subangulosos, además de arenas y limos en menor proporción.

### **2.2.3 Rocas Intrusivas**

Plutón Sierra Áspera Cretácico Inferior (131-128 Ma, Godoy y Lara, 1998) Intrusivo compuesto de dioritas de grano medio a fino, localmente porfídicas, de color gris a verde oscuro. Se reconocen como litologías secundarias gabros leucocráticos, monzogranitos, granodioritas y tonalitas de hornblenda. Aflora al este del sistema de falla de Atacama, intruyendo a la Formación La Negra. Su edad se estima en 131-128 Ma por dataciones K-Ar en biotita.

## **2.3 Geología Estructural**

El Sistema de Fallas de Atacama (SFA); en su segmento El Salado (Arabasz, 1971), constituye el rasgo estructural más notable del área de estudio. El SFA se expresa en trazas N-S y, hacia el este, como fallas secundarias de orientación NE (Figura 2-3), que cortan a los granitoides del Jurásico y Cretácico Inferior y a las rocas volcánicas de la Formación La Negra. Las fallas frágiles del SFA, se superponen, en parte, a las bandas de deformación dúctil generadas, en forma sincrónica al emplazamiento de los plutones del Cretácico Inferior (130 Ma, Godoy y Lara, 1998). El SFA guarda una estrecha relación espacial con la mineralización de Hierro y Cu-Fe±Au de la zona (Gelcich et al. 1998)

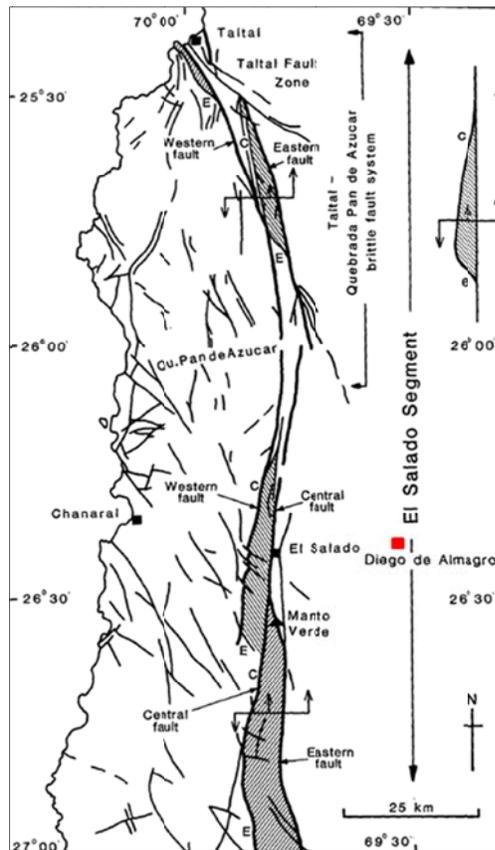


Figura 2-3: Sistema de Fallas de Atacama, segmento El Salado. En rojo se señala la ubicación de Mina Carmen. Modificada de Brown et al., 1993.

## 2.4 Metalogénesis

Maksaev (2001) incluye al yacimiento Carmen dentro de los depósitos ferríferos de la Franja Metalogénica del Cretácico Inferior, en el segmento meridional del Sistema de Falla de Atacama. Además se considera parte de la Franja Ferrífera Chilena (Figura 2-4).

Gelcich et al. (1998) incluyen el depósito en el dominio metalogénico asociado espacialmente al SFA, este presenta mineralización de Hierro y Cu-Fe±Au en vetas, depósitos irregulares y cuerpos de brechas. Caracterizan el yacimiento como un cuerpo lenticular emplazado en las lavas de la Formación La Negra, afectadas por metamorfismo de contacto, con mineralización de magnetita; presenta contenidos variables de apatito y actinolita y roca de caja fuertemente actinolitizada. Estas características de asociaciones de minerales de alteración, geometría del depósito y roca en la que se presenta son agrupadas por Espinoza (1990) dentro de los “Depósitos Tipo Carmen” de la Franja Ferrífera Chilena.



Figura 2-4: Franja Ferrífera Chilena, con Mina Carmen señalizada en rojo. Modificado de Maksiav, 2001.

Dataciones en apatito con U-Pb (Gelcich et al., 2003) indicaron edades de mineralización de  $129,8 \pm 3,0$  Ma y  $130,6 \pm 0,3$  Ma, en muestras provenientes de un dique magnetita-apatito a 500 m al sur del pit y de cuarzdiorita mineralizada respectivamente. Estos resultados son concordantes con las edades U-Pb en circón del Plutón Sierra Áspera.

## **2.5 Geología Local**

Durante la campaña de exploración de las galerías subterráneas y el sector accesible del rajo, se levantaron datos de litología, mineralización y alteración, los que a continuación se describen.

### **2.5.1 Litología**

Se han reconocido las siguientes unidades litológicas:

- Andesita (AND)
- Diorita (DIO)
- Brechas (BXX)
- Diques (DK)

Estas litologías sólo se reconocieron principalmente en profundidad. La Figura 2-5, Figura 2-6, Figura 2-7 y la Figura 2-8 muestran la distribución de la distintas unidades litológicas tanto en las galerías subterráneas como en superficie, junto con la mineralización. El Anexo D muestra los planos de litología en mayor detalle (Figura 6-5, Figura 6-6, Figura 6-7 y Figura 6-8).

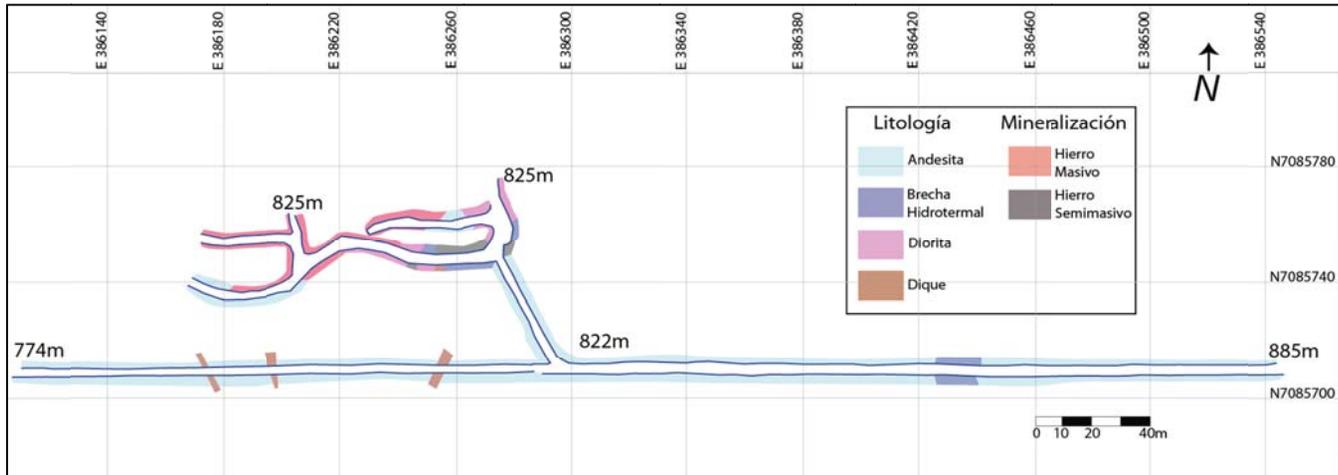


Figura 2-5: Litología y mineralización Nivel 1.

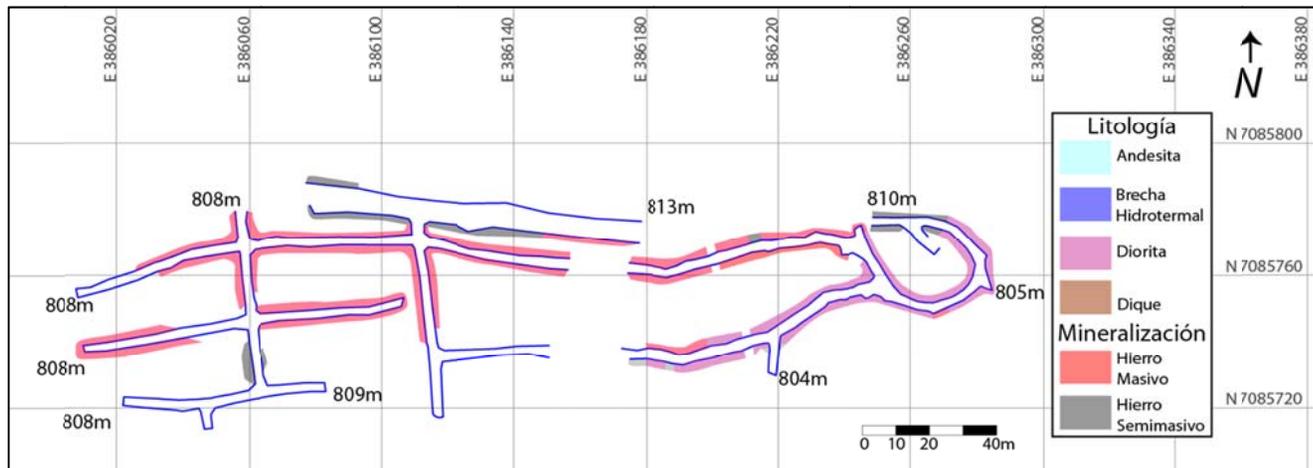
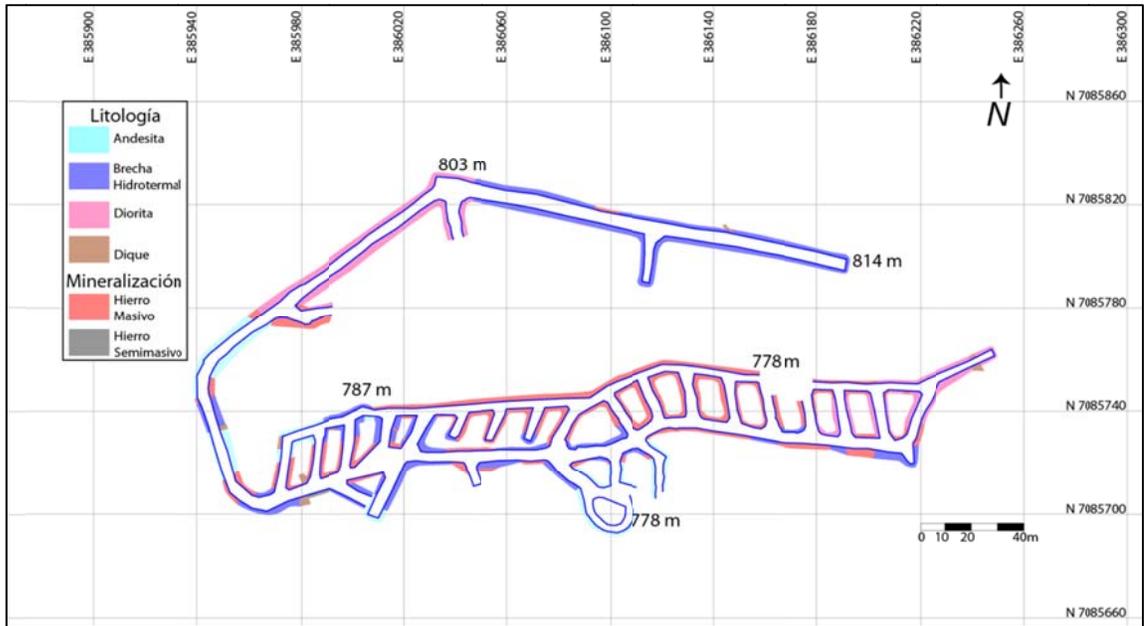
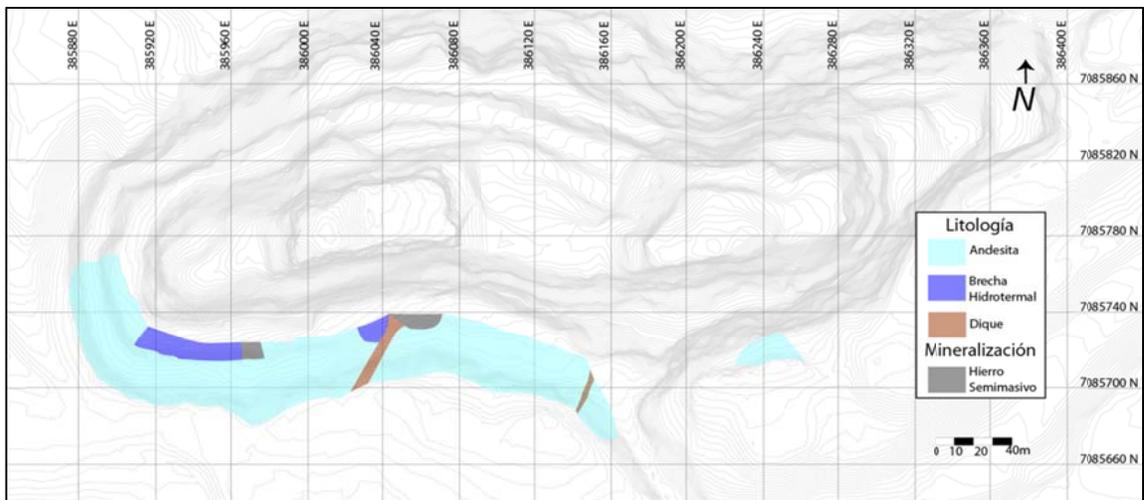


Figura 2-6: Litología y mineralización Nivel 2.



**Figura 2-7: Litología y mineralización Nivel 3.**



**Figura 2-8: Litología y mineralización en rajo mina Carmen.**

A continuación, se describen las unidades litológicas identificadas.

## **Andesita**

Esta unidad se presenta principalmente en el sector sur del yacimiento, formando parte de la roca de caja; consiste en andesitas pertenecientes a la Formación La Negra (García, 1967).

La roca es de color verde grisáceo, con textura que ha sido intensamente obliterada por alteración clorítica, cuarzo-sericita y arcillas, pudiendo apreciarse sólo de manera local remanentes de la textura porfídica original.

La mineralización corresponde a un diseminado de Magnetita, con menor porcentaje de hematita. La ley varía con la distancia al cuerpo principal; en los sectores distales no supera el 1% y en las cercanías del cuerpo de hierro masivo aumenta hasta bordear un 10%.

En superficie, corresponde a una roca de color verdoso, con texturas porfídica, obliterada o brechizada. Contiene un bajo porcentaje de hierro, asociado principalmente a magnetita en estructuras; el diseminado es muy leve. Se presenta alterada por clorita, con argilización y limonitización sobreimpuestas.

## **Diorita**

Esta unidad corresponde a un intrusivo diorítico, de grano fino, con silicificación y cloritización. Se encuentra principalmente en el sector sureste del depósito. Presenta trazas de diseminado de magnetita así como de pirita y calcopirita.

Varía de diorita a diorita cuarcífera con una textura porfídica a equigranular, la que en ocasiones es completamente obliterada por la actividad hidrotermal. Perteneció al Plutón Sierra Áspera, que intruye la secuencia volcánica La Negra (Godoy y Lara, 1998). Estas rocas afloran en el sector noroeste del rajo al norte de la falla B.

## **Brecha Hidrotermal**

Se ubica principalmente en los bordes del cuerpo mineralizado. Corresponde a una roca de color anaranjado, con limonitización moderada a fuerte, acompañada de argilización de intensidad media. Se puede disgregar con golpes de martillo. Puede presentar clastos de andesitas o diorita.

El contenido de mena de hierro es de alrededor de 30-35%, presentándose principalmente en matriz, vetillas y diseminado; corresponde a hematita y magnetita. Los clastos son de origen volcánico, con textura obliterada por efecto de la alteración.

En superficie corresponde a una brecha hidrotermal matriz soportada, en que la magnetita aparece brechizando andesita a través de vetillas; asimismo se encuentra magnetita como diseminado. También presenta bolsones de hierro masivo, demasiado pequeños para ser individualizados. Contiene trazas de pirita-calcopirita. Los límites andesita-brecha hidrotermal son transicionales. Su aspecto puede observarse en la Figura 2-9.



**Figura 2-9: Brechas hidrotermales. Fotografía mirando al sur.**

## **Diques**

Corresponden a cuerpos tabulares subvolcánicos color gris claro, que varían entre 0,15-3 m de ancho (Figura 2-10). La textura es microcristalina. Se encuentran en todo el depósito, tanto sectores de hierro masivo, como en andesitas y dioritas, lo que indicaría un emplazamiento post mineralización. Presentan leve alteración por arcillas. Se caracterizan por un fracturamiento en bloques en la misma orientación general del dique. La ley es menor a 1%, con magnetita diseminada; ocasionalmente presentan vetillas de sulfuros de cobre. No siempre muestran continuidad a través de las galerías.

Generan un halo de alteración débil en las andesitas y dioritas que intruyen, por lo que son interpretados como diques tardíos intraminerales a postminerales.

En superficie se reconocen diques aplíticos, que corresponden a dos diques métricos, microcristalinos, de color verde claro. Superficialmente aparecen anaranjados debido a las limonitas y arcillas que los alteran.



Figura 2-10: Dique 3 en Nivel 2, de 1,5m de espesor (delineado en blanco). Fotografía mirando al norte.

## 2.5.2 Mineralización

La mineralización en Carmen corresponde principalmente a una veta de hierro masivo, que en zonas distales se reconoce como hierro semimasivo. La distribución se muestra en la Figura 2-5, Figura 2-6, Figura 2-7 y Figura 2-8, además del Anexo D, describiéndose a continuación.

### Hierro Masivo

Aparece expuesto en los niveles subterráneos 1, 2 y 3. Corresponde a un cuerpo tabular, limitado por fallas, emplazado entre diorita y andesita. En los extremos se manifiesta en forma de vetas-falla subverticales y paralelas a las estructuras que limitan el cuerpo mineralizado (Figura 2-11).

Se compone mayoritariamente de magnetita, el principal mineral de mena del depósito; en segundo lugar contiene hematita. Su apariencia depende de su composición, pudiendo ser una roca oscura y brillante o rojiza y terrosa.

Su principal alteración es calcosódica, con argilización sobrepuesta. Localmente presenta vetillas de calcopirita y pirita y crisocola.



**Figura 2-11: Veta-falla de Hierro Masivo, en techo de Nivel 1 de Mina Carmen (delineada en blanco). Fotografía mirando al oeste.**

### **Hierro Semimasivo**

En este trabajo se denomina hierro semimasivo a la roca cuyo porcentaje de mena de hierro es menor a 50%, a pesar de ser su principal componente. Un ejemplo de esto son sectores con alteración calcosódica intensa, en que los minerales de alteración constituyen la mayor parte de la roca; también se presenta en zonas de transición entre hierro masivo y roca de caja.

Se presenta en algunos bordes del cuerpo principal en los niveles 1 y 2 de la mina subterránea; al igual que en hierro masivo, la alteración prevalente es calcosódica, con sobreimposición de arcillas. Suele presentar un porcentaje de hematita mayor que magnetita.

En superficie, se reconoce muy localizado, como bolsones ocasionales que, si bien superan la decena de metros de largo, no tienen gran extensión en la vertical. Es afectado por alteración calcosódica leve, con limonitización y argilización sobreimpuestas. La Figura 2-12 enseña una muestra de hierro semimasivo en superficie.

### **Minerales de mena**

Los minerales de mena presentes en el depósito son principalmente magnetita y hematita, con menor specularita. Estos minerales son los componentes primordiales de la veta de hierro masivo que conforma la mineralización de Mina Carmen; también forman parte de la matriz de las brechas hidrotermales y aparecen como vetillas, relleno de estructuras y diseminado. Esto último ocurre mayormente en andesitas, variando la intensidad de acuerdo a la distancia hacia la veta.



**Figura 2-12: Hierro semimasivo reconocido en Rajo Mina Carmen.**

En algunos sectores se observan también algunas vetillas y diseminado de crisocola y pirita-calcopirita, generalmente en hierro masivo o brechas hidrotermales.

La mineralización se observa casi exclusivamente en el sector subterráneo de Mina Carmen debido a las faenas de explotación realizadas en el Sector Rajo que dejaron sólo algunas zonas de andesita con escaso diseminado de magnetita y algunas brechas hidrotermales.

Para el análisis de macizo rocoso se consideró Hierro masivo y semimasivo como litologías, principalmente debido a la extensión que alcanzan.

### **2.5.3 Alteración**

Se observan seis tipos de alteración en Mina Carmen, que varían su intensidad de acuerdo a la cercanía con la zona mineralizada y la roca que afectan. Con excepción de la alteración calcosódica, los nombres corresponden al mineral de alteración más abundante.

#### **Argilización (ARG)**

Se presenta en todas las litologías en forma de minerales de arcilla, ya sea afectando a estructuras, reemplazando algunos minerales, o como diseminado. Su intensidad es variable, siendo más intensa en zonas muy fracturadas o en los bordes de la veta principal de hierro.

## **Limonitización (LIM)**

Como su denominación lo indica, se aplica a sectores con abundancia de limonitas. Aparece mayoritariamente en rocas que contienen hierro, como brechas. Se asocia principalmente a estructuras y se superpone a alteraciones preexistentes.

## **Cloritización (CHL)**

Se caracteriza por clorita en la roca afectada, reemplazando máficos. Se presenta con mayor intensidad en andesitas, alterándolas de forma pervasiva.

## **Calcosódica (CALC)**

Es distintiva de las zonas con hierro masivo o semimasivo y se presenta como una asociación de apatito y actinolita en proporciones e intensidad variables (Figura 2-13). También se pueden encontrar algunas brechas con esta alteración.

Las alteraciones más importantes, tanto por intensidad como por extensión, son calcosódica, argilización y clorítica.

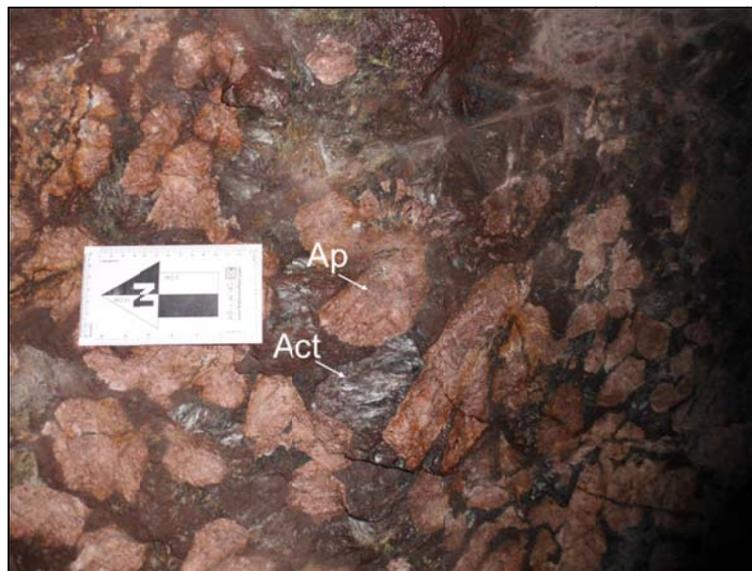


Figura 2-13: Alteración calcosódica intensa en hierro semimasivo. Ap: apatito; Act: actinolita

## **Silicificación (SIL)**

Afecta de forma pervasiva a andesitas y dioritas, apareciendo también sílice en estructuras. Puede presentarse además asociada a sericita.

## **Martitización (MTT)**

Se presenta en magnetita, afectando en particular a aquellas que conforman hierro masivo y semimasivo. Aparece con menor intensidad que las anteriores alteraciones.

### 3 ESTRUCTURAS Y GEOTECNIA LOCAL

#### 3.1 Estructuras locales

En el levantamiento de estructuras, realizado por medio de líneas de detalle, se registraron sólo fallas. Para efectos de este estudio, las fallas encontradas en superficie e Interior Mina se dividieron en tres categorías, las cuales dependen principalmente del espesor y continuidad de las estructuras. La clasificación se explica en la Tabla 3-1.

**Tabla 3-1: Clasificación de fallas**

Tipo	Espesor	Continuidad	Otros
Mayor	>2cm	No se observan límites tanto en rumbo como en manteo.	Puede presentar zonas de influencia. Asimismo, fallas que se reconocieron como parte de sistemas fueron consideradas dentro de esta categoría.
Secundaria	5mm-2cm	Sin límites en rumbo o en manteo.	Puede presentar zonas de influencia.
Menor	<5mm	Generalmente limitada por otras estructuras.	Incluye las fallas que no califican en las otras categorías.

Posteriormente, al analizar los resultados se reconocieron fallas que, habiendo sido levantadas por separado, podían correlacionarse por ubicación, orientación y rellenos, las que fueron denominadas como “Importantes”. En particular, se identificaron dos fallas observables desde superficie hasta el nivel más profundo y cuya extensión abarca todo el depósito. Estas dos estructuras fueron clasificadas dentro de una nueva categoría, “Principal” (Tabla 3-2).

**Tabla 3-2: Fallas Importantes y secundarias Principal.**

Tipo	Espesor	Continuidad	Otros
Importante	>2cm	No se observan límites, tanto en rumbo como en manteo, extensión >20m.	Visibles en varios niveles, compuestas por más de una falla
Principal	>2cm	No se observan límites, tanto en rumbo como en manteo.	Se extienden a lo largo del rajo, siendo visibles en varios niveles.

### 3.2 Fallas Principales

Se identifican dos fallas principales en Mina Carmen, las fallas A y B, que se encuentran en los extremos sur (con orientación E-W) y oeste (orientación NE) del depósito respectivamente. En la Figura 3-1, Figura 3-2 y Figura 3-3 se observa la ubicación de estas fallas en los niveles 1, 2 y 3; en la Figura 3-4 se muestran en superficie.

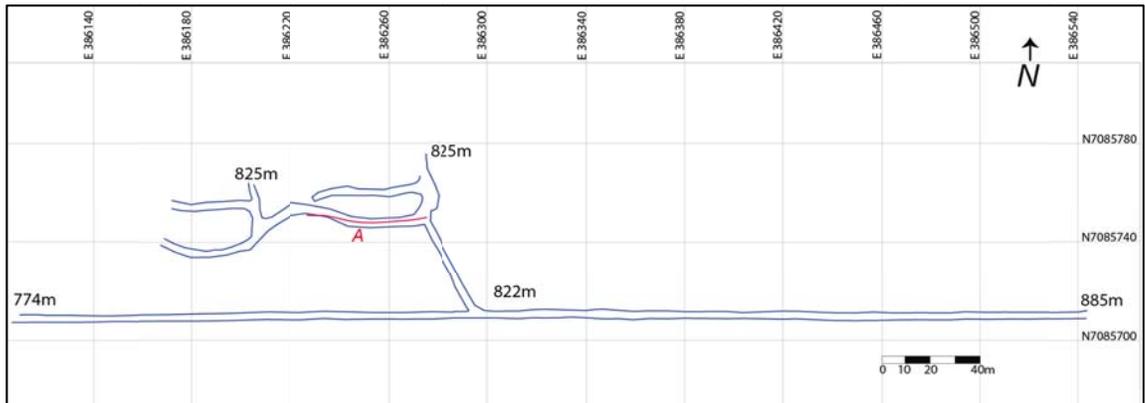


Figura 3-1: Falla principal A en Nivel 1, en color rojo.

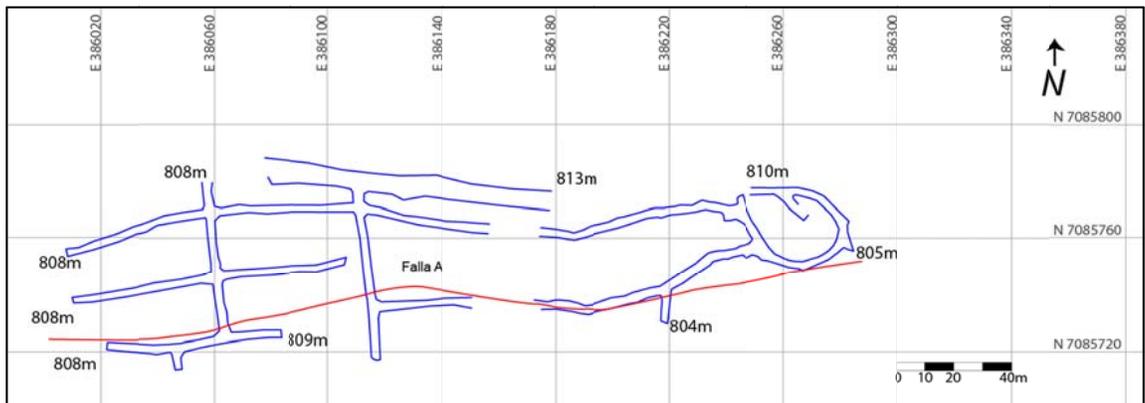
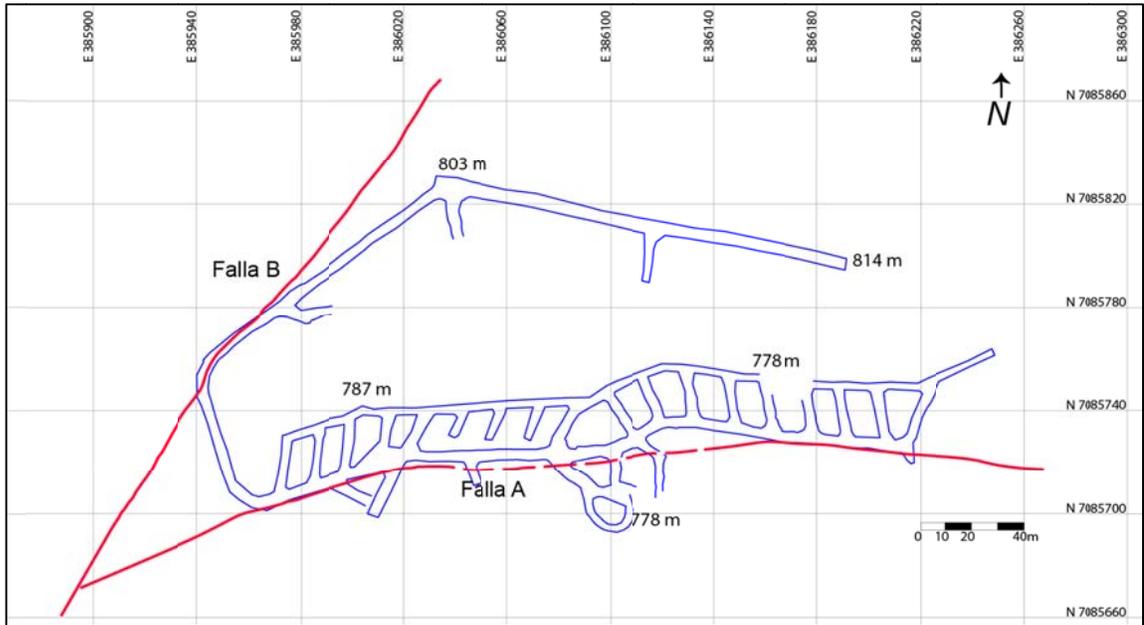
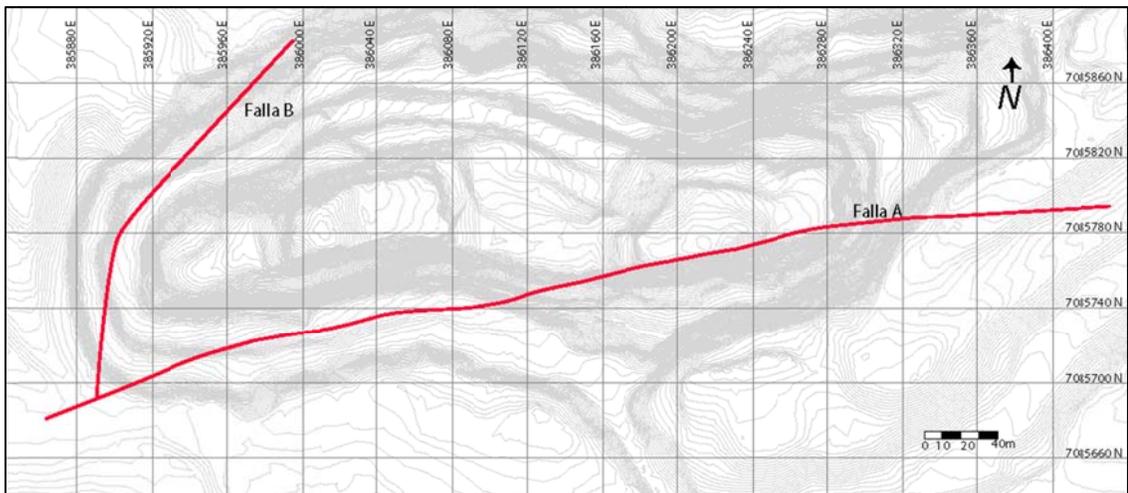


Figura 3-2: Falla A en Nivel 2.



**Figura 3-3: Fallas A y B en Nivel 3.**



**Figura 3-4: Fallas A y B en superficie. La cuadrícula tiene una separación de 40 m.**

### 3.2.1 Falla A

Se extiende de ENE a WSW en el sector sur de la zona estudiada. Se identificó en los tres niveles de la mina subterránea, además de la superficie, como se observa en la Figura 3-5. La forma y espesor varían a lo largo de rumbo y manteo.

En superficie aparece cruzando el sector sur del rajo, manteando con  $80^\circ$  hacia el sur. Alcanza su máximo espesor en el lado este del rajo, con 200 cm, hacia el oeste disminuye considerablemente midiéndose 10 cm; el relleno consiste principalmente en hematita, limonita y arcilla, con algo de calcita. En el sector este, entre el relleno aparece una serie de vetillas, paralelas a la falla; esta característica se repite en algunas zonas de la mina subterránea.



**Figura 3-5: Vista al SE del rajo Carmen. La falla A está remarcada en amarillo en la fotografía.**

En el Nivel 1 la falla A se identifica en un contacto subvertical entre andesitas de baja mineralización que componen la roca de caja y una veta de Fe; este contacto es ondulado, planar, con orientación 88/180 y espesor de 5cm; el relleno es arcilla, limonita y hematita. Se observa por 25 m en el rumbo.

En el Nivel 2 la falla A puede caracterizarse de acuerdo al sector en que se observa. En el lado este, al igual que en el Nivel 1, aparece una rama de esta falla, asociada a una veta falla subvertical (Figura 3-6); es suavemente ondulada, estriada, la orientación es 88/170 y el espesor disminuye hacia el oeste de 200 cm a 80 cm; su relleno es de hematita, arcilla y yeso.

En el lado oeste y al igual que en superficie, la falla A aparece en conjunto con una serie de vetillas de hematita-magnetita paralelas al rumbo de la falla. Comprende seis fallas, formando una zona de falla en brechas que limitan la veta de hierro masivo con la roca de caja. La orientación es 80/354, el espesor varía entre 2-15 cm y los rellenos consisten en magnetita, hematita, limonita y arcillas; en conjunto esta franja alcanza alrededor de 2.5 m, lo que corresponde al ancho de la galería.

En el Nivel 3 la falla A presenta dos porciones visibles. La principal es representada por dos fallas en el extremo sur a suroeste; su orientación es 85/162, con relleno de hematita, limonita y arcillas y apertura de 0,5 cm. La segunda corresponde a tres fallas en el extremo sureste; su dirección aproximada es 70/184, está rellena de arcillas, limonita, calcita y hematita y la apertura varía entre 2-10 cm. Ambas porciones marcan el límite entre la roca de caja y la veta de hierro masivo y están asociadas a las brechas presentes en lugar; al igual que en el nivel 2 y superficie, se observan

estructuras vetiformes paralelas a la falla. En particular se asocian a una veta falla que cruza el sector sur del nivel, uniendo las dos porciones de la falla A, la que aparece como línea segmentada en la Figura 3-3.



**Figura 3-6: Vista hacia el este de componente de estructura componente de Falla A en Nivel 2 (resaltada en blanco).**

Una característica común a casi todos los niveles es el control geológico que ejerce esta falla, conformando el límite sur de la veta de hierro masivo y de las brechas hidrotermales asociadas. En superficie, donde no se observa la veta, la falla separa andesitas mineralización baja y muy baja. Esto, junto a la continuidad espacial de las fallas que la componen y la orientación, es la principal razón para considerarlas una única estructura. Su orientación es aproximadamente 80/180.

La mayor variación que presenta es en el espesor, que cambia tanto a lo largo del manto como rumbo, aumentando hacia el Este y al acercarse a superficie, en un rango de 0,5 cm-3 m. Asimismo, los rellenos presentan diferencias, principalmente por la aparición esporádica de yeso y calcita en algunos sectores, manteniéndose hematita, arcillas, limonita y magnetita como rellenos principales.

El largo de la falla en el sentido del manto se estimó por medio de las cotas en que se observa. El punto más bajo corresponde al nivel 3, a 776 msnm y el más alto se encuentra en superficie a 944 msnm; con esto se calcula una extensión mínima en el manto de 170 m. Se calcula que el largo en el rumbo alcanza 300m. El resumen de sus características se encuentra en la Tabla 3-3.

### 3.2.2 Falla B

Esta falla, de orientación 81/120, se ubica en el extremo oeste de la zona estudiada; por esta razón sólo es observable en superficie y en el nivel 3, ya que los niveles 1 y 2 se encuentran más al este. Su extensión vertical es de 120 m, según se infiere de la cota máxima y mínima en la que se observa.

En superficie aparece representada por tres fallas. Éstas se encuentran en el lado oeste del rajo, con orientación aproximada de 80/112. Los rellenos están compuestos por hematita, arcillas y magnetita y el espesor medio es de 20 cm, siendo curva a nivel macro y planar a nivel micro. En la Figura 3-7 se puede observar esta falla principal en el rajo.



**Figura 3-7: Vista al NW del Rajo Carmen. En el centro (en rojo) puede observarse la falla B atravesando tres bancos.**

Se reconoce en el sector más occidental del Nivel 3, en una falla de 30 m de extensión visible (Figura 3-8), orientación 48/140 y cuyo relleno es hematita y arcillas; se asocia además a una falla de bajo ángulo en el mismo nivel, que presenta relleno de hematita, limonita y arcillas.

Estas fallas se correlacionan como parte de la misma estructura principal (B) debido a la ubicación y semejanzas en relleno, rumbo, rugosidad y extensión. El espesor aumenta hacia la superficie, tal como ocurre con la falla A; por otra parte, la variación en el ángulo de manto indica que la falla B es lítrica. Tiene continuidad en el manto de 120m aproximadamente y se pueden observar 60 m de continuidad en el

rumbo; la falla no es interrumpida por otras estructuras en dirección visible. La Tabla 3-3 muestra las características de la falla B.



Figura 3-8: Vista parcial al noroeste de falla F11, que representa la porción subterránea (Nivel 3) de Falla Principal B.

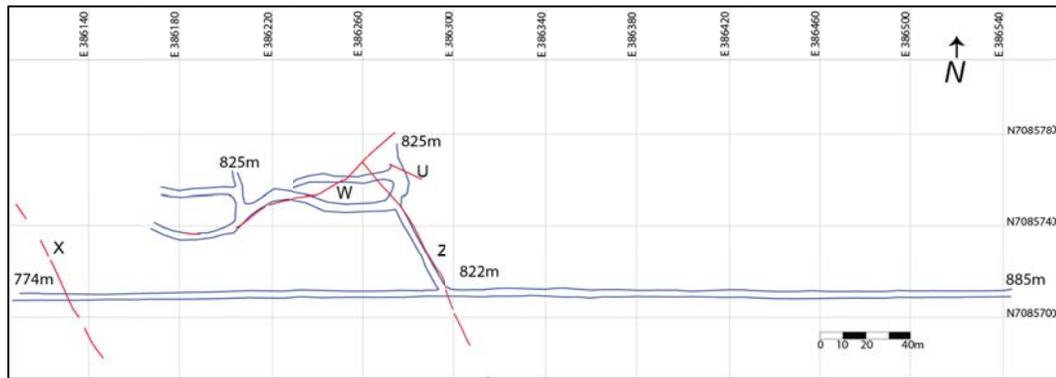
Tabla 3-3: Resumen fallas principales Mina Carmen

Falla	Orientación general	Categoría	Niveles en que aparece	Fallas que la componen	Extensión visible en el manto (m)	Extensión visible en el rumbo (m)
A	EW	Principal	1	F53	170	300
			2	F34, F55, F56, F57, F59, F60, F62		
			3	F59, F61, F30, F74A, F74B		
			Superficie	F10, F16, F42		
B	NE	Principal	3	F11, F68	120	60
			Superficie	F21, F37, F38		

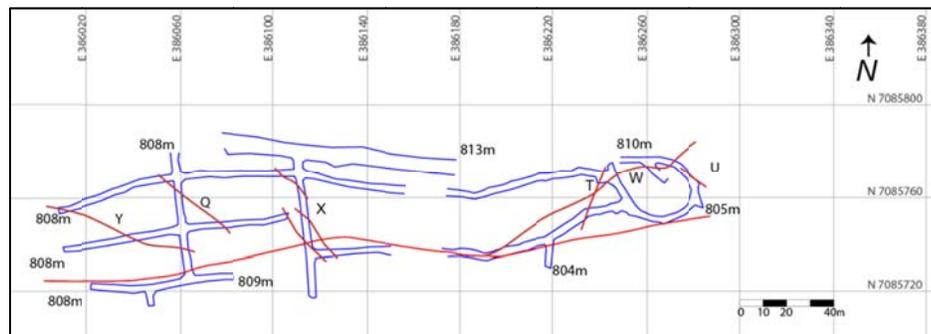
### 3.3 Fallas importantes

Además de las fallas principales, se definió un grupo de fallas importantes, las que se distribuyen en las galerías subterráneas. Esta distinción se realizó tras analizar las plantas por nivel y reconocer continuidad espacial en algunas estructuras, a través de las galerías o incluso niveles; en estos casos, si las características levantadas eran consistentes entre sí, se determinó que constituyen una única estructura. En general

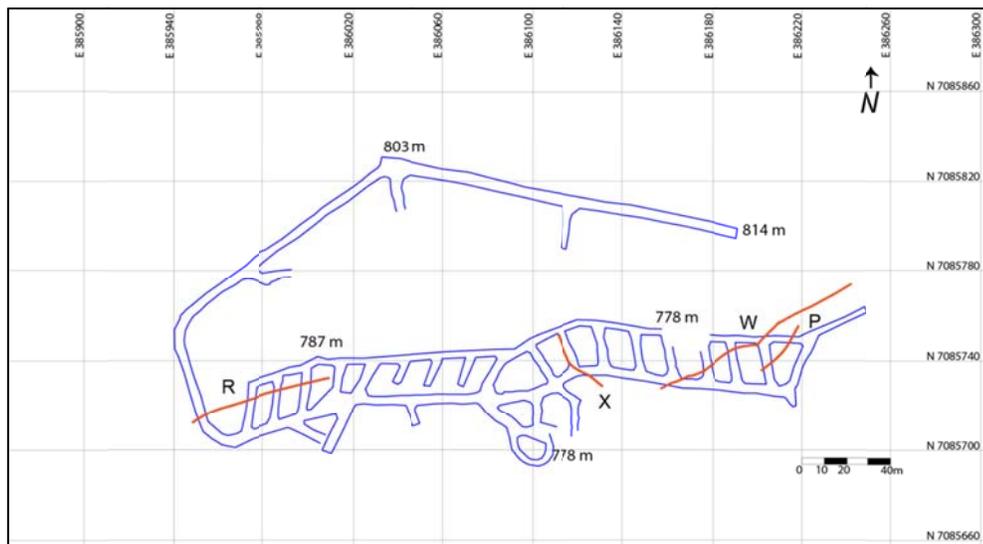
superan los veinte metros; es posible identificar subsistemas a partir de ellas. Se observan en la Figura 3-9, Figura 3-10 y Figura 3-11.



**Figura 3-9: Fallas W, Z, X y U en Nivel 1.**



**Figura 3-10: Falla Y, Q, X, T, W y U en Nivel 2.**



**Figura 3-11: Fallas W, P, X y R en Nivel 3.**

### **3.3.1 Falla W**

Corresponde al conjunto de fallas que controlan el sector SE de la veta de hierro masivo, con grandes variaciones en el manteo, haciéndose subvertical al alcanzar los niveles inferiores; su forma es curva y su rugosidad a nivel micro es planar rugosa. Se identifica en los niveles 1, 2 y 3 (5 fallas en total). Presenta rellenos de arcilla, hematita, limonita y calcita, esta última sólo en el Nivel 1, con un espesor entre 0.3-1 cm. Se extiende por 50 m en el rumbo y 55 m en el manteo.

### **3.3.2 Falla P**

Se identifica en el Nivel 3 con orientación 40/120, aproximadamente paralela al límite SE de la veta de principal de hierro masivo. Está formada por dos fallas, es curva, su espesor es de 1cm y su relleno es arcillas, limonita y calcita y yeso. Se extiende por 20 metros a lo largo del rumbo, variando su rugosidad de rugosa planar a estriada planar.

### **3.3.3 Falla T**

Se presenta en el Nivel 2, con orientación 60/112. Está formada por tres fallas estriadas, su forma es ondulada. La apertura de la falla T es de 0.5 cm y tiene rellenos de calcita, arcilla, magnetita y hematita. Atraviesa andesitas y hierro masivo, alcanzando 22 metros de continuidad en el rumbo.

### **3.3.4 Falla Z**

Se observa en el Nivel 1, extendiéndose a lo largo de 65 m. Está integrada por seis fallas en la rama NNW del nivel, cuyos manteos varían entre 37° y 90°; su orientación general es 75/63 y presenta relleno de arcilla, yeso, calcita, limonita y hematita, con espesor medio de 2 cm. Su forma es curva y la rugosidad a pequeña escala es variable, con tendencia a ondulada e irregular. Se presenta en andesitas.

### **3.3.5 Falla X**

Se identifica en los niveles 1, 2 y 3. En el nivel 2 está compuesta por tres pares de fallas, que tienen orientación media 20/44, 43/51 y 68/52 respectivamente; en los niveles 1 y 3 está integrada por una sola estructura. Las fallas tienen rellenos de arcillas, hematita y limonita, con apertura que varía entre 0,3-2 cm. En conjunto forman un sistema local cuyo manteo disminuye hacia el NE, con continuidad a lo largo del rumbo de 43 m. La forma es curva y la rugosidad micro es planar, tanto estriada como lisa.

### **3.3.6 Falla Q**

Se identifica en el Nivel 2, con orientación 44/44, similar a la de la falla X, en particular a la rama central. Está integrada por dos fallas, a nivel macro es curva y la rugosidad micro es planar. Su espesor es de 0,5cm y su relleno consiste en arcillas, hematita, limonita, calcita y yeso. Se extiende por 36 m en el rumbo; sin ser cortada por otras estructuras.

### **3.3.7 Falla R**

Falla ondulada que se encuentra en el nivel 3 y controla en parte el límite NW entre veta de hierro masivo y andesita, con orientación general de 60/160. Está integrada por cuatro fallas en el sector suroeste. El relleno está compuesto de arcillas, limonitas, hematita y magnetita, con espesor que varía entre 0.3-4 cm. Alcanza 50 m en el rumbo, la rugosidad a nivel micro varía de planar rugosa a ondulada rugosa.

### **3.3.8 Falla Y**

Se presenta en el Nivel 2, formada por tres fallas en el sector oeste. A lo largo del rumbo presenta variaciones de relleno y manteo; la orientación media es de 65/190, con manteo entre 50°-75° y el relleno está compuesto de arcillas, limonita y hematita, con espesor de 10-35 cm y apariencia bandeada; también tiene óxidos de Cu asociados. Localmente es contacto entre hierro masivo y brecha. Se extiende por aproximadamente 60 m a lo largo del rumbo.

### **3.3.9 Falla U**

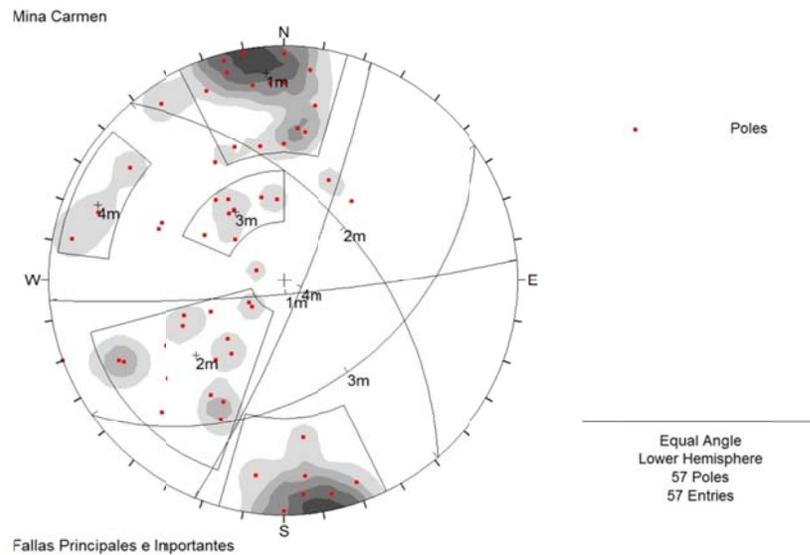
Se reconoce por medio de dos fallas estriadas en los Niveles 1 (zona centro-norte) y 2 (sector noreste). La diferencia en ángulos de manteo, de 42° a 66° (de mayor a menor profundidad), indica una falla lístrica, lo que puede apreciarse en la falla del nivel 2. La orientación aproximada es 66/30 y tiene relleno de hematita, arcillas, jarosita y calcita, con espesor de 2 a 5 cm. Se extiende por 22 m en el manteo y 20 m en el rumbo.

La Tabla 3-4 presenta un resumen de las características de estas fallas.

**Tabla 3-4: Resumen fallas importantes Mina Carmen**

Falla	Orientación general	Categoría	Niveles en que aparece	Fallas que la componen	Extensión visible en el manto (m)	Extensión visible en el rumbo (m)
W	NE	Importante	1	F49, F50, F54	55	50
			2	F12		
			3	F31		
P	NE	Importante	3	F14, F28	3	20
T	NE	Importante	2	F13, F26, F14	4	22
Z	NNW	Importante	1	F29, F32, F34, F35, F36, F52	3.5	65
X	NNW	Importante	1	F42A	34	43
			2	F72, F87; F84,F86; F85,F98		
			3	F33		
Q	NW	Importante	2	F94, F102	4	36
R	ENE	Importante	3	F49, F54, F58, F64	6	50
Y	NW	Importante	2	F113, F69, F90	5	60
U	NW	Importante	1	F48	22	20
			2	F5		

Al llevar a un estereograma (Figura 3-12) tanto las fallas importantes como las principales, se observan cuatro orientaciones preferenciales (Tabla 3-5):



**Figura 3-12: Estereograma fallas importantes y relevantes**

**Tabla 3-5: Orientaciones preferenciales fallas principales e importantes.**

Set	Dip	DipDir	Rumbo	Manteo	Rango	
					Dip	Dipdir
1	83	175	N85E	83SE	57-90 61-90	154-196 334-016
2	52	049	N38W	52NE	16-81	019-75
3	39	145	N55E	39SE	28-50	114-180
4	81	112	N22E	81SE	74-88	097-131

### 3.4 Subsistemas de fallas

Se pueden agrupar algunas de las fallas descritas en la sección anterior:

Subsistema 1: integrado por las fallas W, P y T, es paralelo a la falla principal B., formando cuñas con la falla A y controlando parcialmente mineralización. Aparece en los sectores orientales de los niveles 1, 2 y 3. También se incluyen en este subsistema a cuatro fallas en superficie, las que aparecen en las cercanías de la falla B, en el sector occidental del rajo.

Subsistema 2: lo componen las fallas Z, X y Q. Su orientación es NNW, con manteos hacia el NE. que van de subhorizontales a subverticales. En el caso de la falla X, el ángulo de manteo de sus integrantes disminuye hacia el este. Una falla del Nivel 1, límite de dominio, tiene la misma tendencia, pero manteea hacia el SW.

Las figuras con el detalle del levantamiento estructural de los niveles 1, 2, 3 y Rajo Mina Carmen se encuentran en el Anexo E (Figura 6-9, Figura 6-10, Figura 6-11 y Figura 6-12).

La Figura 3-13 muestra un perfil esquemático E-W de Mina Carmen, a lo largo de la coordenada N 7085740, entre E 385870 y E 386320. Este perfil cruza los tres niveles subterráneos y superficie, tal como se observa en la Figura 3-14; atravesando los dominios IV, V y VI. Los contactos entre las distintas unidades se infirieron a partir de los contactos observados en los distintos niveles; sin embargo, en la parte superior al nivel 1 se asumió que la veta de hierro se comportaba igual en la vertical que en la horizontal y por lo tanto se incluyó una transición a hierro semimasivo antes de llegar a la roca de caja, que corresponde a andesita. También se incluyen las fallas importantes y principales que lo cortan. En particular se puede ver andesita al Este de la falla B; en este sector la falla divide entre zonas que presentan mineralización en forma de cúmulo o diseminado (al E) de sectores con nulo contenido de hierro (al W).

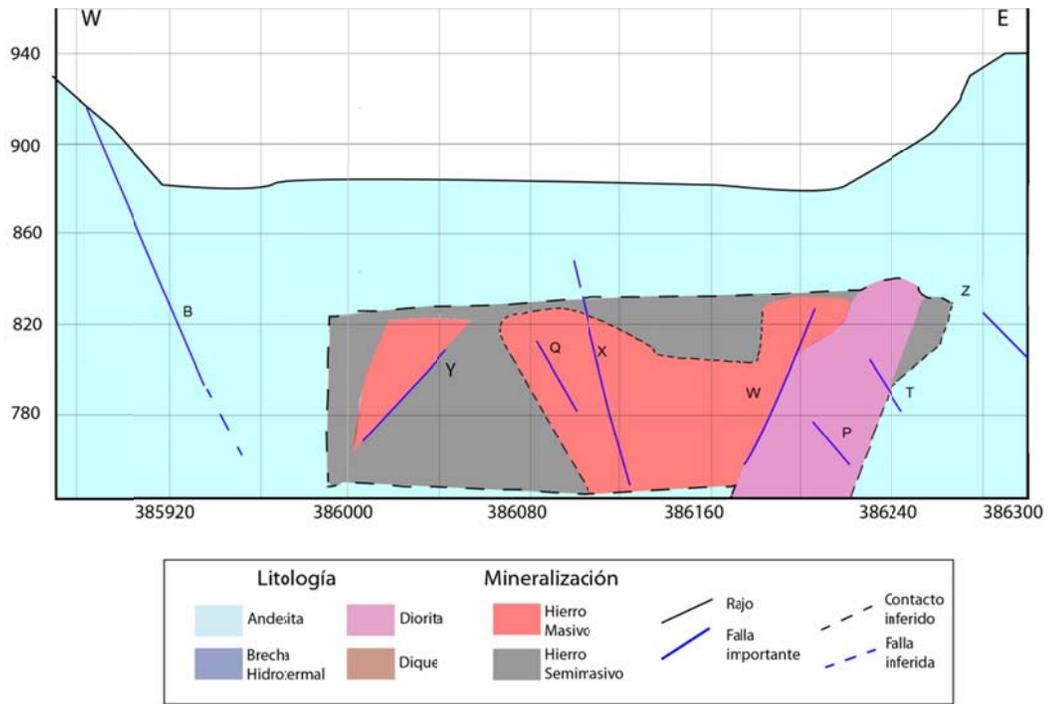


Figura 3-13: Perfil esquemático E-W a lo largo de la coordenada N 7085740.

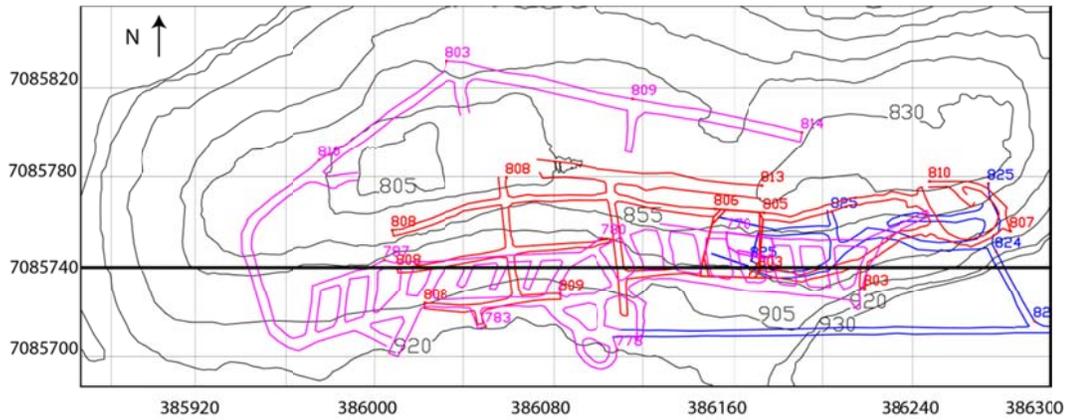


Figura 3-14: Ubicación Perfil con respecto a niveles subterráneos y rajo mina Carmen.

### 3.5 Ventanas Geotécnicas

En total se realizaron 33 ventanas geotécnicas, siguiendo la siguiente distribución: ocho ventanas en el nivel 1 (A1 a A8); siete en el nivel 2 (B1 a B7), diez en el nivel 3 (C1 a C10) y ocho en superficie (V1 a V8). Cada ventana se levantó con el objetivo de que fuera representativa del macizo rocoso del sector en que se encontraba, de modo que, en lo posible, cada variación estuviese incorporada en la recolección de parámetros geotécnicos. Se destaca que, en el caso de las galerías subterráneas, se registraron las estructuras de ambas paredes del túnel así como las del techo, formando una celda. El largo de las ventanas es variable; las dimensiones se encuentran en la

Tabla 3-6.

**Tabla 3-6: Ubicación y dimensiones de las ventanas geotécnicas levantadas en Mina Carmen.**

Ventana	Ubicación	Largo (m)	Alto (m)	Ancho (m)	Ventana	Ubicación	Largo (m)	Alto (m)	Ancho (m)
A1	Nivel 1	6,5	3	2,5	C3	Nivel 3	5,6	4	3,5
A2	Nivel 1	10,5	3	3	C4	Nivel 3	8,2	5	4
A3	Nivel 1	10	3	3	C5	Nivel 3	9,4	6	4,5
A4	Nivel 1	13,8	3,5	3	C6	Nivel 3	6	5	3,5
A5	Nivel 1	5	3,5	2,5	C7	Nivel 3	3	5	4,5
A6	Nivel 1	4	3,5	2,5	C8	Nivel 3	5,9	6	4,5
A7	Nivel 1	5	3	2,5	C9	Nivel 3	5,8	3,5	3
A8	Nivel 1	9	6	3	C10	Nivel 3	4,1	4	4
B1	Nivel 2	6,2	3	3	V1	Superficie	10	8	4
B2	Nivel 2	9,9	3	3	V2	Superficie	17	10	4
B3	Nivel 2	6,6	3	3	V3	Superficie	8	5	4
B4	Nivel 2	11,4	7	5	V4	Superficie	14	7	4
B5	Nivel 2	7,6	3	3	V5	Superficie	14	8	3
B6	Nivel 2	5,2	3	2,5	V6	Superficie	14	10	2
B7	Nivel 2	8,5	7	4	V7	Superficie	15	8	3
C1	Nivel 3	8,5	7	5	V8	Superficie	13	5	4
C2	Nivel 3	6,5	3	2,5					

Como ya se explicó en la metodología, cada ventana incluye identificación de la litología, alteración de la roca, IRS, GSI, RQD e identificación y descripción de estructuras presentes. Un resumen de los datos registrados pueden verse en la Tabla 3-7 . La ubicación de las ventanas en cada nivel puede observarse en la Figura 3-15, Figura 3-16, Figura 3-17 y Figura 3-18.

**Tabla 3-7: Resumen ventanas geotécnicas Mina Carmen**

Ventana	Litología	Alteración	IRS Ponderado	N° sets de estructuras	N° total fracturas	RQD	GSI (observado in-situ)
A1	AND	ARG	83	3	8	89	VB/F 45-50
A2	AND	CHL	100	2	8	87	VB/F 45-50
A3	AND	ARG	90	3	7	92	B/F 50-55
A4	AND	LIM	46	3	7	91	VB/F 45-50
A5	AND	SIL	80	3	12	75	VB/F 40-45
A6	AND	SIL	35	2	12	76	VB/F 40-45
A7	AND	CHL	68	3	8	76	VB/F 45-50
A8	DIO	CALC	88	2	6	95	B/F 55-60
B1	SMFE	CALC	87	3	9	85	VB/F 50-55
B2	DIO	ARG	108	3	4	90	VB/F 45-50
B3	DIO	ARG	80	3	9	87	VB/F 45-50
B4	BXX	CHL	90	3	11	76	VB/F 45-50
B5	BXX	SIL	50	3	11	80	VB/P 35-40
B6	BXX	CALC	120	3	8	87	VB/F 40-45
B7	SMFE	CALC	125	3	7	94	B/F 50-55
C1	BXX	CALC	46	3	6	94	VB/F 45-50
C2	DIO	SIL	54	3	13	74	VB/F 40-45
C3	DIO	CALC	60	3	11	75	VB/F 40-45
C4	BXX	BXX	72	2	12	76	VB/F 45-50
C5	BXX	CALC	120	3	8	88	VB/F 40-45
C6	DIO	ARG	90	3	9	86	VB/F 40-45
C7	BXX	CALC	60	3	7	92	VB/F 40-45
C8	MFE	CALC	88	3	8	84	VB/F 45-50
C9	MFE	CALC	117	2	9	90	B/F 50-55
C10	MFE	CALC	80	2	6	94	B/F 50-55
V1	AND	ARG	80	2	2	50	VB/F 40-45
V2	BXX	LIM	70	3	3	70	BD/F 40-45
V3	AND	ARG	70	2	3	60	VB/F 45-50
V4	AND	ARG	100	3	3	80	VB/F 45-50
V5	AND	ARG	70	3	4	80	VB/F 40-45
V6	AND	ARG	70	3	7	60	VB/F 40-45
V7	AND	ARG	70	2	5	75	VB/F 40-45
V8	AND	ARG	70	3	7	70	VB/F 40-45

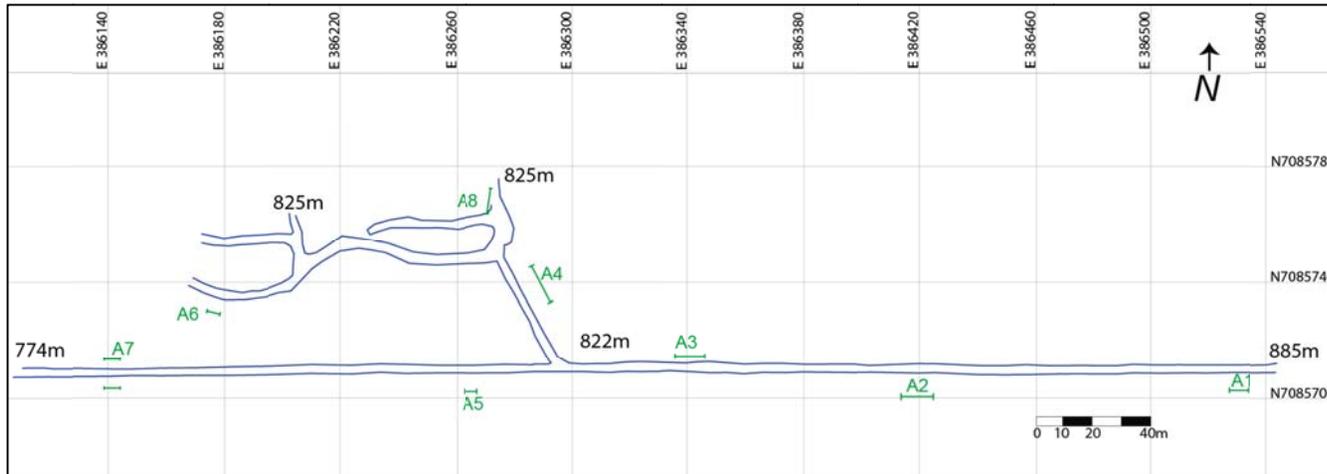


Figura 3-15: Ubicación de ventanas geotécnicas en Nivel 1.

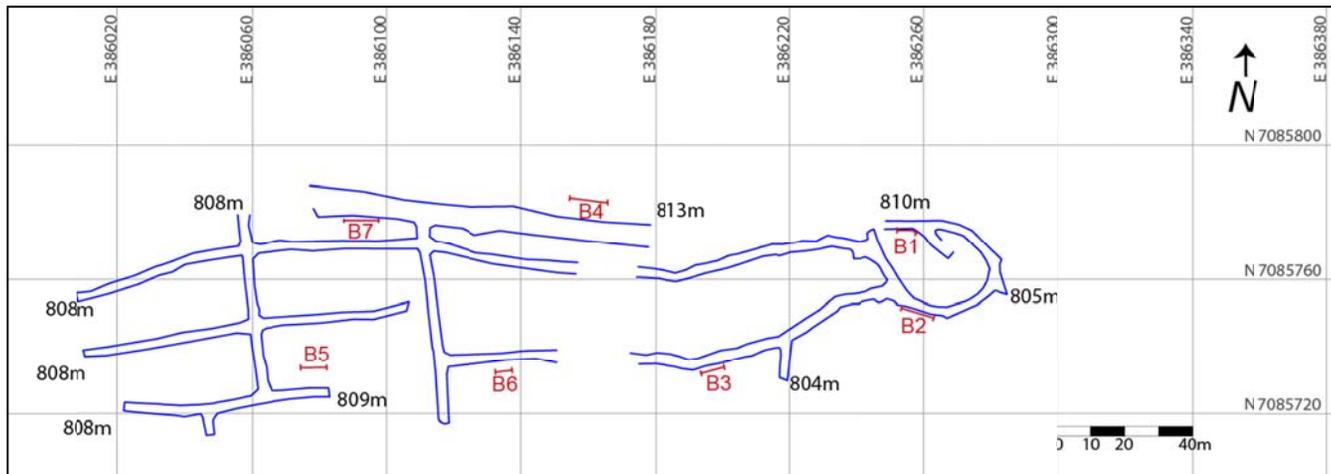
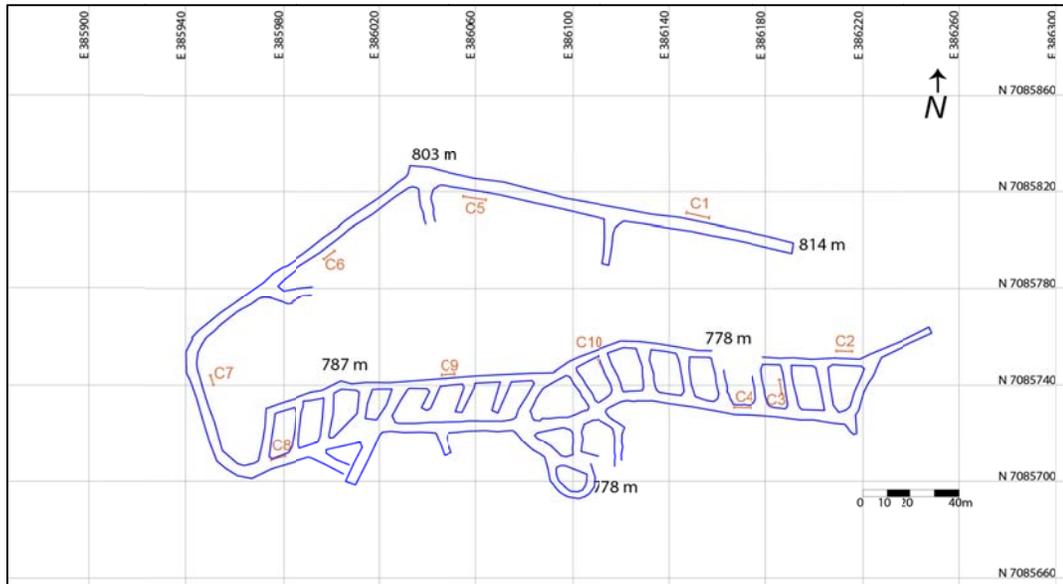
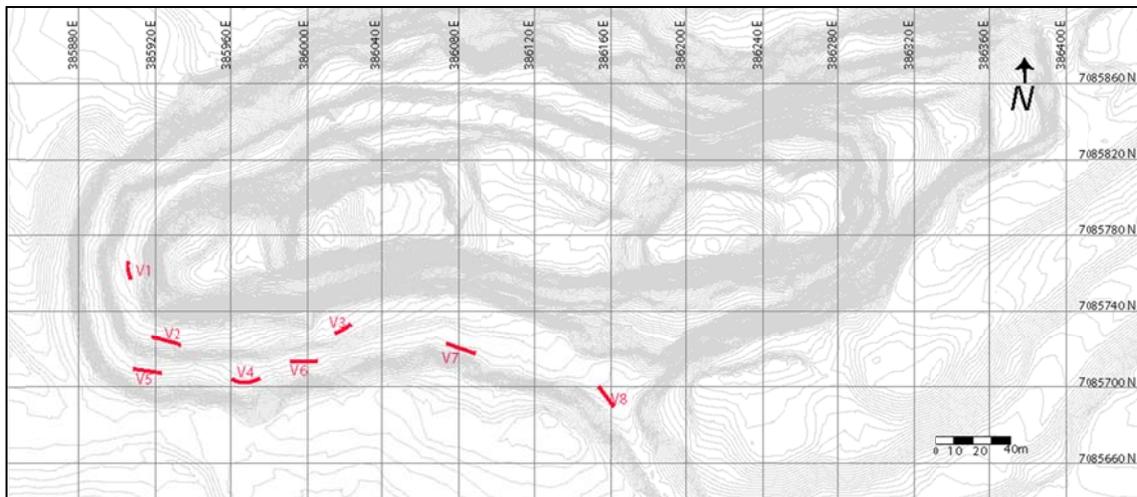


Figura 3-16: Ubicación de ventanas geotécnicas en Nivel 2.



**Figura 3-17: Ubicación de ventanas geotécnicas en Nivel 3.**



**Figura 3-18: Ubicación de ventanas geotécnicas en Rajo Carmen.**

En general, las ventanas presentan bloques cuyo tamaño ha sido definido como medio (3-10 fracturas por  $m^3$ , ISRM 1978), presentándose bien trabados, es decir, la rugosidad y relleno de las discontinuidades dificultan el desplazamiento de los bloques.

### 3.6 Dominios Estructurales

En este trabajo, un dominio estructural se entiende como una zona en la cual las propiedades físicas y geométricas del macizo son estadísticamente homogéneas. Debe cumplir las siguientes condiciones:

- Delimitada por estructuras y/o contactos litológicos.
- Predominancia de un tipo litológico y de alteración.
- Que tenga un arreglo estructural característico (geometría, tamaño de bloques unitarios y resistencia de los sistemas de discontinuidades geológicas).
- Similar grado de competencia de roca intacta.

Se integró el modelo geológico existente (SRK 2010) con la información levantada de litología, estructuras, ventanas geotécnicas y sondajes. A partir de estos datos y utilizando como límites fallas importantes o principales y cambios de litología, se definieron seis dominios estructurales en Mina Carmen. Su distribución puede observarse en la Figura 3-19, Figura 3-20, Figura 3-21 y Figura 3-22.

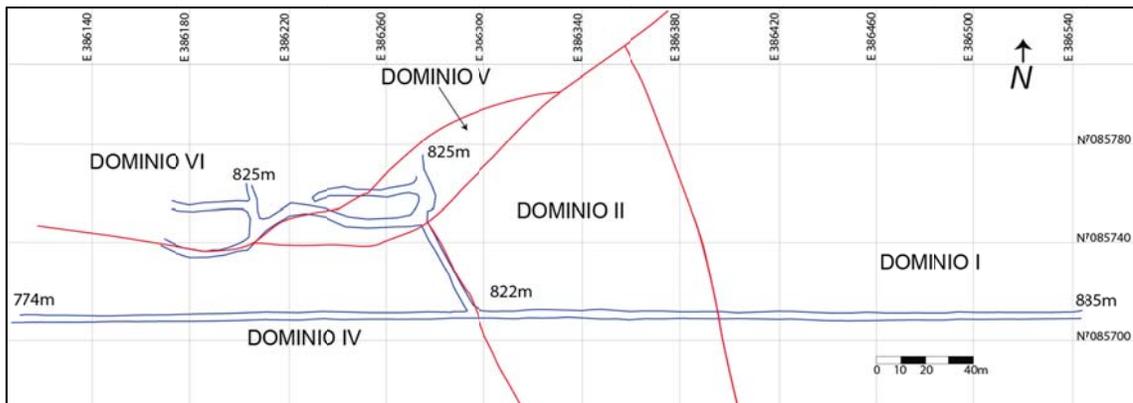


Figura 3-19: Dominios estructurales en Nivel 1.

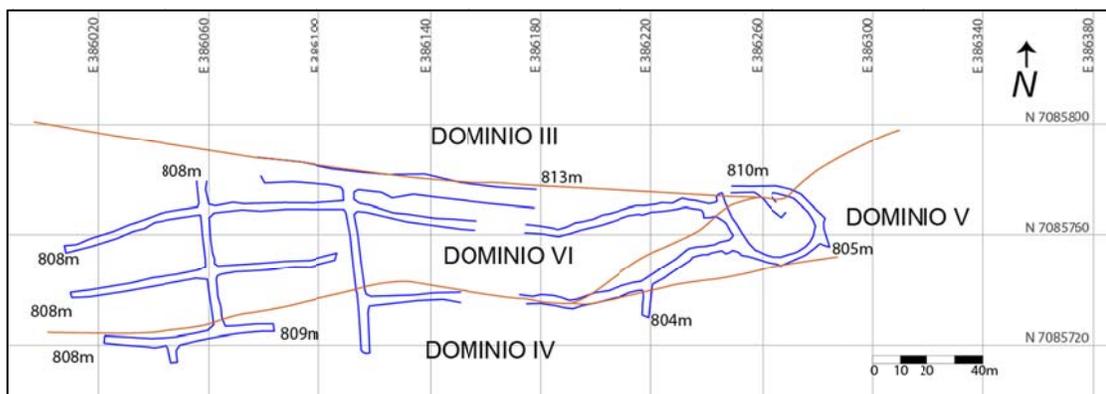
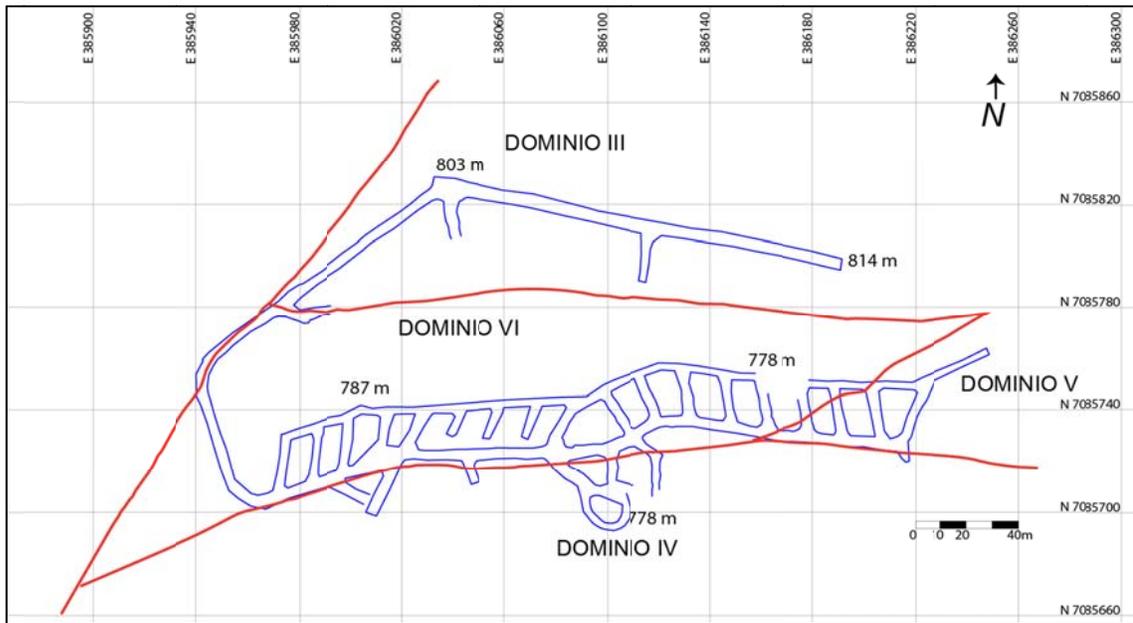
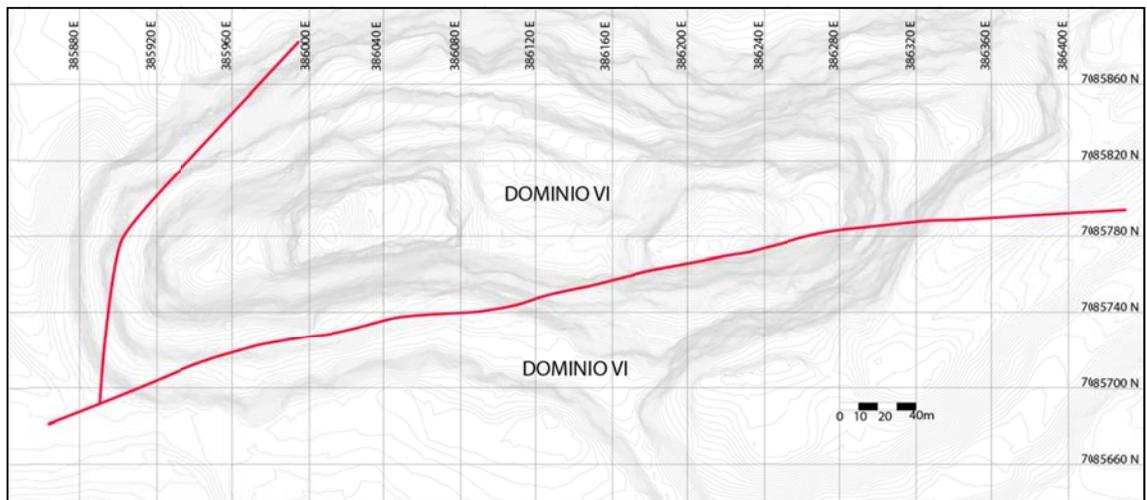


Figura 3-20: Dominios estructurales en Nivel 2.



**Figura 3-21: Dominios estructurales en Nivel 3.**



**Figura 3-22: Dominios estructurales identificados en Rajo Carmen.**

### 3.6.1 Dominio I

Es el dominio más oriental; esto permite reconocerlo sólo en el Nivel 1, limitando al oeste con el Dominio II por medio de una falla tipificada como importante (con apertura de 10 a 15 cm). Agrupa andesitas y escasa diorita de grano grueso, afectadas por silicificación y cloritización; presentan muy baja mineralización, principalmente en diseminado.

Se levantaron 21 fallas y 32 diaclasas en este dominio, las que se graficaron en el estereograma de la Figura 3-23. Se aprecian seis sets de estructuras. El set uno es NW, subvertical (73/133, con 18 polos); el set 2 es una variación de ángulo intermedio del primero, manteando al SE (47/188, con 9 polos) y el set 3 tiene orientación NW con ángulo intermedio (59/049, 7 polos). En conjunto forman los sets principales.

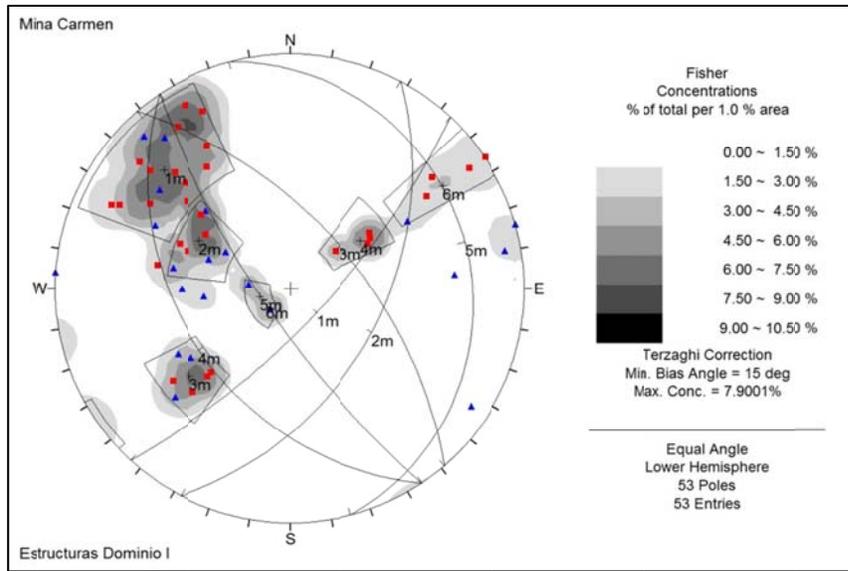


Figura 3-23: Estereograma de estructuras Dominio I. En rojo: diaclasas; en azul, fallas.

El cuarto y el sexto set tienen orientación NW, con manteos al SW de ángulos intermedios y subverticales (40/236 y 76/235 respectivamente, formados en gran parte por diaclasas). El quinto set es subhorizontal (15/075).

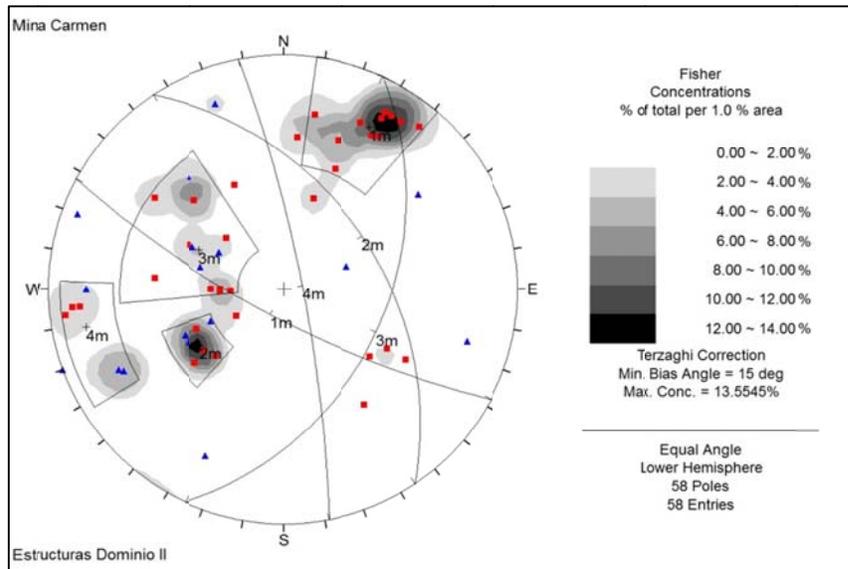
La Tabla 3-8 muestra el resumen de estructuras del Dominio I.

Tabla 3-8: Sets estructurales de Dominio I. Incluye diaclasas y fallas.

Dominio I						
Set	Dip	DipDir	Rumbo	Manteo	Rango	
					Dip	DipDir
1	73	133	N43E	73SE	57-88	111-155
2	47	118	N28E	47SE	31-56	096-118
3	59	049	N41W	59NE	48-70	035-063
4	40	236	N34W	40SW	22-52	217-246
5	15	075	N15W	15NE	10-22	029-102
6	76	235	N35W	76SW	57-90	227-241
					88-90	047-061

### 3.6.2 Dominio II

Se ubica en el sector sureste de Mina Carmen, inmediatamente al oeste del Dominio I; al igual que éste, sólo se reconoce en el Nivel 1. Está limitado al este por el Dominio I y al oeste por la falla Z. Lo componen andesitas con silicificación o argilización, con trazas de mineralización en diseminado y vetillas.



**Figura 3-24: Estereograma de estructuras Dominio II. En rojo: diaclasas; en azul, fallas.**

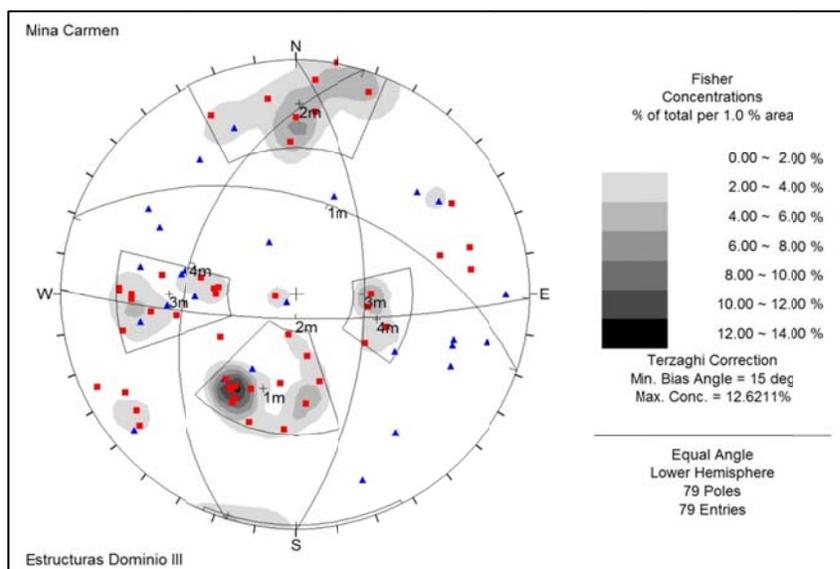
El estereograma de la Figura 3-24 se realizó a partir de las 17 fallas y 41 diaclasas levantadas en el dominio y muestra cuatro sets de estructuras. El primero está formado por diaclasas, tiene orientación NW manteniendo al SW (76/208, 13 polos); el segundo es NW, manteniendo al NE con ángulo medio (46/056, 9 polos). El tercer set, es de orientación NE y manta al SW (43/115, 14 polos). Por último, el cuarto set es subvertical, manteniendo al noreste, (81/079, 7 polos). La Tabla 3-9 incluye un resumen del dominio.

**Tabla 3-9: Sets estructurales de Dominio II. Incluye diaclasas y fallas**

Dominio II						
Set	Dip	DipDir	Rumbo	Manteo	Rango	
					Dip	DipDir
1	76	208	N62W	76SW	56-90	188-221
2	46	056	N34W	46NE	36-58	041-071
3	43	115	N25E	43SE	22-70	085-147
4	81	079	N11W	81E	72-87	058-092

### 3.6.3 Dominio III

Se encuentra en el sector norte del depósito, limitando al sur con la veta principal de hierro masivo por medio de una falla E-W en el límite norte del nivel 2 y otra en el nivel 3; la primera se presenta en un sector del nivel 2 que se encuentra a la misma cota que la entrada principal del nivel 3. La ubicación de este dominio impide que se observe fuera del nivel 3. Está conformado principalmente por brechas hidrotermales con matriz de magnetita, afectadas por alteración calcosódica. La mineralización aumenta con respecto a los dominios ya descritos, apareciendo asociada mayormente a matriz, cúmulos y vetas. Además se presentan bolsones de hierro que pueden alcanzar 10 metros de extensión.



**Figura 3-25: Estereograma de estructuras Dominio III. En rojo: diaclasas; en azul, fallas.**

Se registraron 26 fallas y 53 diaclasas en este dominio, las que se incluyeron en el estereograma de la Figura 3-25. Se observan cuatro sets de estructuras. El primero es de orientación WNW manteniendo al NE (46/019) y el segundo es EW, subvertical (78/181); ambos se aprecian predominantemente en diaclasas, pudiendo ser relacionados con la falla A. El tercer set es NS con manteos al E (57/090) y el cuarto set es NE con manteo al W (40/287); ambos sets podrían relacionarse con el sistema de falla de Atacama. En la Tabla 3-10 se incluye el resumen del dominio.

**Tabla 3-10: Sets estructurales de Dominio III. Incluye diaclasas y fallas**

Dominio III						
Set	Dip	DipDir	Rumbo	Manteo	Rango	
					Dip	DipDir
1	46	019	N71W	46NE	18-62	342-045
2	76	181	N81W	76S	64-90	153-203
					88-90	333-023
3	57	090	NS	57E	32-75	071-104
4	40	287	N17E	40NW	28-53	257-306

### 3.6.4 Dominio IV

Se ubica en el sector SW de Mina Carmen, al sur de la veta principal de Fe. Es abarcado por los niveles 1 y 3, además de la superficie. Está limitado al norte por la falla A, al oeste por la falla B y al este por la falla Z. Comprende principalmente andesitas, con ocasionales tramos de diorita con características hipabisales; está afectado por cloritización y parcialmente por argilización. La mineralización es baja, presentándose como cúmulos y diseminado que bordea el 5%.

El estereograma del dominio IV (Figura 3-26) se construyó con 56 diaclasas y 59 fallas. Se aprecian tres sets en el estereograma del dominio. El set 1, es EW, subvertical, con orientación 89/178; está formado por diaclasas y fallas (27 polos). El

segundo set, de rumbo NNW, mantea al NE con ángulo medio (41/66, 24 polos). El set 3 es la variación de ángulo intermedio del set 1, con diaclasas y fallas manteando al S (7 polos). El primer y tercer set están influenciados por la falla A. El resumen se encuentra en la Tabla 3-11.

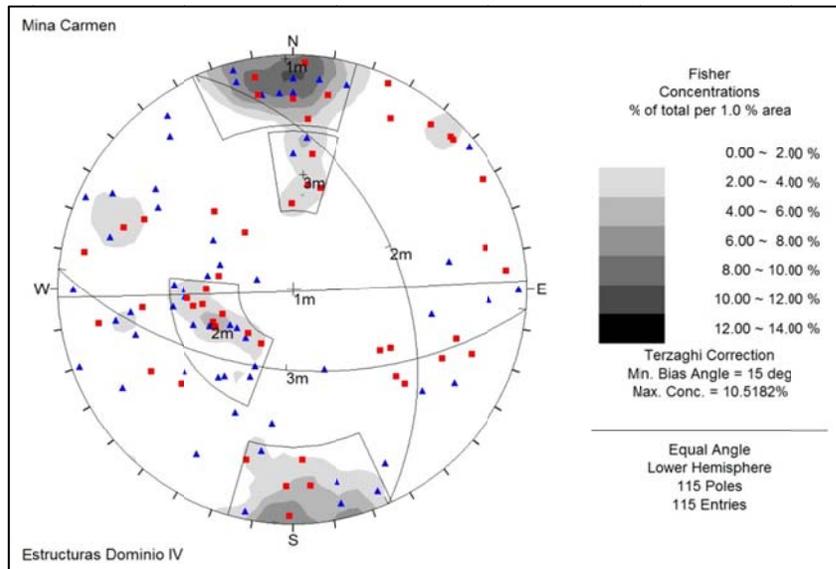


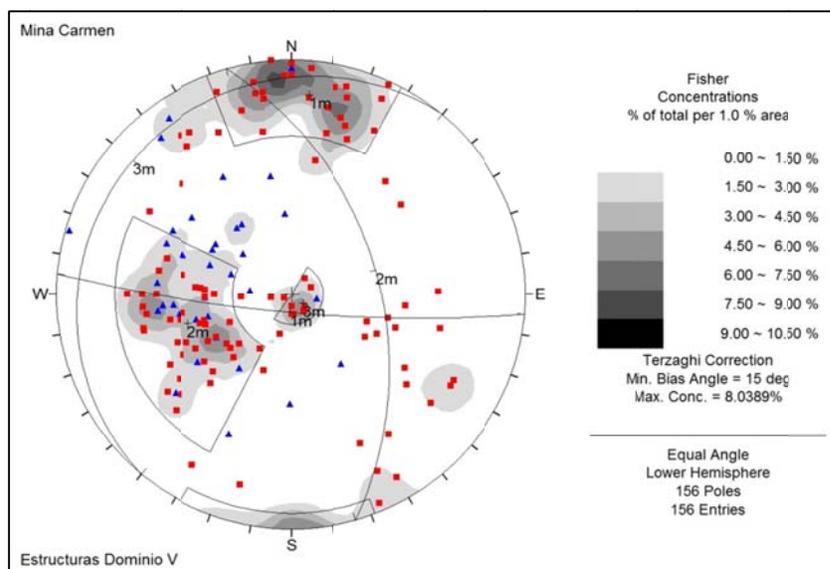
Figura 3-26: Estereograma de estructuras Dominio IV. En rojo: diaclasas; en azul, fallas.

Tabla 3-11: Sets estructurales de Dominio IV. Incluye diaclasas y fallas

Dominio IV						
Set	Dip	DipDir	Rumbo	Manteo	Rango	
					Dip	DipDir
1	89	178	N88E	89S	70-90	155-196
					68-90	335-046
2	41	66	N24W	41NE	26-56	021-095
3	52	185	N85W	52S	37-68	171-197

### 3.6.5 Dominio V

Se reconoce en los niveles 1, 2, 3, en el sector centro-oriental, al sur del Dominio III y al este del Dominio VI; lo limitan las fallas W al noroeste y A al sur, formando una cuña. Está compuesto mayoritariamente por diorita y andesitas; incluye también zonas con hierro masivo y brechas hidrotermales. Las rocas de este dominio están afectadas por argilización, (especialmente en el nivel 3), silicificación, cloritización y alteración calcosódica. La mineralización es media, asociada a diseminado y ocasionales bolsones.



**Figura 3-27: Estereograma de estructuras Dominio V. En rojo: diaclasas; en azul, fallas.**

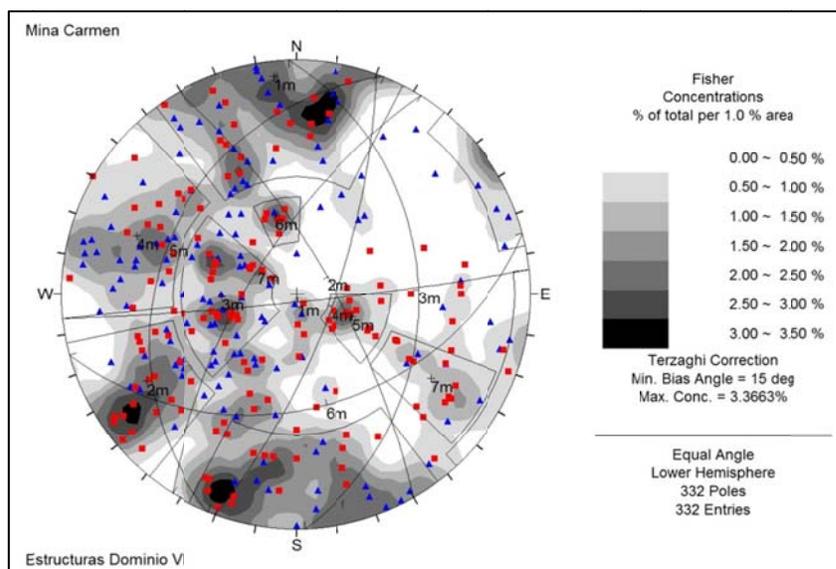
Se cuenta con datos de 119 diaclasas y 37 fallas. El alto número de diaclasas registradas obedece a que de las 33 ventanas realizadas, 6 pertenecen a este dominio. El estereograma muestra tres sets (Figura 3-27). El primero es EW, subvertical y está formado principalmente por diaclasas (26 polos, presenta influencia de la falla A. El segundo sistema es de ángulo medio, manteniendo al NE, con rumbo NWN (63 polos, 49/074). El tercer sistema es horizontal, con orientación 07/310 y se definió con nueve polos. El detalle se incluye en la Tabla 3-12.

**Tabla 3-12: Sets estructurales de Dominio V. Incluye diaclasas y fallas**

Dominio V						
Set	Dip	DipDir	Rumbo	Manteo	Rango	
					Dip	DipDir
1	81	155	N85W	81S	68-90	156-208
					86-90	339-028
2	49	074	N16W	49NE	28-74	027-116
3	07	310	N40E	07NW	01-15	210-035

### 3.6.6 Dominio VI

Se asocia a la veta principal de hierro, incluyendo algunas brechas hidrotermales y hierro semimasivo; se reconoce en los tres niveles subterráneos y en superficie, en la zona centro del Rajo. Limita al sur con la falla A y el dominio IV; al noroeste con la falla B; al SE con la falla W, que lo pone en contacto con el dominio V. Hacia el norte colinda con el dominio III, por medio de una falla del extremo norte del nivel 2, de orientación E-W y una falla del nivel 3, que limita la mineralización.



**Figura 3-28: Estereograma de estructuras Dominio VI. En rojo: diaclasas; en azul, fallas.**

En este dominio los datos analizados (141 diaclasas y 191 fallas) presentan dispersión; se definieron siete sets estructurales, los que se presentan en el estereograma de la Figura 3-28. El primer set es EW, subvertical (86/174, 77 polos), se asocia con la falla A. El set 2, subvertical de rumbo NW, incluye 43 polos. El tercer set es de ángulo medio, NS, manteando al E; está formado por 55 polos. Estos tres conjuntos constituyen los sets principales.

El cuarto set es de orientación NE, con manteos inclinados al NW (46 polos); el quinto set está formado sólo por diaclasas de bajo ángulo, manteando al NW con rumbo NE (29/292, 16 polos). El set 6 mantea al sur con ángulo medio y rumbo ENE (9 polos, en su mayoría diaclasas). El set 7 se presenta como una variación de alto ángulo del set 5; orientación NE, manteando al NW. Los sets 4, 5 y 7 estarían influenciados por la zona de falla Atacama. La Tabla 3-13 sintetiza los datos estructurales del dominio VI.

**Tabla 3-13: Sets estructurales de Dominio VI. Incluye diaclasas y fallas**

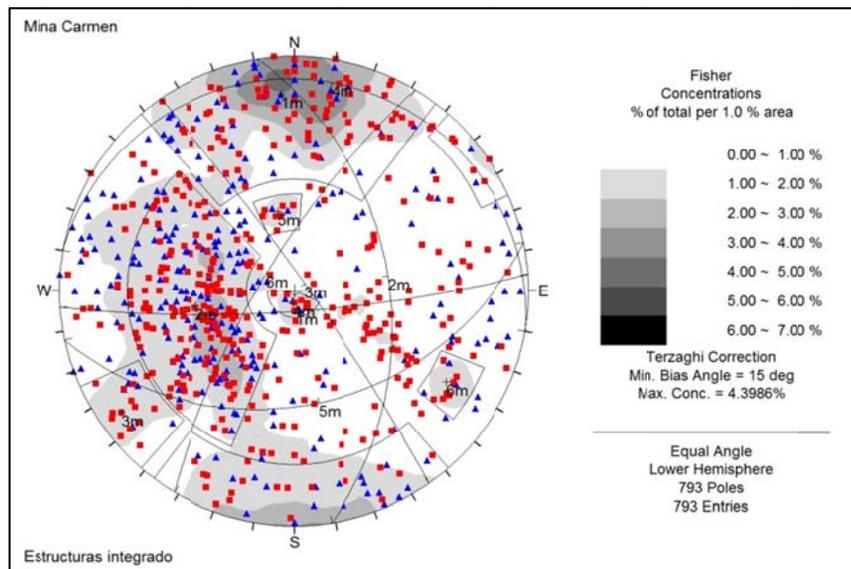
Dominio VI						
Set	Dip	DipDir	Rumbo	Manteo	Rango	
					Dip	DipDir
1	86	174	N84E	86S	53-90 62-90	143-207 323-027
2	76	060	N30W	73NE	57-90 83-90	039-078 219-258
3	35	088	N02W	35E	12-53	045-132
4	72	110	N20E	72SW	56-90 86-90	086-137 266-317
5	29	292	N22E	29NW	16-44	270-317
6	38	165	N75E	38SE	25-45	154-182
7	66	302	N32E	66NW	47-85	291-314

El dominio VI presenta la mayor dispersión encontrada en los dominios, lo que puede obedecer su extensión.

El aumento de datos considerados se debe en parte a que el dominio VI es el más extenso; además, al igual que el dominio V, tiene alta concentración de ventanas geotécnicas.

### 3.6.7 Estructuras Integradas de Mina Carmen

Observando de forma integrada las discontinuidades levantadas, se distinguen seis sets de estructuras (Figura 3-29)



**Figura 3-29: Estereograma de estructuras integradas Mina Carmen**

Los principales son los sets 1 y 2. El primero, de orientación EW (80/176) y con 183 polos de diaclasas y fallas, puede asociarse a la falla A. Esta tendencia se puede observar en los dominios III, IV V y VI; su ausencia en los primeros dos dominios puede relacionarse con la orientación del túnel en que se tomaron los datos, EW. El segundo set, de orientación NNW (46/081) manteniendo al E y con 300 polos de diaclasas y fallas, podría estar influenciado por la relativa cercanía de la Zona de Falla de Atacama; se reconoce en los seis dominios.

El tercer set, subvertical con orientación NW (84/055), se reconoce predominantemente en los dominios II y VI. El set 4 es subhorizontal, formado preferentemente por diaclasas, con un total de 14 estructuras. El set 5 es EW, manteniendo al sur con ángulo intermedio; se identifica en los dominios V y VI. El sexto set, NE manteniendo al NW (74/301), se observa en el dominio VI.

En la

Tabla 3-14 se presenta el resumen estructural de Mina Carmen:

**Tabla 3-14: Sets estructurales de Mina Carmen, integrado. Incluye diaclasas y fallas**

Integrado						
Set	Dip	DipDir	Rumbo	Manteo	Rango	
					Dip	DipDir
1	80	176	N86E	80S	51-90 73-90	139-217 319-037
2	46	081	N9W	46E	23-71	022-136
3	84	055	N35W	84NE	72-90 82-90	041-066 221-246
4	06	010	N80W	06N	02-13	294-090
5	38	168	N78E	38SE	29-45	155-184
6	74	301	N31E	74NW	68-82	292-309

Al comparar los estereogramas de dominios y estructuras integradas con el estereograma de las fallas principales e importantes (Figura 3-12), se puede observar que se presentan orientaciones preferenciales de las últimas se repiten dentro de los dominios y también en el integrado, como se puede observar en la Tabla 3-15: en particular se destaca que los sistemas NW-SE y EW se presentan en la mayor parte de los dominios.

**Tabla 3-15: Presencia de orientaciones preferenciales de fallas principales e importantes en dominios estructurales**

Fallas principales e importantes				Dom I	Dom II	Dom III	Dom IV	Dom V	Dom VI	Integrado
Set	Rumbo	Manteo								
		Ángulo	Dirección							
1	EW	Alto	S			X	X	X	X	X
2	NW-SE	Medio	NE	X	X	X	X	X	X	X
3	NE-SE	Medio	SE		X				X	X
4	NNE-SSW	Alto	SE	X						

El predominio de los sistemas EW, asociados a la falla A, se puede apreciar también al comparar los sistemas principales por dominio (Tabla 3-16).

**Tabla 3-16: Comparación sistemas principales de estructuras por dominio.**

Dominio	Sistema Principal
Dominio I	NE-SW, manteo al SE ángulo intermedio
Dominio II	NW-SE, manteo al SW ángulo intermedio
Dominio III	WNW-ESE, manteo intermedio al NE
Dominio IV	EW, manteo subvertical
Dominio V	EW, manteo subvertical
Dominio VI	EW, manteo intermedio al NW

### 3.7 Caracterización del Macizo Rocoso

La caracterización del macizo rocoso utiliza la información levantada por medio de ventanas geotécnicas, 33 en total. Se consideran dos métodos de clasificación geomecánica: Rock Mass Rating (RMR) de Laubscher (1990) en todo el sector y el índice Q de Barton en las ventanas de niveles subterráneos. También se estimó el GSI durante el registro de cada ventana geotécnica. En los cálculos del  $RMR_L$  se consideraron condiciones secas y no se incluyeron los ajustes por orientación de estructuras. Para el análisis se consideró dentro de las unidades litológicas al hierro masivo y hierro semimasivo, ya que por su volumen, ubicación y presencia de múltiples galerías es importante calcular su calidad como macizo.

$RMR_L$  (1990) divide el macizo rocoso en 10 clases, las que se indican en la Tabla 3-17:

**Tabla 3-17: Categorías de RMR Laubscher 1990.**

Clase	1		2		3		4		5	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Rating	100-81		80-61		60-41		40-21		20-0	
Descripción	Muy Buena		Buena		Regular		Mala		Muy Mala	
Color	[Azul]		[Verde]		[Amarillo]		[Marrón]		[Rojo]	

Por su parte, Q de Barton diferencia nueve categorías de calidad de macizo rocoso (Tabla 3-18):

**Tabla 3-18: Categorías Q de Barton**

Q entre	Clasificación
0,001-0,01	Roca excepcionalmente mala
0,01-0,1	Roca extremadamente mala
0,1-1	Roca muy mala
1-4	Roca mala
4-10	Roca media
10-40	Roca buena
40-100	Roca muy buena
100-400	Roca extremadamente buena
400-1000	Roca excepcionalmente buena

La forma de calcular estas clasificaciones se encuentra en el Anexo B.

#### 3.7.1 Cálculo $RMR_L$ en Ventanas Geotécnicas.

Se calculó RMR de Laubscher para las 25 ventanas levantadas en las galerías subterráneas y las 8 elaboradas en el Rajo Mina Carmen; el Anexo B incluye la metodología y tablas de puntajes involucradas. En la Tabla 3-19 se presentan los valores de  $RMR_L$  de cada ventana. En el Anexo C se presentan las tablas con todos los parámetros utilizados para la clasificación

Tabla 3-19: RMR<sub>L</sub> por ventana geotécnica.

Ventana	Dominio	RMR Laubscher 1990			Ventana	Dominio	RMR Laubscher 1990		
		RMR (RQD+JS)	RQD (FF)	Clase (RQD+JS)			RMR (RQD+JS)	RQD (FF)	Clase (RQD+JS)
A1	I	47	44	3B	C3	V	40	38	4A
A2	I	49	41	3B	C4	V	48	42	3B
A3	II	45	43	3B	C5	III	43	40	3B
A4	II	41	39	3B	C6	III	40	38	4A
A5	IV	40	38	4A	C7	VI	40	38	4A
A6	VI	45	38	3B	C8	VI	49	46	3B
A7	IV	40	39	4A	C9	VI	51	42	3A
A8	V	51	43	3A	C10	VI	49	42	3B
B1	VI	47	44	3B	V1	VI	45	46	3B
B2	V	46	45	3B	V2	VI	38	41	4A
B3	V	43	39	3B	V3	IV	46	45	3B
B4	VI	46	45	3B	V4	IV	49	51	3B
B5	VI	36	35	4A	V5	VI	45	44	3B
B6	VI	45	42	3B	V6	IV	38	40	4A
B7	VI	48	44	3B	V7	IV	46	40	3B
C1	III	48	46	3B	V8	IV	39	39	4A
C2	V	41	39	3B					

El rango obtenido de RMR<sub>L</sub> es 36-51, con un promedio de 44, utilizando "RQD+J<sub>s</sub>". Dos ventanas geotécnicas clasifican como roca de calidad 3A, regular; nueve pertenecen a la categoría 4A, con cinco de ellas en el límite con calidad 3B; clase en la que califican las otras 22 ventanas.

Al compararlo, como ejercicio, con los RMR<sub>L</sub> calculados con "FF", el promedio disminuye a 42, con un máximo de 51 y un mínimo de 35. El mayor cambio es en la clasificación del RMR<sub>L</sub> de las ventanas, con 14 ventanas clasificadas como 4A, 18 como 3B y sólo una ventana como 3A, la cual califica como 3B según el otro método.

Observando la clasificación por litologías (Tabla 3-20), las ventanas levantadas en hierro masivo presentan la mejor calificación de RMR<sub>L</sub>, 3A, seguida por hierro semimasivo (3B). Andesitas, brechas y dioritas clasifican como 3B, con puntaje similar. Esto se explica por la competencia mostrada por las unidades con alto contenido de hierro.

Tabla 3-20: RMR Laubscher (RQD+JS) de acuerdo a litología.

Litología	N° de ventanas	RMR (L) mínimo	RMR (L) máximo	RMR (L) promedio	Ventanas roca "Regular" (%)
Andesita	14	38	49	44	71,43
Brechas	8	36	48	43	62,5
Hierro masivo	3	49	51	50	100
Hierro semimasivo	2	47	48	48	100
Diorita	6	40	51	44	66,67

En relación a dominios estructurales (Tabla 3-21), los  $RMR_L$  rankean dentro de la categoría 3B con valores uniformes; sólo el Dominio I se destaca con un valor cercano a la 3A, la que también corresponde a roca regular, pero de mejor calidad.

**Tabla 3-21: Comparación  $RMR_L$  (RQD+JS) entre dominios estructurales**

Dominio	N° de ventanas	$RMR_L$ mínimo	$RMR_L$ máximo	$RMR_L$ promedio	Ventanas roca "Regular" (%)
I	2	47	49	48	100
II	2	41	45	43	100
III	3	40	48	44	66,67
IV	7	38	49	43	42,86
V	6	40	51	45	83,33
VI	13	36	51	45	76,92

### 3.7.2 Cálculo Q de Barton en ventanas geotécnicas

Se calculó Q de Barton para las 25 ventanas elaboradas en galerías subterráneas; los resultados se muestran en la Tabla 3-22. Los parámetros usados para evaluar el índice se encuentran en el apéndice C (Tabla 6-18); en particular, se utilizó  $SRF=1$  y  $J_w=1$ .

**Tabla 3-22: Q de Barton de ventanas geotécnicas subterráneas**

Ventana	Dominio	Barton 2000		Ventana	Dominio	Barton 2000	
		Q	Clasificación Q			Q	Clasificación Q
A1	I	2,47	MALA	B6	VI	1,61	MALA
A2	I	5,44	MEDIA	B7	VI	1,96	MALA
A3	II	1,92	MALA	C1	III	2,94	MALA
A4	II	3,37	MALA	C2	V	1,54	MALA
A5	IV	1,25	MALA	C3	V	1,56	MALA
A6	VI	2,38	MALA	C4	V	3,17	MALA
A7	IV	1,27	MALA	C5	III	1,38	MALA
A8	V	4,45	MEDIA	C6	III	1,34	MALA
B1	VI	1,57	MALA	C7	VI	1,44	MALA
B2	V	1,13	MALA	C8	VI	1,31	MALA
B3	V	1,81	MALA	C9	VI	5,63	MEDIA
B4	VI	1,27	MALA	C10	VI	1,47	MALA
B5	VI	2,22	MALA				

Los valores de Q fluctúan entre 1,13 y 5,63, promediando 2,24. De las ventanas levantadas en Interior Mina Carmen, 22 pertenecen a la categoría roca Mala y tres ventanas clasifican como roca Media.

Al examinar los valores de Q por litología (Tabla 3-24), se observa que son homogéneos en sus valores mínimos y medios; es en los máximos donde se aprecia diferencias: las Brechas y Hierro Semimasivo se presentan uniformemente como roca de calidad mala, en cambio andesitas, diorita y hierro masivo tienen también roca

media. Analizando por dominios (Tabla 3-24), la calidad es similar, excepto en el dominio I, que si bien casi alcanza a clasificar como roca Media, que sólo tiene dos ventanas con valores dispares.

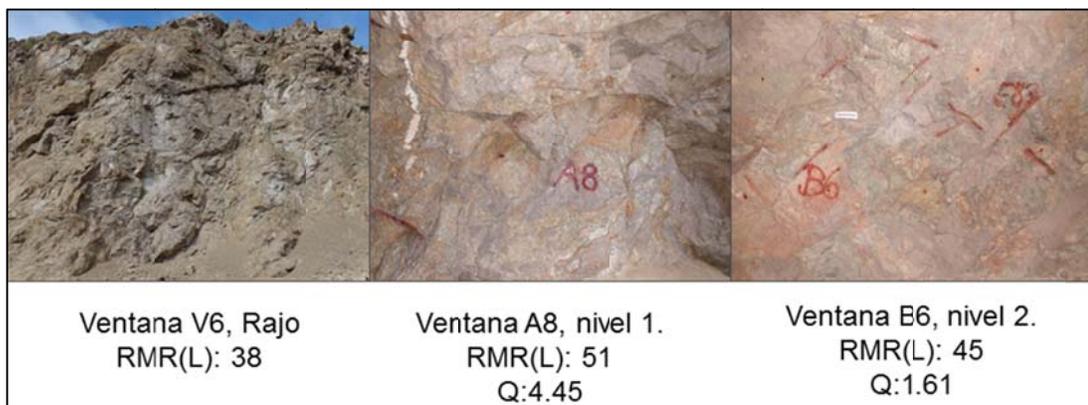
**Tabla 3-23: Comparación de Q de Barton de acuerdo a litología.**

Litología	N° de ventanas (Q aplicable)	Q mínimo	Q máximo	Q promedio	Categoría dominante	Ventanas roca "Mala" (%)
Andesita	7(14)	1,25	5,44	2,58	Mala	85,71
Brechas	7(8)	1,27	3,17	2	Mala	100
Hierro masivo	3	1,31	5,63	2,80	Mala	66,67
Hierro semimasivo	2	1,57	1,96	1,77	Mala	100.00
Diorita	6	1,13	4,45	1,97	Mala	83,33

**Tabla 3-24: Comparación Q de Barton entre dominios estructurales.**

Dominio	N° de ventanas (Q aplicable)	Q mínimo	Q máximo	Q promedio	Categoría dominante	Ventanas roca "Mala" (%)
I	2	2,47	5,44	3,95	Mala	50
II	2	1,92	3	2,64	Mala	100
III	3	1,34	3	1,89	Mala	100
IV	2(7)	1,25	1,27	1,26	Mala	100
V	6	1,13	4,45	2,28	Mala	83,33
VI	10(13)	1,27	5,63	2,09	Mala	90

La Figura 3-30 muestra, de izquierda a derecha, la apariencia de tres ventanas con distinta calidad geotécnica: una con calidad mala, otra con calidad media-regular A y una ventana con calidad promedio, tanto según Laubscher como Q de Barton (RMR<sub>L</sub> Regular B y Mala según Q).



**Figura 3-30: ejemplos de macizo rocoso en Carmen.**

### 3.7.3 RMR<sub>L</sub> en sondajes

De los trece sondajes perforados y mapeados durante la campaña, se consideraron dos, CARD-45 y CARD-46 (Tabla 3-25), para comprobar las condiciones geotécnicas de Mina Carmen en profundidad. Estos dos sondajes se escogieron debido a que por ubicación (sector sur del yacimiento, Figura 3-31) y mayor longitud (superior a 700 m) permiten caracterizar las condiciones de la roca en profundidades cercanas a lo explorado en las galerías subterráneas.

Tabla 3-25: Azimut, inclinación y largo de sondajes con cálculo de RMR Laubscher

Sondaje	Azimut	Inclinación	Longitud
CARD-45	358,5	-85,12	799,9
CARD-46	0,2	-76,23	716,75

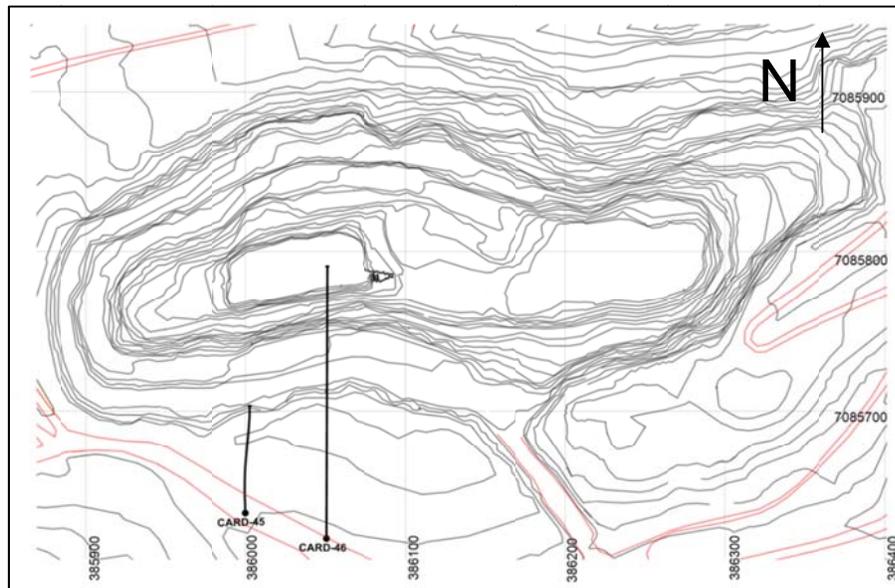


Figura 3-31: Ubicación sondajes CARD-45 y CARD-46 con respecto al rajo Mina Carmen. En rojo: caminos.

En la Figura 3-32 y Figura 3-33 se observa que, en profundidad, la calidad geotécnica del macizo rocoso alcanza una clase Buena (2B, puntaje 61 a 70), siendo generalmente mejor que el RMR<sub>L</sub> calculado en ventanas geotécnicas.

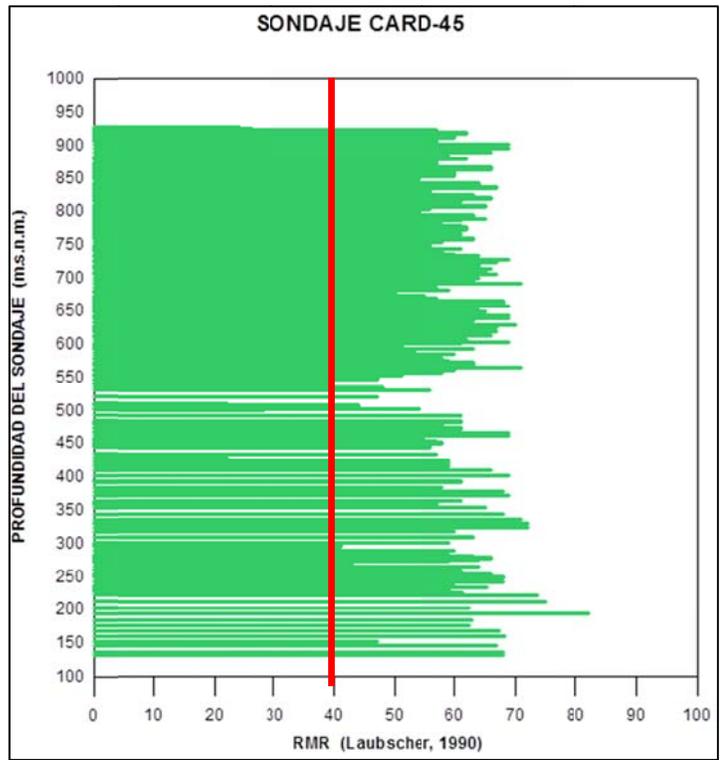


Figura 3-32: Parámetro  $RMR_L$  a lo largo del sondaje CARD-45. La línea roja indica el límite “Roca Mala”-“Roca Regular”.

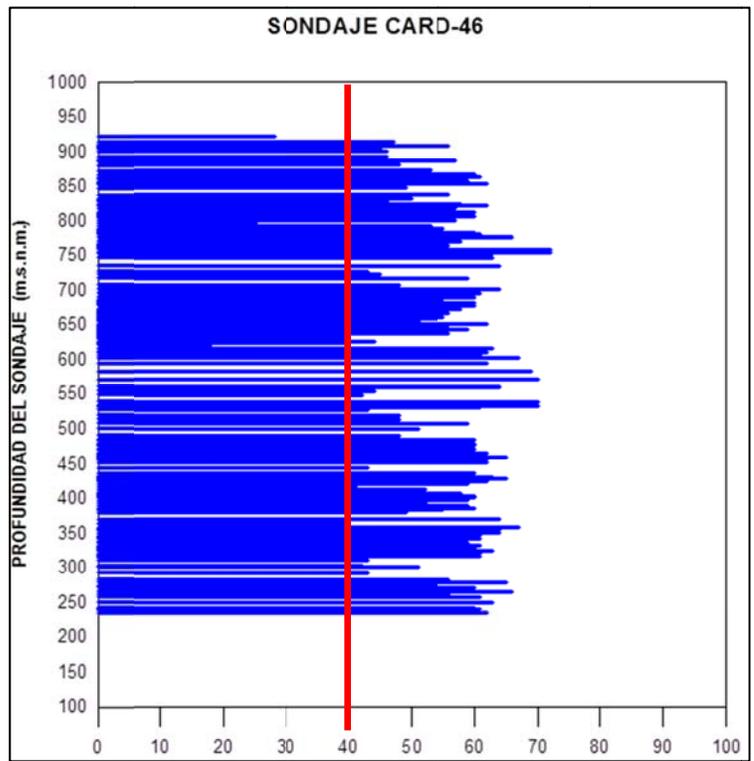


Figura 3-33: Parámetro  $RMR_L$  a lo largo del sondaje CARD-46. La línea roja indica el límite “Roca Mala”-“Roca Regular”.

La aparente disparidad entre clasificación del macizo rocoso de ventanas geotécnicas (RMR<sub>L</sub> regular B) y sondajes (Regular B a Buena A) se puede explicar con las siguientes razones:

- El proceso de excavación de túneles y rajo produjo la apertura de fracturas selladas con rellenos blandos (efectos de tronadura); la roca analizada por medio de sondajes no presenta estos efectos, sólo fracturas inducidas.
- Los túneles se perforaron en torno a la veta, la que está limitada en parte por fallas, disminuyendo la calidad del macizo en esos sectores (disminuye el rating por la mayor frecuencia de estructuras).
- La roca analizada por medio de ventanas geotécnicas ha estado expuesta por más de treinta años, sin ningún tipo de refuerzo; en cambio, la roca de testigos tiene características de roca in situ, sin efectos de despresurización.

### 3.7.4 Sostenimientos sugeridos

Para estimar un posible sostenimiento en las galerías subterráneas, se emplean las recomendaciones de Barton (2000). Este método depende tanto de la calidad de la roca como del diámetro, altura o ancho del túnel, de modo que para un mismo valor de Q se pueden obtener distintas recomendaciones de sostenimiento. Su metodología consiste en relacionar de forma empírica la calidad de la roca con el diámetro equivalente ( $D_e$ ) del túnel; este último parámetro incorpora el nivel necesario de seguridad requerido de acuerdo al tipo de obra y se define como:

$$D_e = \frac{\text{Altura o diámetro del túnel}(m)}{ESR}$$

Donde ESR (Excavation Support Ratio) es el factor que modifica las dimensiones reales del túnel; su valor depende del tipo de excavación, siendo los valores más bajos los más conservadores; el rango total del valor de SRF es de 5 a 0,5. En este caso se utilizó el rango asignado a labores mineras de carácter temporal (ESR entre 2 y 5, el rango más alto). La Tabla 3-26 indica el diámetro equivalente de las galerías en los sectores donde se levantaron ventanas geotécnicas, considerando el valor máximo y mínimo del rango de ESR usado.

Tabla 3-26: Diámetro equivalente asociado a cada ventana geotécnica, considerando valores de ESR 5 y 2.

Ventana	Q	Alto (m)	Diámetro equivalente		Ventana	Q	Alto (m)	Diámetro equivalente	
			ESR(5)	ESR(2)				ESR(5)	ESR(2)
A1	2,47	3	0,6	1,5	B6	1,61	3	0,6	1,5
A2	5,44	3	0,6	1,5	B7	1,96	7	1,4	3,5
A3	1,92	3	0,6	1,5	C1	2,94	7	1,4	3,5
A4	3,37	3,5	0,7	1,8	C2	1,54	3	0,6	1,5
A5	1,25	3,5	0,7	1,8	C3	1,56	4	0,8	2
A6	2,38	3,5	0,7	1,8	C4	3,17	5	1	2,5
A7	1,27	3	0,6	1,5	C5	1,38	6	1,2	3
A8	4,45	6	1,2	3	C6	1,34	5	1	2,5
B1	1,57	3	0,6	1,5	C7	1,44	5	1	2,5
B2	1,13	3	0,6	1,5	C8	1,31	6	1,2	3
B3	1,81	3	0,6	1,5	C9	5,63	3,5	0,7	1,8
B4	1,27	7	1,4	3,5	C10	1,47	4	0,8	2
B5	2,22	3	0,6	1,5					

La Figura 3-34 muestra las recomendaciones de sostenimiento obtenidas al ingresar los valores de Q y ESR en el gráfico de diseño de túneles de Barton (2000). Si se utiliza ESR=5 (cuadros celestes en la figura), no se requeriría sostenimiento en las galerías, al menos en los sectores con ventanas asociadas. Sin embargo, se prefieren los cálculos conservadores y se emplea ESR=2 (cuadros rojos en la figura), según el cual se tienen cinco ventanas con necesidad de sostenimiento extra. Esto se expresa en la Tabla 3-27.

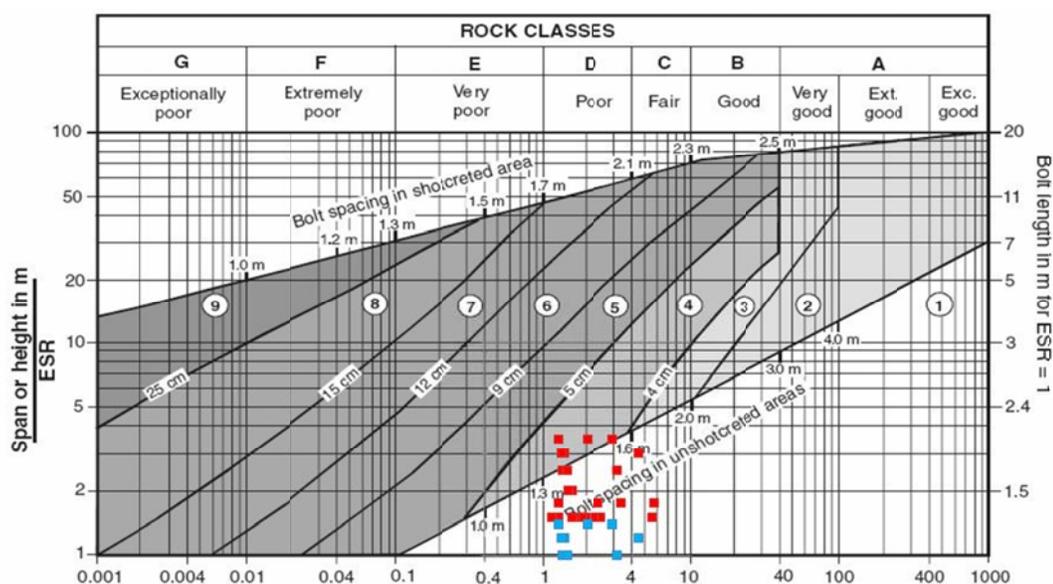


Figura 3-34: Gráfico de sostenimiento recomendado de acuerdo a la calidad de roca (Q). Barton, 2000. En celeste: diámetro equivalente con ESR=5; en rojo: diámetro equivalente con ESR=2.

**Tabla 3-27: Sostenimiento recomendado por ventana geotécnica en niveles 1, 2 y 3, ESR=2**

Ventana	Q	Recomendación de reforzamiento.
A1	2.47	Sin sostenimiento. Requiere mantención, acuñadura sistemática.
A2	5.44	Sin sostenimiento. Requiere mantención, acuñadura sistemática.
A3	1.92	Sin sostenimiento. Requiere mantención, acuñadura sistemática.
A4	3.37	Sin sostenimiento. Requiere mantención, acuñadura sistemática.
A5	1.25	Sin sostenimiento. Requiere mantención, acuñadura sistemática.
A6	2.38	Sin sostenimiento. Requiere mantención, acuñadura sistemática.
A7	1.27	Sin sostenimiento. Requiere mantención, acuñadura sistemática.
A8	4.45	Sin sostenimiento. Requiere mantención, acuñadura sistemática.
B1	1.57	Sin sostenimiento. Requiere mantención, acuñadura sistemática.
B2	1.13	Sin sostenimiento. Requiere mantención, acuñadura sistemática.
B3	1.81	Sin sostenimiento. Requiere mantención, acuñadura sistemática.
B4	1.27	Pernos sistemáticos de largo 2 m, con shotcrete proyectado de espesor 40-100 mm. Separación entre pernos de 2,5 m. Pernos puntuales donde sea requerido.
B5	2.22	Sin sostenimiento. Requiere mantención, acuñadura sistemática.
B6	1.61	Sin sostenimiento. Requiere mantención, acuñadura sistemática.
B7	1.96	Pernos sistemáticos de largo 2 m, con shotcrete proyectado de espesor 40-100 mm. Separación entre pernos de 2,5 m. Pernos puntuales donde sea requerido.
C1	2.94	Pernos sistemáticos de largo 2 m, con shotcrete proyectado de espesor 40-100 mm. Separación entre pernos de 2,5 m. Pernos puntuales donde sea requerido.
C2	1.54	Sin sostenimiento. Requiere mantención, acuñadura sistemática.
C3	1.56	Sin sostenimiento. Requiere mantención, acuñadura sistemática.
C4	3.17	Sin sostenimiento. Requiere mantención, acuñadura sistemática.
C5	1.38	Pernos sistemáticos de largo 2 m, con shotcrete proyectado de espesor 40-100 mm. Separación entre pernos de 2,5 m. Pernos puntuales donde sea requerido.
C6	1.34	Sin sostenimiento. Requiere mantención, acuñadura sistemática.
C7	1.44	Sin sostenimiento. Requiere mantención, acuñadura sistemática.
C8	1.31	Pernos sistemáticos de largo 2 m, con shotcrete proyectado de espesor 40-100 mm. Separación entre pernos de 2,5 m. Pernos puntuales donde sea requerido.
C9	5.63	Sin sostenimiento. Requiere mantención, acuñadura sistemática.
C10	1.47	Sin sostenimiento. Requiere mantención, acuñadura sistemática.

El sostenimiento sugerido, mayoritariamente mantención y acañadura, es consistente con lo observado en terreno: las galerías se encuentran en buen estado a pesar de haber estado décadas sin mantenimiento; y las ventanas en que se propone reforzamiento con pernos y shotcrete corresponden de galerías más amplias y por lo tanto un mayor diámetro equivalente.

## **4 DISCUSIONES Y CONCLUSIONES**

### **4.1 Discusiones**

#### **4.1.1 Definición de dominios estructurales**

En general los límites de dominios se determinaron utilizando estructuras principales o secundarias; cambios litológicos o presencia de mineralización, fueron usados también como apoyo. En el caso del margen sur del dominio III, la estructura usada como división es observable sólo parcialmente, a través de dos fallas registradas en los niveles 2 y 3 que se interpretan como el límite entre la veta de hierro y la roca de caja. Es difícil, sin embargo, pensar en otra divisoria con el dominio VI, o incluso separarlo en dos dominios; la información disponible es muy acotada espacialmente y no se observan rasgos que justifiquen una reubicación de divisiones.

El dominio VI, además de estar fuertemente influenciado por las fallas A y B, muestra variadas orientaciones tanto en fallas como en diaclasas (Figura 3-28). Esto, unido a su extensión, podría indicar que una subdivisión sería adecuada. Sin embargo, al igual que en el Dominio III, no se observan estructuras que puedan cumplir esta función, tampoco cambios litológicos importantes, por lo que se optó por considerarlo un único dominio, considerando que está básicamente constituido por la veta de hierro.

Los límites de dominios en las zonas alejadas de las galerías fueron estimados siguiendo las tendencias de las fallas y cambios litológicos utilizados como referencia. Esto es especialmente notable en el Nivel 1, donde el límite norte de los dominios II y V se interpretó de esta manera, por falta de información de otros niveles para contrastar.

#### **4.1.2 Información empleada en análisis de dominios**

Los seis dominios estructurales se determinaron posteriormente a la etapa de recolección de información en terreno.

Esto genera dos posibles dificultades:

a) Dominios con datos estructurales levantados a lo largo de una única travesa, debido a la disposición de los túneles.

En este caso, son las estructuras paralelas al túnel las que podrían estar subrepresentadas, en especial en los dominios I y II ya que se determinaron con los datos levantados a lo largo de un túnel con dirección E-W. Se procuró mitigar este efecto utilizando ajuste con travesas al analizar los datos en Dips, la que incluye dentro de los cálculos la orientación de la línea en la que se levanta la información. Además, revisando la fuerte presencia de estructuras E-W en las orientaciones preferenciales observadas en los distintos dominios, se puede considerar que no fueron subestimadas.

b) Dominios con pocos datos de diaclasas y parámetros geotécnicos para caracterización geotécnica del macizo rocoso.

Este caso es distinto. El dominio VI, el más extenso, contiene 16 ventanas geotécnicas; el dominio III, tres ventanas; los dominios I y II (los de menor tamaño), sólo dos cada uno. Esto implicaría que el dominio VI está mejor representado que los dominios I y II. Una forma de evitar la situación habría sido realizar las ventanas a intervalos fijos, con lo que cada dominio habría tenido información proporcional a su tamaño, sin importar que la definición de dominios se hiciera en gabinete, posterior a la toma de datos.

Sin embargo, se considera que la información levantada es representativa. La metodología utilizada se enfocó en caracterizar el macizo rocoso en función de sus cambios; de esta forma, una zona uniforme en litología, estructuras y alteración puede representarse con una ventana y un sector con mayores diferencias necesitaría más ventanas geotécnicas. En el caso de los dominios I y II, la roca presentaba escasas variaciones, por lo que no se consideró necesario aumentar la densidad de celdas.

#### **4.1.3 RMR<sub>L</sub> en ventanas y sondajes**

Los valores de RMR<sub>L</sub> de las distintas ventanas son bajos, considerando que la mayor parte de la roca a lo largo de los túneles se presenta en buen estado, especialmente algunos sectores del nivel 3 con hierro masivo. Esto es más evidente al contrastar con los RMR obtenidos de sondajes, que alcanzan la categoría buena.

La diferencia, tal como se expuso en la sección 3.7.3, se puede atribuir al desconfinamiento sufrido por el macizo tras las tronaduras para formar galerías y bancos, además de la faena misma; esto sumado a más de 30 años de exposición debilita el macizo, provocando abertura de estructuras.

#### **4.1.4 Comparación de RMR<sub>L</sub> y Q**

En general, RMR<sub>L</sub> califica las ventanas geotécnicas como "Roca Regular". En cambio, la clasificación de Q de Barton indica que el macizo rocoso está compuesto predominantemente por "Roca Mala". Esta aparente contradicción se debe a que Q es un índice más conservador que RMR<sub>L</sub>, lo que se ve reflejado en particular en el parámetro que mide el índice de diaclasado: por ejemplo, Q disminuye un 33% si el macizo presenta tres sets de diaclasas, en vez de tener dos sets de diaclasas más sets aleatorios; lo mismo ocurre con el índice de rugosidad de estructuras. Sin embargo, estos cambios son más relevantes en macizos rocosos con índice Q cercano al valor mínimo para cambiar de categoría, en este caso, Q=4 para ser considerado "roca media".

#### **4.1.5 Categorización de fallas**

La categorización inicial de fallas se hizo por medio del espesor, continuidad y existencia de zona de influencia de las estructuras. Se considera que pudo haberse

incluido otro parámetro: tipo de relleno, distinguiendo entre rellenos duros y blandos (por ejemplo, arcillas), otorgándole mayor importancia a los segundos, debido a su menor resistencia al deslizamiento.

#### **4.1.6 Otras consideraciones**

A lo largo del desarrollo del estudio se trataron los dominios estructurales como equivalentes a dominios geotécnicos, asumiendo que las características de los macizos serían relativamente constantes dentro de un mismo conjunto. A pesar de ello y como ya se ha indicado, los parámetros geotécnicos no fueron utilizados al determinar los dominios.

## 4.2 Conclusiones

Del levantamiento geológico estructural y geotécnico de Mina Carmen y el análisis de los datos recopilados durante el proceso, se obtienen las siguientes conclusiones.

Se definen cuatro unidades litológicas, Andesita, Brechas hidrotermales, Diorita y Diques, la más abundante de las cuales es Andesita. La mineralización se compone de una veta compuesta de Hierro Masivo, con hierro Semimasivo en los sectores distales. En términos del tipo y grado de alteración, es posible indicar que las alteraciones más comunes corresponden a Calcosódica (Actinolita-Apatito), Argílica y Clorítica.

La mineralización está fuertemente controlada por estructuras. Las fallas principales del depósito, fallas A y B, se comportan como el límite sur (orientación EW) y noroeste (orientación NE) respectivamente de la veta de hierro masivo que conforma la zona mineralizada. También se definieron nueve fallas importantes.

Se reconocen seis dominios estructurales, con los datos obtenidos durante el levantamiento estructural y de ventanas geotécnicas; como límite se usan las fallas principales e importantes y también los contactos litológicos.

Con la integración de la información estructural, se determinó que los sistemas principales presentes en Mina Carmen corresponden a orientaciones EW y NNW (coincidentes con las fallas principales del depósito), subvertical y de ángulo intermedio respectivamente y como sistemas secundarios los de orientación NW y NE. Esto se reconoce tanto a nivel de dominio como de depósitos y también en las fallas principales e importantes.

El macizo rocoso presenta un fracturamiento fuerte con bloques de volumen medio (3-10 fracturas /m<sup>3</sup>, ISRM, 1978), los que en general se presentan bien trabados. No es posible desprender con facilidad un bloque del conjunto (con un golpe del martillo), excepto, en aquellos lugares con daño por tronadura.

La calidad geotécnica del macizo rocoso, de acuerdo a RMR de Laubscher (1990), se encuentra entre  $36 \leq RMR_L \leq 51$ , correspondiente a las clases geotécnicas Mala (4A, puntaje 31 a 40) a Regular (3A, puntaje 51 a 60 y 3B, puntaje 41 a 50), siendo predominantemente Regular clase B; en los sondajes CARD-45 y CARD-46 la calidad mejora, alcanzando la categoría de roca Buena (2B puntaje 61 a 70), lo que podría deberse a que los testigos se conforman como roca in situ y las galerías han estado expuestas a tronaduras y despresurización. La calidad del macizo rocoso no presenta grandes variaciones entre los distintos dominios, pero sí por tipo de roca: las ventanas levantadas y hierro masivo y semimasivo tienen mejor puntaje RMR<sub>L</sub> que andesitas o diorita.

Según el índice Q de Barton la roca califica principalmente como Mala, con  $1,13 \leq Q \leq 5,63$ , es decir, correspondiente a las clases geotécnicas Mala ( $1 < Q < 4$ ) a Media ( $4 < Q < 10$ ). Entre dominios tampoco presenta grandes variaciones. La diferencia de clasificación entre Q de Barton (Roca Mala) y RMR de Laubscher (Roca Regular) se debe principalmente a que el primero es más conservador.

El reforzamiento necesario se calculó por medio de las recomendaciones de sostenimiento de Barton; en veinte ventanas se requeriría sólo mantención y acuñadura sistemática; para las otras cinco se sugiere una combinación de pernos sistemáticos de 2m de largo, separados por 2,5m, con shotcrete proyectado de espesor 40-100mm.

La condición de aguas observada en los distintos niveles y labores es considerada como seca.

## 5 BIBLIOGRAFÍA

Arabasz, W.J. 1971. Geological and geophysical studies of the Atacama Fault Zone in northern Chile. Ph.D. Thesis (Unpublished), California Institute of Technology, 275 p. Pasadena, U.S.A.

Barton, N.R., Lien, R. and Lunde, J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech.* 6 (4), pp. 189-239.

Barton, N., Grimstad, E., 2000. El sistema Q para la selección del sostenimiento en el método noruego de excavación de túneles. En *Ingeotuneles*, vol. 3. Cap. 3. Ed López de Jimeno. Entorno Gráfico, Madrid.

Bieniawski, Z.T. 1989. *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley

Brown, M.; Díaz, F; Grocott, J. 1993. Displacement history and tectonic significance of the El Salado segment of the Atacama Fault System, Northern Chile. *GSA Bulletin*, 105, pp. 1165–1174.

Deere, D. U.; Deere, D. W. 1989. *Rock Quality Designation (RQD) after twenty years*, U.S. Army Corps of Engineers Contract Report GL-89-1, Waterways Experiment Station, Vicksburg, M.

García, F. 1967. Geología del Norte Grande de Chile. In *Simposium sobre el Geosinclinal Andino*, Sociedad Geológica Chile, No. 3, 138 p.

Gelcich, S.; Espinoza, C.; Vivallo, W. 1998. Yacimientos Metalíferos de Las Hojas Chañaral y Diego de Almagro, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapa de Recursos Minerales de Chile, N° 3, Escala 1:100.000.

Gelcich, S.H., Davis, D.W., Spooner, E.T.C. 2003. New U-Pb ages for host rocks, mineralization and alteration of iron oxide (Cu-Au) deposits in the coastal cordillera of northern Chile. In *IV South American Symposium on Isotope Geology*, Salvador de Bahia, Brazil, pp. 63-66.

Godoy, E.; Lara, L. 1998. Hojas Chañaral y Diego de Almagro, región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Mapas Geológicos, Nos. 5-6, escala 1:100.000, Santiago.

Godoy, E.; Lara, L. 2005. Hoja El Salvador Occidental, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 90, 72 p., 1 mapa escala 1:250.000, Santiago.

González de Vallejo, L.; Ferrer; Ortuño, L.; Oteo, Carlos. 2002. *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación, 744 p.

ISRM 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 15, pp. 319 -368.

Laubscher, D.H. (1990). "A geomechanics classification system for rating of rock mass in mine design". Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy 90: pp. 257–273.

Maksaev, V. 2001. Apuntes de curso de Metalogénesis.

Maksaev, V., Townley, B., Palacios, P., Camus, F. 2007. Metallic ore deposits. En Moreno, T & Gibbons, W (Eds) The Geology of Chile. The Geological Society, London, 178-198.

Naranjo, J. A. 1978. Geología de la zona interior de la Cordillera de Costa entre los 26°00' y 26°20'. Región de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, No. 34, 46 p.

Pålstrom A., 1982. The volumetric joint count - A useful and simple measure of the degree of rock mass jointing. IAEG Congress, New Delhi, pp. V.221 – V.228.

Priest, S.D. & Hudson, J.A. 1976. Discontinuity spacings in rock. Int. J. Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr, 13, pp. 135-148

Rocscience (2006): DIPS v.5.0. Graphical and Statistical Analysis of Orientation Data. Canada.

Sernageomin, 2003. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. Carta Geológica de Chile, escala 1:1.000.000.

SRK, 2010 Carmen Mineral Source Report. Informe interno.

## **6 ANEXOS**

### **6.1 Anexo A: Cartillas de registro de datos**

Tabla 6-1: Cartilla de levantamiento geológico

Geological Rock Face Mapping														
					Client					Level				
					Project					Easting				
					Project No					Northing				
										Page				
										Geologist/Engineer				
										Date				

1 a ROCK TYPE					
1 Andesite	7 Tonalite	13 Massive Fe			
2 Basaltic Andesite	8 Monzonite	14 Semmassive Fe			
3 Andesitic Porphyry Diorite	9 Meta andesite	15 Vein Structure			
4 Quartz Diorite	11 Amphibolite	16 Dyke			
5 Granodiorite					

1 b ROCK TEXTURE					
1 Porphyritic	5 Brecciated				
2 Aphanitic	6 Pseudo Brecciated				
3 Equigranular	7 Massive				
4 Obliterated					

2 a MINERALOGY					
Intensity (I)			Form (F)		
0 Trace	1 Massive	8 Matrix			
1 Very Weak	2 Brecciated	9 Replacement			
2 Weak	3 Disseminated	10 Stockwork			
3 Moderate	4 Cumulate	11 Boxwork			
4 Strong	5 Fractures	12 Open Space			
5 Very Strong	6 Veins	13 Patina			

2 b ALTERATION					
1 Unaltered	9 Martitization				
2 Actinolization	10 Sericization				
3 Potassic	11 Carbonatization				
4 Propylitic	12 Chloritization				
5 Argillization	13 Calc-Sodic				
6 Silicification	14 Phyllic				
7 Limonitization	15 Supergene				
8 Tourmalinization					

3. MINERALIZATION					
1 Massive	8 Matrix				
2 Brecciated	9 Replacement				
3 Disseminated	10 Stockwork				
4 Cumulate	11 Boxwork				
5 Fractures	12 Open Space				
6 Gules	13 Filling				
7 Veins	14 Patina				

Stretch		Rock Type (1-a)	Texture (1-b)	Mineralogy (2-a)														Alt (2-b)	Mineralization (3)					Total Fe%	Notes			
				Dab	Actinolite	Apatite	Gypsum	Calcite	Chlorite	Clays	Apatite	Quartz	Limonite	Biotite	Epidote	Sericite	F&K		Tourmaline	Dab	Magnetite	Hematite	Specularite			Cpy - Py	Chrysocolla Malachite	
From	To																											



**Tabla 6-3: Cartilla para elaboración de ventanas geotécnicas**

		Client		Level		Easting		Height										
		Project		Cell		Northing		Geologist/Engineer:										
		Project No.		Length		Face Orientation		Date:										
1 Rock type		2 Weathering				Photography												
		3 Intact Material Strength (IRS)																
		% Volume of weak rock		IRS														
		% Volume of strong rock		IRS														
		4 Groundwater Conditions																
		5 Blasting Effects																
		6 GSI																
7 Comments																		
8 Rock Mass Discontinuities																		
Set No.	Type	Average Orientation		Spacing				Roughness		Alteration		Aperture (mm)	Continuity					
		Dip	Dip Direction	Minimum (cm)	Maximum (cm)	Average (cm)	N°/ meter	Micro	Macro	Infill	Wall		Dip		Strike			
													Length (m)	Ends	Length (m)	Ends		
9 RQD Equivalent =				Jc = 0,00														
(RQD = 115-3,3 *Jc; w here Jc = Total Number of Joint/set/meter)																		
10 Classification						11 Annotations												
10.1 $Q = (RQD/J_n) * (J_r/J_a) * (J_w/SRF)$					Q=	Quality	Set No 1		Set No 2		Set No 3		Set No 4 (aleatorio)		Set No 5		Set No	
RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF		Dip	Dip Dir	Dip	Dip Dir	Dip	Dip Dir	Dip	Dip Dir	Dip	Dip Dir	Dip	Dip Dir
10.2 Laubscher's RMR																		
IRS	RQD	J	Jc	RMR														
Observations																		

**Tabla 6-4: Cartilla de registro geotécnico de sondajes**

Proyecto:											
Sondaje:											
Fecha:											
<b>Geólogo:</b>											
Intervalo geotécnico	Recuperación (m)		Set Estruct.	Tipo Est.	N°	Macro	Micro	Relleno	Espesor	JWS	Jn
Desde (m)	RQD (m)		1 (0-30°)								
	Dureza (MPa)		2 (31-60°)								
	Meteorización		3 (61-90°)								
Hasta (m)	Código Litología		Diacl. Cem.								
	Intervalo geotécnico		Vetas / Vetillas		N° / m	Relleno	H&B Criterion		Número GSI		
Descripción litológica:											
Comentarios:											
Intervalo geotécnico	Recuperación (m)		Set Estruct.	Tipo Est.	N°	Macro	Micro	Relleno	Espesor	JWS	Jn
Desde (m)	RQD (m)		1 (0-30°)								
	Dureza (MPa)		2 (31-60°)								
	Meteorización		3 (61-90°)								
Hasta (m)	Código Litología		Diacl. Cem.								
	Intervalo geotécnico		Vetas / Vetillas		N° / m	Relleno	H&B Criterion		Número GSI		
Descripción litológica:											
Comentarios:											
Intervalo geotécnico	Recuperación (m)		Set Estruct.	Tipo Est.	N°	Macro	Micro	Relleno	Espesor	JWS	Jn
Desde (m)	RQD (m)		1 (0-30°)								
	Dureza (MPa)		2 (31-60°)								
	Meteorización		3 (61-90°)								
Hasta (m)	Código Litología		Diacl. Cem.								
	Intervalo geotécnico		Vetas / Vetillas		N° / m	Relleno	H&B Criterion		Número GSI		
Descripción litológica:											
Comentarios:											
Intervalo geotécnico	Recuperación (m)		Set Estruct.	Tipo Est.	N°	Macro	Micro	Relleno	Espesor	JWS	Jn
Desde (m)	RQD (m)		1 (0-30°)								
	Dureza (MPa)		2 (31-60°)								
	Meteorización		3 (61-90°)								
Hasta (m)	Código Litología		Diacl. Cem.								
	Intervalo geotécnico		Vetas / Vetillas		N° / m	Relleno	H&B Criterion		Número GSI		
Descripción litológica:											
Comentarios:											

## 6.2 Anexo B: Sistemas de clasificación del macizo rocoso

### 6.2.1 RQD

El RQD es un porcentaje modificado de testigo recuperado, que castiga los sectores en que la roca se presenta muy meteorizada, fracturada o diaclasada. Se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$RQD = \frac{\sum \text{longitud de trozos de testigo sólido mayores a } 10\text{cm}}{\text{Largo del tramo}}$$

Para la definición de los trozos de testigo no se deben incluir las fracturas inducidas por perforación y manipulación, sólo las estructuras naturales.

El “Testigo sólido” no incluye roca con alta meteorización o alteración, por lo que a sectores que presenten esas condiciones se les asigna RQD=0; en ese caso se calculan 40 f/m. La medición debe hacerse a lo largo del eje central del testigo (Figura 6-1).

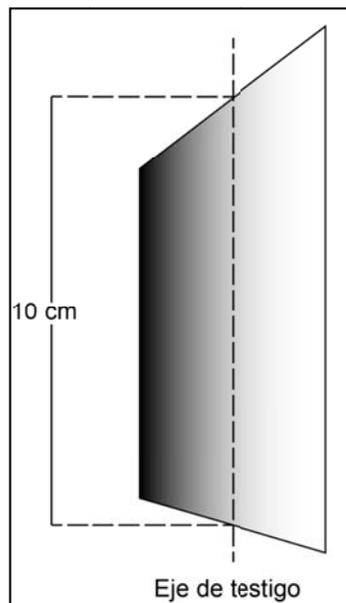


Figura 6-1: Forma correcta de medir el largo de un trozo de testigo. Modificado de Deere, 1989

La clasificación de RQD se indica en la Tabla 6-5.

Tabla 6-5: Clasificación de la roca de acuerdo a RQD (Deere, 1989)

RQD %	Calidad
<25	Muy Mala
25-50	Mala
50-75	Media
75-90	Buena
90-100	Excelente

Si bien este índice está definido para uso en sondajes, Palmström (Palmström 1974, en Palmström 1982) indicó que se puede hacer una estimación de su valor para macizo rocoso. Este RQD equivalente se puede calcular mediante la siguiente relación:

$$RQD \text{ equivalente} = 115 - 3.3 * J_v$$

Donde  $J_v$  es el total de diaclasas por metro cúbico. Si  $J_v < 4,5$ ,  $RQD=100$ .

El RQD se incluye en los cálculos de RMR y Q, como medida del fracturamiento del macizo.

### **6.2.2 GSI (Hoek, 1994; Hoek, Kaiser y Brown, 1995)**

El Índice Geológico de Resistencia (GSI), definido por Hoek, (Hoek, Kaiser y Brown, 1995) depende de las propiedades de los trozos o bloques de roca intacta y también de la eventualidad de estos bloques a deslizarse y/o rotar bajo diferentes condiciones de esfuerzos. Esto está controlado tanto por la forma geométrica de estos bloques de roca intacta como también de las condiciones por las superficies de las estructuras que separan estos bloques.

Se expresa como un código de letras (Criterio H&B) y el número GSI, los que se obtienen del análisis de la frecuencia de las fracturas del macizo rocoso v/s la rugosidad, meteorización y rellenos de las mismas.

La Figura 6-2 presenta la tabla de clasificación de GSI para macizos diaclasados. En la vertical se considera la estructura del macizo rocoso, que varía de I, "Intacto", a S, "Cizallado"; en la horizontal se clasifica la condición de las discontinuidades, con rango entre VG ("Muy Buena") y, VP, ("Muy Pobre"). La descripción de cada categoría se encuentra en la misma tabla. El número GSI aumenta con la calidad del macizo rocoso; se debe estimar como un rango ya que difícilmente corresponderá a un valor único (Por ejemplo B/G 60-65).

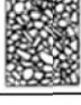
<p>ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA PARA ROCAS DIACLASADAS, GSI (Hoek and Marinos, 2000)</p> <p>Estima un valor promedio de GSI a partir de la litología, estructura y condiciones superficiales de las discontinuidades. No se debe tratar de ser demasiado preciso. Un rango de 33 a 37 es más realista que GSI=35. Note que la tabla no aplica para fallas estructuralmente controladas. Donde los planos estructurales débiles presentan orientación desfavorable con respecto al frente de excavación, estos van a dominar el comportamiento del macizo rocoso. El esfuerzo de cizalle de rocas susceptibles a deterioro como resultado de cambios en la humedad que contienen puede reducirse si hay agua presente. Cuando se trabaja con rocas de categoría regular a muy pobre, se deben considerar las condiciones de humedad. La presión de agua se trata por medio de análisis de stress efectivo</p>		CONDICIÓN DE LA SUPERFICIE				
		MUY BUENAS (VG) Superficies muy rugosas, frescas y sin meteorización	BUENO (G) Superficies rugosas, ligeramente alteradas, con pátinas de hierro	REGULAR (F) Superficies lisas, con alteración y meteorización moderadas	POBRE (P) Superficies estriadas, con alta meteorización y pátinas compactas, rellenos o fragmentos angulares.	MUY POBRE Superficies restriadas, con alta meteorización y pátinas o rellenos de arcillas suaves.
ESTRUCTURA		DECRECE LA CALIDAD DE LA SUPERFICIE →				
	INTACTA O MASIVA: Roca intacta o masiva in situ, con discontinuidades ampliamente espaciadas	90			N/A	N/A
	FRACTURADA (B): Macizo rocoso con bloques cúbicos formados por tres sets de discontinuidades que se intersectan. Bloques bien trabados	80				
	MUY FRACTURADA (VB): Macizo parcialmente perturbado con bloques angulosos multifacetados formados por cuatro o más sets de fracturas		70			
	FRACTURADA/PERTURBADA (BD): Macizo plegado, con bloques angulosos formados por varios sets de discontinuidades. Con planos de estratificación o esquistosidad		60			
	DESINTEGRADA: Macizo rocoso altamente fracturado y de bajo trabamiento de bloques, con mezcla de fragmentos redondeados y regulares		50			
	FOLIADA/LAMINADA: Se carece bloques debido al estrecho espaciamiento de planos de foliación o cizalle		40			
			30			
			20			
		N/A				10
		N/A				

Figura 6-2: Clasificación GSI (Hoek and Marinos, 2000)

### 6.2.3 Q de Barton

El índice de calidad de roca Q, desarrollado por Barton (1974), entrega una clasificación del macizo rocoso para ser usada en túneles, la que puede emplearse para determinar el tipo de soporte necesario en la excavación. Utiliza seis parámetros, los que se relacionan por medio de la siguiente expresión:

$$Q = \left( \frac{RQD}{J_n} \right) * \left( \frac{J_r}{J_a} \right) * \left( \frac{J_w}{SRF} \right)$$

O, equivalentemente:

$$Q = (\text{Tamaño de bloque}) * (\text{Resistencia al corte entre bloques}) \\ * (\text{Influencia del estado tensional})$$

El valor de Q varía entre 0,001 y 1000, con la siguiente categorización (Tabla 6-6).

**Tabla 6-6: Clasificación del macizo de acuerdo a Q de Barton**

Q entre	Clasificación
0,001-0,01	Roca excepcionalmente mala
0,01-0,1	Roca extremadamente mala
0,1-1	Roca muy mala
1-4	Roca mala
4-10	Roca media
10-40	Roca buena
40-100	Roca muy buena
100-400	Roca extremadamente buena
400-1000	Roca excepcionalmente buena

A continuación se describe brevemente cada factor, junto a su tabla de puntajes asociada:

**RQD:** Refleja el grado de fracturamiento de la roca. Tratado en este anexo. Para el cálculo de Q se utiliza el RQD porcentual.

**J<sub>n</sub>:** índice de diaclasado que indica grado de fracturación del macizo rocoso. Su valor numérico aumenta con el número de diaclasas observado. Los valores de J<sub>n</sub> se encuentran en Tabla 6-7.

**Tabla 6-7: Valores de J<sub>n</sub>**

Número (índice) de Sistemas de Fracturas		J <sub>n</sub>
A	Masivo o con pocas fisuras	0,5-1,0
B	Un sistema de fracturas	2
C	Un sistema de fracturas más otras aleatorias	3
D	Dos sistemas de diaclasas	4
E	2 sistemas de fracturas más otras aleatorias	6
F	3 sistemas de diaclasas	9
G	3 sistemas de fracturas más otras aleatorias	12
H	4 o más sistemas de fracturas (cubo de azúcar)	15
J	Roca triturada, terregal	20
Nota i) Para intersecciones en túneles use 3*J <sub>n</sub> ii) Para portales, use 2*J <sub>n</sub>		

$J_r$ : índice de rugosidad de las discontinuidades. Su valor decrece con la planaridad de las estructuras, de acuerdo a la Tabla 6-8.

**Tabla 6-8: Valores de  $J_r$**

<b>Número (índice) de Rugosidad de las Fracturas</b>		<b><math>J_r</math></b>
a) Contacto entre las paredes.		
b) Contacto entre las paredes después de un cizalle menor a 10 cm.		
A	Fracturas discontinuas.	4
B	Rugosas o irregulares y onduladas.	3
C	Lisas y onduladas.	2
D	Estriadas (slickensided) y onduladas.	1,5
E	Rugosas o irregulares, pero planas.	1,5
F	Lisas y planas	1
G	Estriadas (slickensided) y planas.	0,5
Nota: La descripción se refiere a escalas pequeñas e intermedias, en ese orden.		
c) No hay contacto entre las paredes al producirse el cizalle.		
H	Zona que contiene minerales de arcilla, de espesor suficiente para impedir el contacto de las paredes.	1
J	Zona arenosa, de grava o roca triturada, de espesor suficiente para impedir el contacto de las paredes.	1
Nota: i) Se añade 1 si el espaciamiento medio del set de fracturas más relevantes es mayor a 3m		
ii) $J_r = 0,5$ se puede usar para fracturas planas y estriadas y que estén alineados con la condición de que estén orientadas para resistencia mínima.		

$J_a$ : índice relacionado con la alteración o relleno de las discontinuidades; aumenta con el espesor y blandura del relleno. Los puntajes se muestran en la Tabla 6-9.

**Tabla 6-9: Valores de  $J_a$**

<b>Número (índice) de alteración de las Fracturas.</b>		<b><math>J_a</math></b>
<b>a) Contacto entre las paredes (sin minerales de relleno solamente costras).</b>		
A	Relleno soldado, duro, inablandable, impermeable, p.e., cuarzo o epidota.	0,75
B	Paredes de las fracturas inalteradas, solo con superficies manchadas.	1
C	Paredes ligeramente alteradas. Con recubrimiento de minerales inablandables, partículas arenosas, roca triturada sin arcilla, etc.	2
D	Recubrimiento limoso o areno-arcilloso, pequeñas fracciones de arcilla (inablandable).	3
E	Recubrimiento de arcillas ablandables o de baja fricción, p.e., caolinita o mica, también clorita, talco, yeso, grafito, etc. y pequeñas cantidades de arcilla expansivas (recubrimiento sin continuidad de 1- 2 mm de espesor o menos).	4
<b>b) Contacto entre las paredes, antes de 10 cm de cizalle (delgado relleno mineral).</b>		
F	Partículas arenosas, roca desintegrada sin arcilla, etc.	4
G	Rellenos arcillosos muy consolidados, duros (continuos pero < 5 mm de espesor).	6
H	Rellenos arcillosos de mediana a baja consolidación, blandos (continuos, pero menor a 5 mm de espesor).	8
J	Rellenos de arcillas expansivas, p.e., montmorillonita (continuos pero < 5 mm de espesor). El valor de $J_a$ depende del porcentaje de partículas tamaño arcilla expansiva.	6
<b>c) Sin contacto entre las paredes después del cizalle (rellenos de mineral)</b>		
K	Zonas o capas de roca desintegrada o triturada. Fuertemente consolidada.	6
L	Zonas o capas de arcillas y roca triturada o desintegrada. Relleno mediano o bajamente consolidado o blando.	8
M	Zonas o capas de arcillas y roca triturada o desintegrada. Arcilla expansiva. El $J_a$ depende del porcentaje de partículas tamaño arcilla expansiva.	8-12
N	Zonas o capas continuas de arcillas fuertemente consolidadas.	10
O	Zonas o capas de continuas de arcillas. Mediana a bajamente consolidadas.	13
P	Zonas o capas continuas de arcillas. Arcilla expansiva. El $J_a$ depende del porcentaje de partículas tamaño arcilla expansivas.	13-20

$J_w$ : índice reductor por la presencia de agua; su valor disminuye con la afluencia de agua, como muestra la Tabla 6-10. En este caso se utilizó  $J_w=1$ , porque el sitio presenta condiciones secas.

**Tabla 6-10: Valores de  $J_w$**

<b>5. Factor de Reducción por Agua en las Fracturas</b>		<b><math>J_w</math></b>
A	Excavación seca o infiltración menor, p.e. <5l/min localmente (húmedo o un poco de goteo).	1
B	Infiltración o presiones medianas, con lavado ocasional de los rellenos de las fracturas (principalmente goteo)	0,66
C	Gran infiltración o presión alta, en roca competente con fracturas sin relleno.	0,5
D	Gran infiltración o presión alta, considerable lavado de los rellenos.	0,33
E	Infiltración o presión excepcionalmente alta con las voladuras, decayendo con el tiempo.	0,2-0,1
F	Infiltración o presión excepcionalmente alta en todo momento.	0,1-0,05
Nota: i) Los factores C a F son estimaciones groseras. Se incrementa el $J_w$ si se mide en drenes instalados.		

**SRF**: Coeficiente relacionado con la influencia del estado tensional del macizo rocoso; los puntajes posibles se encuentran en la Tabla 6-11 y Tabla 6-12. Para este trabajo se consideró  $SRF=1$ .

**Tabla 6-11: Valores de SRF**

<b>Factor de Reducción de Esfuerzos</b>		<b>SRF</b>
a) Zonas de debilidad que intersecta la excavación y que pueden causar que el macizo se desestabilice cuando se construye el túnel.		
A	Múltiple ocurrencia de zonas de debilidad, que contienen arcillas o roca químicamente desintegrada, roca de contactos muy mala (a cualquier profundidad).	10
B	Zonas únicas de debilidad, que contienen arcillas o roca químicamente desintegrada (profundidad de la excavación < 50 m).	5
C	Zonas únicas de debilidad, que contienen arcillas o roca químicamente desintegrada (profundidad de la excavación > 50 m).	2,5
D	Múltiples zonas de cizalle en roca competente (sin arcilla), con pérdida de roca en los contactos (cualquier profundidad).	7,5
E	Zonas únicas de cizalle en roca competente (sin arcilla); profundidad < 50m.	5
F	Zonas únicas de cizalle en roca competente (sin arcilla); profundidad > 50m.	2,5
G	Fracturas débiles y abiertas, fracturamiento intenso (cubo de azúcar) (a cualquier profundidad).	5

**Tabla 6-12: Valores de SRF (continuación)**

<b>6. Factor de Reducción de Esfuerzos (continuación)</b>		<b>SRF</b>
b) Roca competente, problemas de esfuerzos.		
H	Esfuerzo bajo, cerca de la superficie.	2,5
J	Esfuerzos medianos, condición de esfuerzo favorable.	1
K	Esfuerzo grande, estructura muy cerrada. Generalmente favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de las cajas de la excavación.	0,5-2
L	Moderado lajamiento después de una hora en roca masiva.	5-50
M	Lajamiento y "rock burst" después de unos pocos minutos en roca masiva.	50-200
N	Fuerte "rock burst" y deformación dinámica inmediata en roca masiva.	200-400
c) Roca deformable (squeezing rock): flujo plástico en roca competente bajo la influencia de presiones altas.		
O	Deformación moderada.	5-10
P	Deformación alta.	10-20
d) Roca expansiva (swelling rock): la acción química expansiva depende de la presencia de agua.		
R	Expansión moderada.	5-10
S	Expansión alta.	10-15

#### 6.2.4 RMR

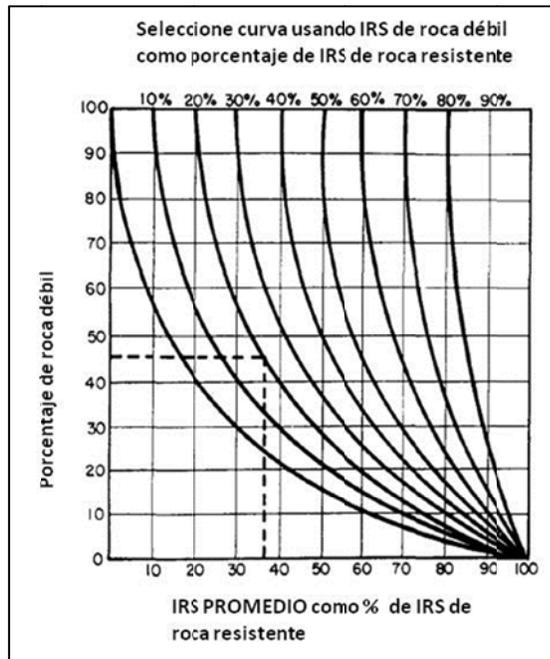
Sistema desarrollado entre 1972-1973 por Bieniawski para clasificar el macizo rocoso asignándole puntajes en distintos parámetros, los que finalmente se suman. En este trabajo se utiliza RMR de Laubscher (1990), método que se describe a continuación.

##### **RMR Laubscher (1990)**

Es una modificación del RMR de Bieniawski. Incluye en un único grupo la condición de las discontinuidades y agua; además, incluye el RQD dentro de una de las formas de calcular la separación de las discontinuidades. Por último, varios de los puntajes asociados no son lineales.

Los parámetros considerados, así como sus ratings, se enumeran a continuación.

**Resistencia de roca intacta (IRS):** Por definición es la resistencia a la compresión bajo condiciones no confinadas de la roca entre fracturas y diaclasas. Para el cálculo de RMR, se debe ponderar el IRS de roca dura y roca débil, para obtener una evaluación más realista del macizo. Los valores se extraen de la Figura 6-3.



**Figura 6-3: Curvas de determinación de IRS ponderado para macizos con zonas débiles y resistentes**

El rango para este parámetro varía de 0 a 185 MPa. El límite superior de 185 MPa ha sido establecido debido a que valores superiores de IRS tienen poca influencia en la resistencia de macizos rocosos fracturados. El puntaje se obtiene de la Tabla 6-13.

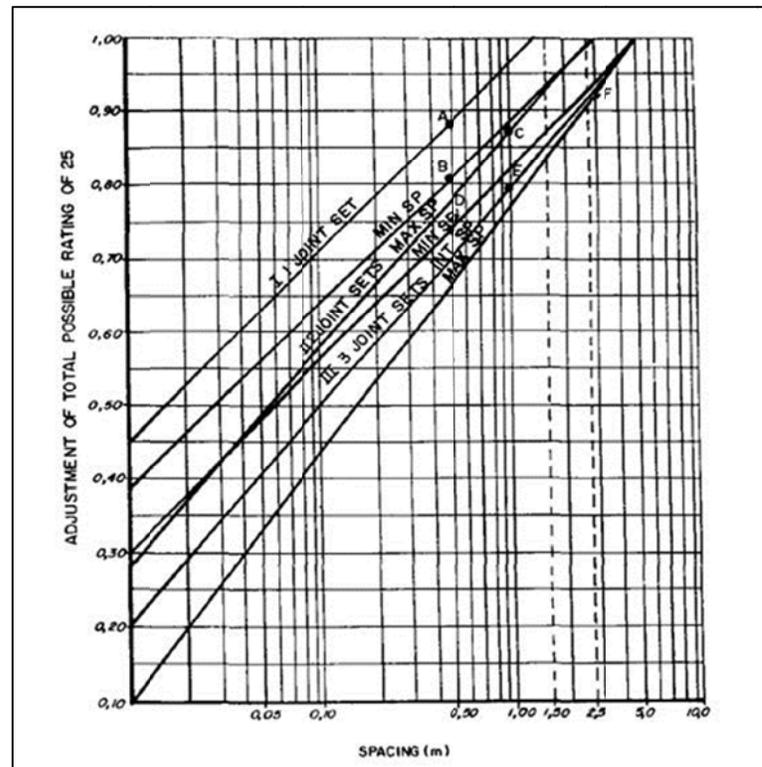
**Tabla 6-13: Puntajes de IRS, RQD, FF**

Rating IRS-MPa (%)	Rating RQD (%)	Espaciamiento de diaclasas (m)	Frecuencia de fracturas, ff/m				
			Promedio por metro	Rating			
				1 set	2 set	3 sets	
>185	20	97-100	15	0.10	40	40	40
165-185	18	84-96	14	0.15	40	40	40
145-164	16	71-83	12	0.20	40	40	38
125-144	14	56-70	10	0.25	40	38	36
105-124	12	44-55	8	0.30	38	36	34
85-104	10	31-43	6	0.50	36	34	31
65-84	8	17-30	4	0.80	34	31	28
45-64	6	4-16	2	1.00	31	28	26
35-44	5	0-3	0	1.50	29	26	24
25-34	4			2.00	26	24	21
12-24	3			3.00	24	21	18
5-11	2			5.00	21	18	15
1-4	1			7.00	18	15	12
				10.00	15	12	10
				15.00	12	10	7
				20.00	10	7	5
				30.00	7	5	2
				40.00	5	2	0
			Dejar margen para recuperación de testigo				

**Espaciamiento de fracturas y diaclasas (RQD+JS o FF):** Se contabilizan un máximo de tres sistemas de diaclasas ya que estos definen los bloques de roca; cualquier otro sólo modificará la forma de los bloques. Existen dos técnicas para establecer estos parámetros:

a) Medición del RQD y espaciamento de diaclasas (JS) separadamente, los puntajes máximos son de 15 y 25 respectivamente.

El rating de RQD se fija según los puntajes indicados en la Tabla 6-7. El espaciamento se asigna de acuerdo a la Figura 6-4 considerando un tope de tres sistemas; en caso de existir cuatro o más, se seleccionan los tres de menor espaciamento. Esta técnica es la utilizada para calcular RMR en este trabajo.



**Figura 6-4: Asignación de puntaje por espaciamento de diaclasas**

b) Medir todas las discontinuidades y registrarlas como frecuencia de fracturas por metro (FF/m) con un puntaje máximo de 40 de acuerdo a la Tabla 6-13 (corresponde a la suma de los puntajes 15 y 25 estimados con la metodología anterior).

**Condición de diaclasas y agua:** Depende de las propiedades de fricción de las diaclasas, basándose en rugosidad a nivel macro y micro, alteración de las paredes, tipo y espesor de relleno y condiciones de humedad; esto contrasta con Bieniawski 1989, que considera estos dos parámetros por separado. Los puntajes asignables se encuentran en la Tabla 6-14.

En sondajes, debido a que no es posible determinar la condición de agua ni la expresión a gran escala de las discontinuidades, se utiliza el siguiente criterio de aproximación: Se asume condición seca para los intervalos del testigo sobre el nivel freático; para los que están bajo este nivel se considera húmeda. En cuanto a la expresión a gran escala, se asume plana, la más desfavorable.

**Tabla 6-14: Puntajes de condición de diaclasas y agua (Laubscher, 1990)**

Parámetro	Ajustes porcentuales acumulativos de un rating máximo de 40					
	Descripción	Seco	Ajustes, %			
			Húmedo	Presión Moderada	Presión Alta	
A Expresión a gran escala de la diaclasa	Multidireccional	100	100	95	90	
	Unidireccional	95	90	85	80	
	Curva	85	80	75	70	
	Ligeramente ondulada	80	75	70	65	
	Recta	75	70	65	60	
B Expresión a pequeña escala 200mm*200mm	Rugosa irregular/escalonada	95	90	85	80	
	Suave escalonada	90	85	80	75	
	Estriada escalonada	85	80	75	70	
	Rugosa ondulada	80	75	70	65	
	Suave ondulada	75	70	65	60	
	Estriada ondulada	70	65	60	55	
	Rugosa planar	65	60	55	50	
	Suave planar	60	55	50	45	
Estriada planar	55	50	45	40		
C Alteración de la pared de la diaclasa más débil que la roca y sólo si es más débil que el relleno		75	70	65	60	
D Relleno de diaclasas	Material no suave y cizallado	Grueso	90	85	80	75
		Medio	85	80	75	70
		Fino	80	75	70	65
	Material suave cizallado, por ejemplo talco	Grueso	70	65	60	55
		Medio	60	55	50	45
		Fino	50	45	40	35
	Espesor del gouge < amplitud de irregularidades	45	40	35	30	
	Espesor del gouge > amplitud de irregularidades	30	20	15	10	

En este trabajo no se introdujeron los ajustes para calcular el MRMR asociado. Tampoco se consideraron ajustes por ángulo de discontinuidades (con respecto al eje de sondajes), ni por continuidad de estructuras.

Como resultado, la roca puede pertenecer a una de las cinco categorías indicadas en la Tabla 6-15. Cada clase tiene asociado un color, el que también se indica en la misma tabla.

**Tabla 6-15: Clasificación RMR de Laubscher 1990**

Clase	1		2		3		4		5	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Rating	100-81		80-61		60-41		40-21		20-0	
Descripción	Muy Buena		Buena		Regular		Mala		Muy Mala	
Color										

### **6.3 Anexo C: Tablas de cálculos RMR y Q en ventanas geotécnicas**

Tabla 6-16: Cálculos RMR ventanas Niveles 1 y 2

Ventana N°	Dominio	Ubicación	Litología	Alteración	IRS					CANT. SIST	SISTEMAS			N° total fracturas	RQD	IRS Pje	RQD Pje	Js Pje	(FF) Pje	JOINT CONDITION				Total Condición Discon.	GSI (observado in-situ)	RMR Total Laubscher 1990 (RQD+Js)	Clasificación RMR Laubscher	
					Weak Rock		Strong rock		IRSmin		IRS Pond.	N° Fract/m	N° Fract/m							N° Fract/m	Rugosidad		Alteración Pared					Relleno
					%	MPa	%	MPa													IRSmax	Macro						
A1	I	Nivel 1	AND	ARG	30	65-70	70	90-100	0,70	83	3	3,3	1,3	3,3	8	89	8	14	8	19	2	3	1	0,80	17	VB/F 45-50	47	Roca Regular Clase B
A2	I	Nivel 1	AND	CHL	0	0	100	80-100	1,00	100	2	5,0	3,3	0,0	8	87	10	14	13	19	2	3	1	0,60	12	VB/F 45-50	49	Roca Regular Clase B
A3	II	Nivel 1	AND	ARG	10	50-60	90	90-100	0,60	90	3	3,3	1,3	2,0	7	92	10	14	9	21	2	3	1	0,60	12	B/F 50-55	45	Roca Regular Clase B
A4	II	Nivel 1	AND	LIM	60	40	40	100	0,40	46	3	3,3	2,5	1,4	7	91	6	14	8	20	2	5	3	0,70	13	VB/F 45-50	41	Roca Regular Clase B
A5	IV	Nivel 1	AND	SIL	0	0%	100	80	0,38	80	3	3,3	6,7	2,0	12	75	8	12	6	16	1	3	1	0,70	14	VB/F 40-45	40	Roca Mala Clase A
A6	VI	Nivel 1	AND	SIL	60	30	40	60	0,42	35	2	5,0	6,7	0,0	12	76	5	12	11	16	2	3	1	0,80	17	VB/F 40-45	45	Roca Regular Clase B
A7	IV	Nivel 1	AND	CHL	30	50	70	90	0,56	68	3	5,0	2,2	1,3	8	76	8	12	8	19	2	3	1	0,60	12	VB/F 45-50	40	Roca Mala Clase A
A8	V	Nivel 1	DIO	CALC	20	60-70	80	90-100	0,70	88	2	2,0	4,0	0,0	6	95	10	14	15	21	2	3	1	0,60	12	B/F 55-60	51	Roca Regular Clase A
B1	VI	Nivel 2	SMFE	CALC	20	70	80	100	0,70	87	3	2,5	4,0	2,5	9	85	10	14	7	18	2	2	1	0,85	16	VB/F 50-55	47	Roca Regular Clase B
B2	V	Nivel 2	DIO	ARG	10	70	90	100-120	0,58	108	3	1,8	1,4	1,0	4	90	12	14	11	24	1	3	1	0,45	9	VB/F 45-50	46	Roca Regular Clase B
B3	V	Nivel 2	DIO	ARG	0	0	100	70-80	0,00	80	3	4,0	4,0	0,5	9	87	8	14	9	19	2	3	1	0,60	12	VB/F 45-50	43	Roca Regular Clase B
B4	VI	Nivel 2	BXX	CHL	10	60	90	90-100	0,60	90	3	5,0	4,0	2,2	11	76	10	12	6	17	2	3	1	0,85	18	VB/F 45-50	46	Roca Regular Clase B
B5	VI	Nivel 2	BXX	SIL	0	0	100	50	0,60	50	3	2,5	4,0	4,0	11	80	6	12	6	17	2	3	3	0,80	12	VB/P 35-40	36	Roca Regular Clase B
B6	VI	Nivel 2	BXX	CALC	0	0	100	100-120	0,00	120	3	3,3	1,0	4,0	8	87	12	14	8	19	1	2	1	0,60	11	VB/F 40-45	45	Roca Regular Clase B
B7	VI	Nivel 2	SMFE	CALC	0	0	100	125	0,00	125	3	1,0	0,5	5,0	7	94	14	14	11	21	1	3	1	0,45	9	B/F 50-55	48	Roca Regular Clase B

Tabla 6-17: Planilla de cálculos RMR ventanas Nivel 3 y superficie

Ventana N°	Dominio	Ubicación	Litología	Alteración	IRS						CANT. SIST	SISTEMAS			N° total fracturas	RQD	IRS Pje	RQD Pje	Js Pje	(FF) Pje	JOINT CONDITION				Total Condición Discon.	GSI (observado in-situ)	RMR Total Laubscher 1990 (RQD+Js)	Clasificación RMR Laubscher
					Weak Rock		Strong rock		IRSmin	IRS Pond.		N° Fract/m	N° Fract/m	N° Fract/m							Rugosidad		Alteración Pared	Relleno				
					%	MPa	%	MPa	IRSmax												Macro	Micro						
C1	III	Nivel 3	BXX	CALC	60	40	40	100	0,40	46	3	2,0	1,0	3,3	6	94	6	14	9	21	1	6	1	0,80	19	VB/F 45-50	48	Roca Regular Clase B
C2	V	Nivel 3	DIO	SIL	60	45-50	40	70-80	0,63	54	3	5,0	2,5	5,0	13	74	6	12	6	16	2	3	1	0,80	17	VB/F 40-45	41	Roca Regular Clase B
C3	V	Nivel 3	DIO	CALC	45	40-50	55	70-80	0,63	60	3	5,0	5,0	1,0	11	75	6	12	7	17	2	3	1	0,70	15	VB/F 40-45	40	Roca Mala Clase A
C4	V	Nivel 3	BXX	CALC	20	50	80	90	0,56	72	2	3,3	5,0	3,3	12	76	8	12	13	19	3	3	1	0,70	15	VB/F 45-50	48	Roca Regular Clase B
C5	III	Nivel 3	BXX	CALC	0	0	100	90-120	0,00	120	3	4,0	2,5	1,7	8	88	12	14	8	19	2	3	1	0,45	9	VB/F 40-45	43	Roca Regular Clase B
C6	III	Nivel 3	DIO	ARG	0	0	100	80-90	0,00	90	3	2,0	3,3	3,3	9	86	10	14	7	19	2	3	1	0,45	9	VB/F 40-45	40	Roca Mala Clase A
C7	VI	Nivel 3	BXX	CALC	0	0	100	55-60	0,00	60	3	2,2	2,9	2,0	7	92	6	14	8	20	2	3	1	0,60	12	VB/F 40-45	40	Roca Mala Clase A
C8	VI	Nivel 3	MFE	CALC	20	70	80	100	0,70	88	3	2,5	2,0	3,3	8	84	10	14	8	19	2	3	1	0,80	17	VB/F 45-50	49	Roca Regular Clase B
C9	VI	Nivel 3	MFE	CALC	10	80	90	130	0,80	117	2	4,0	5,0	0,0	9	90	12	14	13	18	1	3	1	0,60	12	B/F 50-55	51	Roca Regular Clase A
C10	VI	Nivel 3	MFE	CALC	0	0	100	70-80	0,00	80	2	4,0	2,2	0,0	6	94	8	14	14	21	1	1	1	0,80	13	B/F 50-55	49	Roca Regular Clase B
V1	VI	Superficie	AND	ARG	0	0	100	80	0,00	80	2	1	1,0	0,0	2	50	8	8	20	29	1	1	3	0,70	9	VB/F 40-45	45	Roca Regular Clase B
V2	VI	Superficie	BXX	LIM	0	0	100	70	0,00	70	3	1	0,5	1,0	3	70	8	10	14	27	1	1	3	0,45	6	BD/F 40-45	38	Roca Mala Clase A
V3	IV	Superficie	AND	ARG	0	0	100	70	0,00	70	2	1,7	1,0	0,0	3	60	8	10	18,5	27	1	1	3	0,80	10	VB/F 45-50	46	Roca Regular Clase B
V4	IV	Superficie	AND	ARG	0	0	100	100	0,00	100	3	1	1,0	1,0	3	80	10	12	13	27	1	2	1	0,80	14	VB/F 45-50	49	Roca Regular Clase B
V5	VI	Superficie	AND	ARG	0	0	100	70	0,00	70	3	1	2,5	0,3	4	80	8	12	13	24	2	3	3	0,80	12	VB/F 40-45	45	Roca Regular Clase B
V6	IV	Superficie	AND	ARG	0	0	100	70	0,00	70	3	2	3,3	2,0	7	60	8	10	8	20	2	3	3	0,80	12	VB/F 40-45	38	Roca Mala Clase A
V7	IV	Superficie	AND	ARG	0	0	100	70	0,00	70	2	4	1,0	0,0	5	75	8	12	16	22	2	2	3	0,70	10	VB/F 40-45	46	Roca Regular Clase B
V8	IV	Superficie	AND	ARG	0	0	100	70	0,00	70	3	1	5,0	1,0	7	70	8	10	10	20	2	3	3	0,70	11	VB/F 40-45	39	Roca Mala Clase A

**Tabla 6-18: Planilla de cálculo de Q de Barton en ventanas subterráneas**

Ventana	Dominio	Ubicación	Litología	Alt.	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q de Barton (2000)	Clasificación
A1	I	Nivel 1	AND	ARG	89	9	1,5	6	1	1	2,47	Roca Mala
A2	I	Nivel 1	AND	CHL	87	4	1,5	6	1	1	5,44	Roca Media
A3	II	Nivel 1	AND	ARG	92	12	1,5	6	1	1	1,92	Roca Mala
A4	II	Nivel 1	AND	LIM	91	9	2	6	1	1	3,37	Roca Mala
A5	IV	Nivel 1	AND	SIL	75	15	1,5	6	1	1	1,25	Roca Mala
A6	VI	Nivel 1	AND	SIL	76	6	1,5	8	1	1	2,38	Roca Mala
A7	IV	Nivel 1	AND	CHL	76	15	1,5	6	1	1	1,27	Roca Mala
A8	V	Nivel 1	DIO	CALC	95	4	1,5	8	1	1	4,45	Roca Media
B1	VI	Nivel 2	SMFE	CALC	85	9	1	6	1	1	1,57	Roca Mala
B2	V	Nivel 2	DIO	ARG	90	15	1,5	8	1	1	1,13	Roca Mala
B3	V	Nivel 2	DIO	ARG	87	9	1,5	8	1	1	1,81	Roca Mala
B4	VI	Nivel 2	BXX	CHL	76	15	1,5	6	1	1	1,27	Roca Mala
B5	VI	Nivel 2	BXX	SIL	80	9	1,5	6	1	1	2,22	Roca Mala
B6	VI	Nivel 2	BXX	CALC	87	9	1	6	1	1	1,61	Roca Mala
B7	VI	Nivel 2	SMFE	CALC	94	9	1,5	8	1	1	1,96	Roca Mala
C1	III	Nivel 3	BXX	CALC	94	12	3	8	1	1	2,94	Roca Mala
C2	V	Nivel 3	DIO	SIL	74	9	1,5	8	1	1	1,54	Roca Mala
C3	V	Nivel 3	DIO	CALC	75	12	1,5	6	1	1	1,56	Roca Mala
C4	V	Nivel 3	BXX	CALC	76	6	1,5	6	1	1	3,17	Roca Mala
C5	III	Nivel 3	BXX	CALC	88	12	1,5	8	1	1	1,38	Roca Mala
C6	III	Nivel 3	DIO	ARG	86	12	1,5	8	1	1	1,34	Roca Mala
C7	VI	Nivel 3	BXX	CALC	92	12	1,5	8	1	1	1,44	Roca Mala
C8	VI	Nivel 3	MFE	CALC	84	12	1,5	8	1	1	1,31	Roca Mala
C9	VI	Nivel 3	MFE	CALC	90	4	1,5	6	1	1	5,63	Roca Media
C10	VI	Nivel 3	MFE	CALC	94	4	0,5	8	1	1	1,47	Roca Mala

## 6.4 Anexo D: Planos de Litología y Mineralización

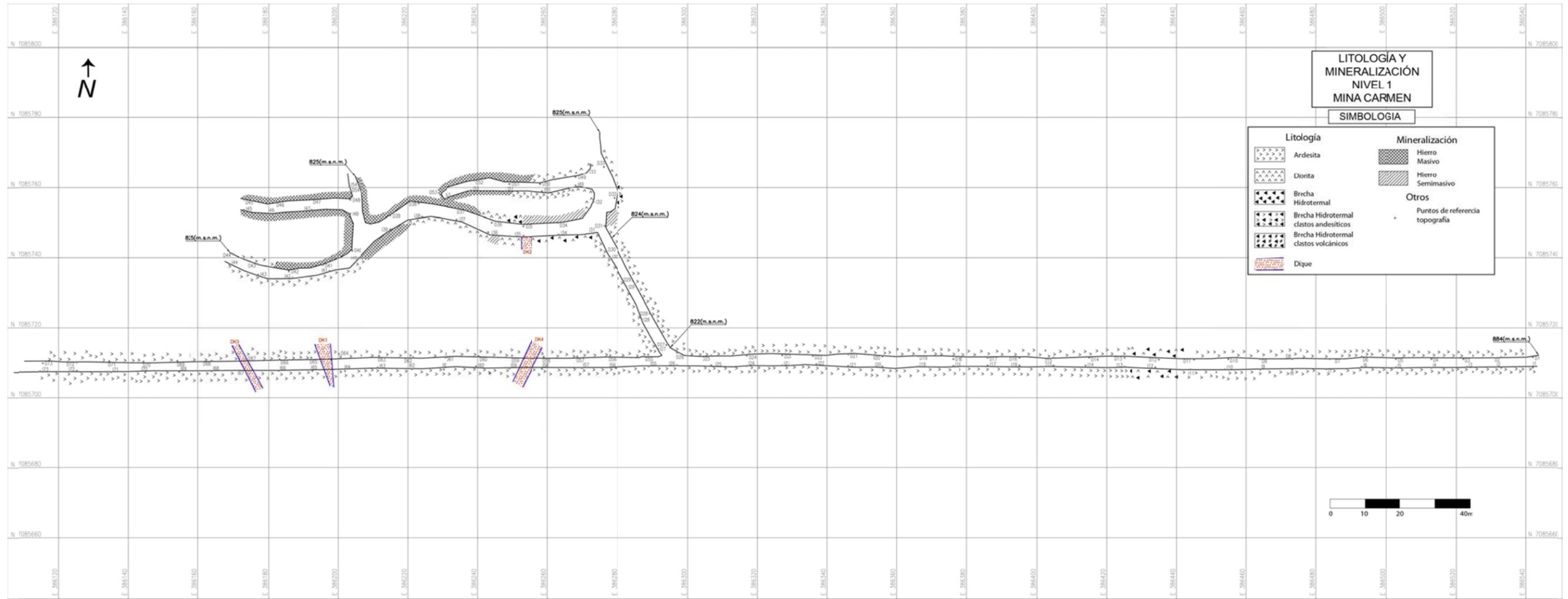


Figura 6-5: Litología y mineralización en Nivel 1

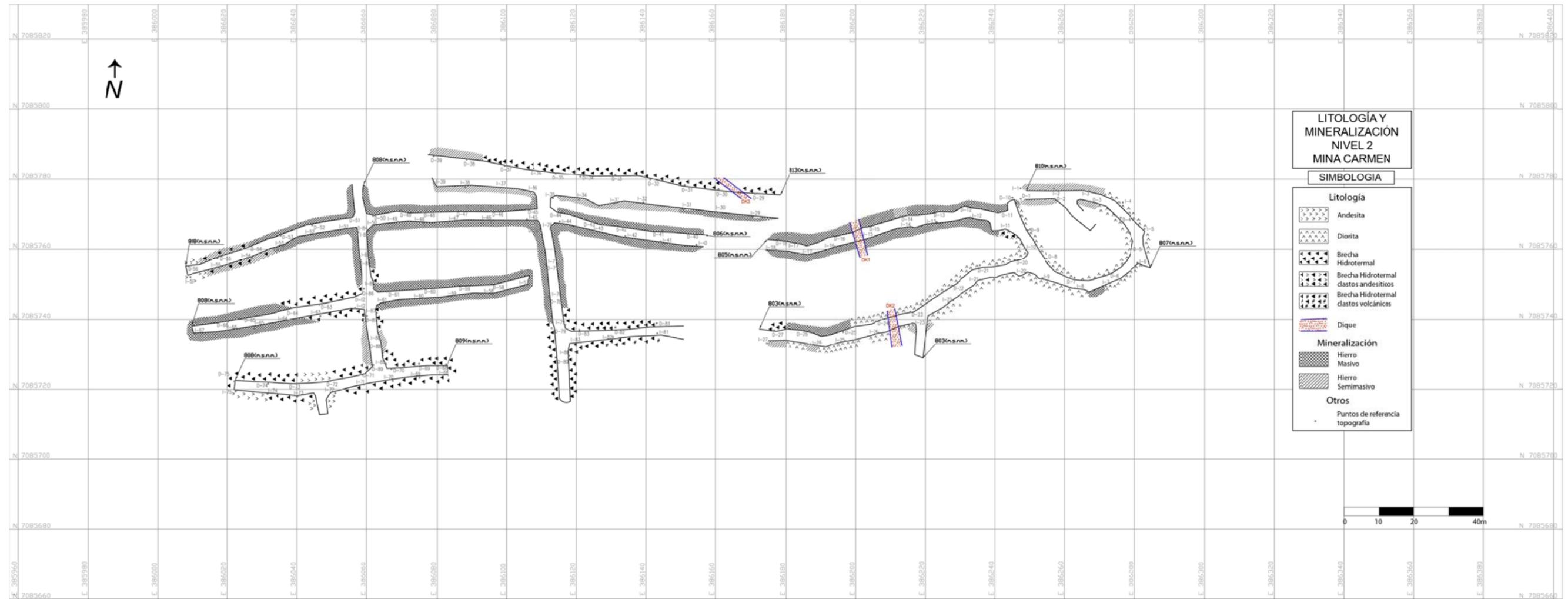


Figura 6-6: Litología y mineralización en Nivel 2

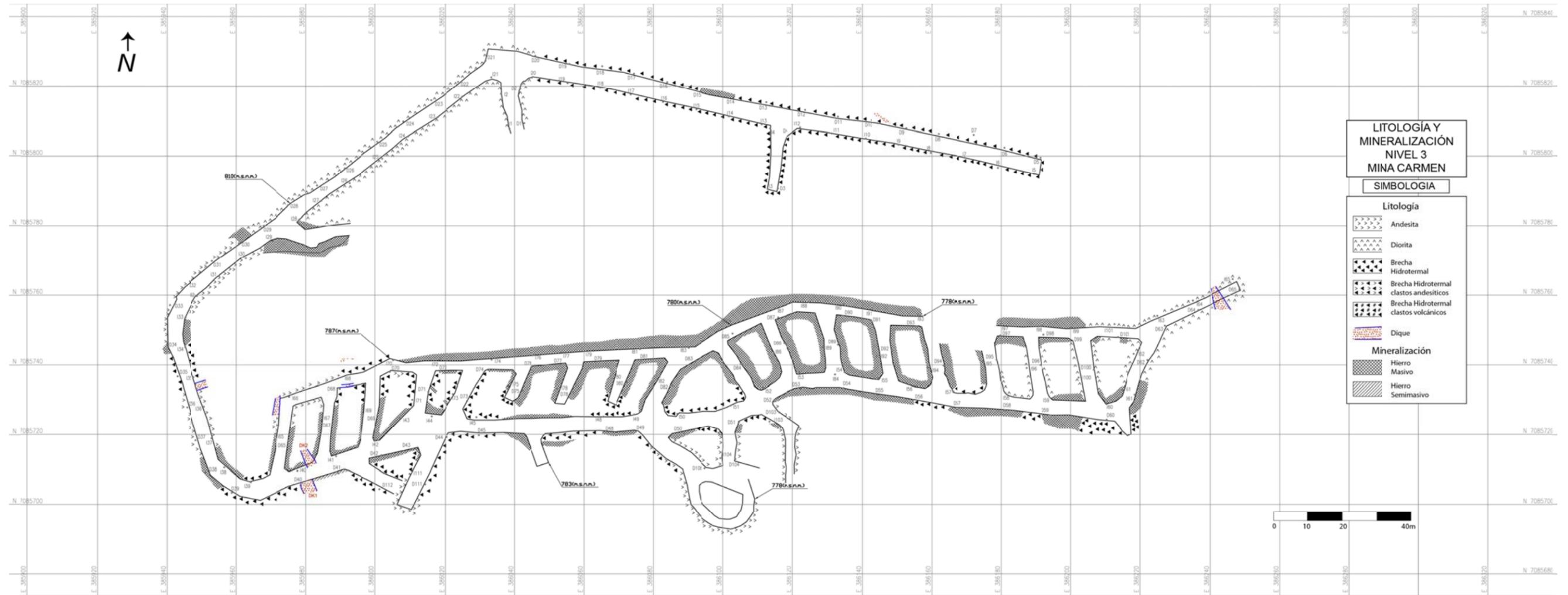


Figura 6-7: Litología y mineralización en Nivel 3

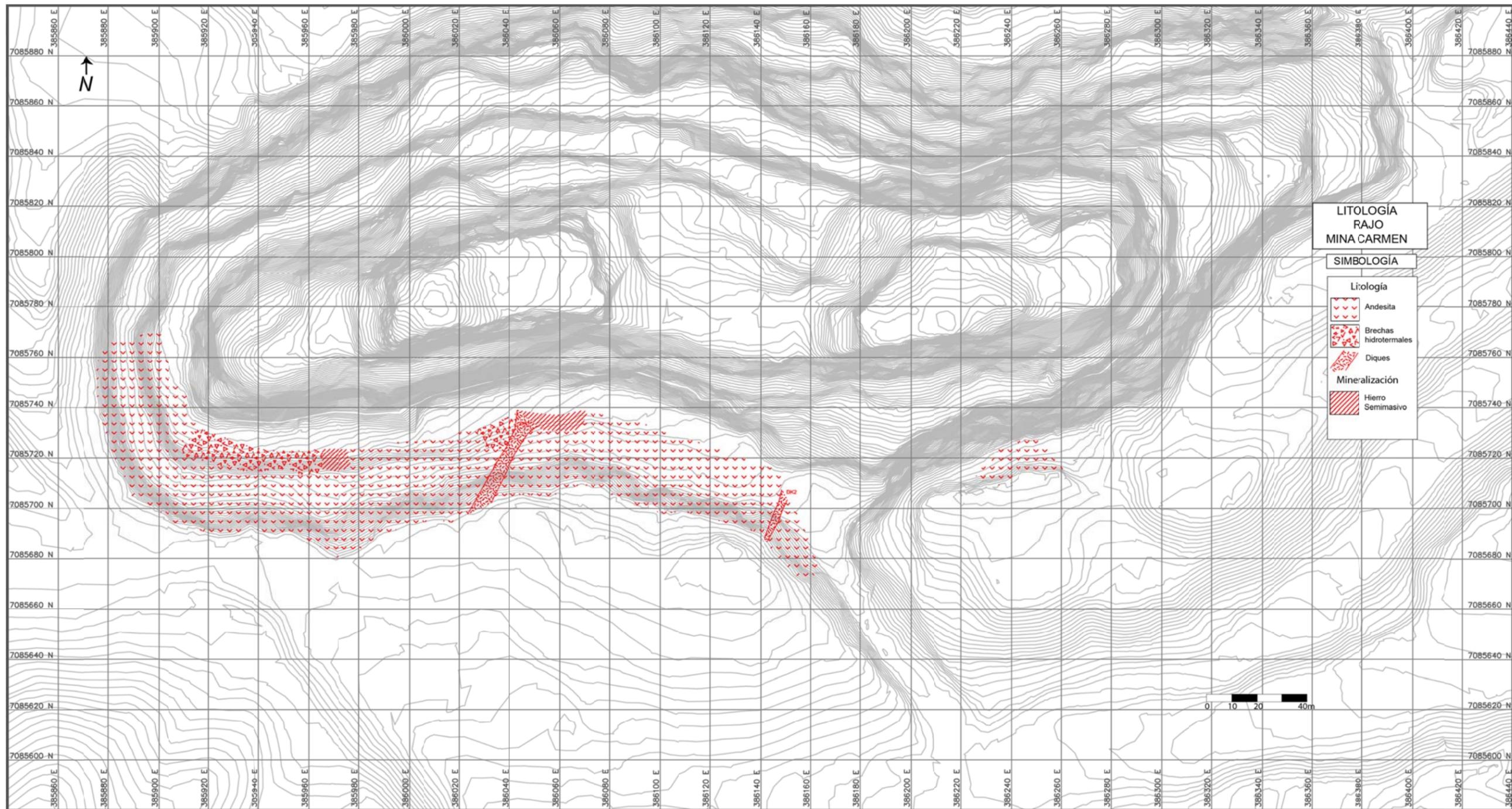


Figura 6-8: Litología y mineralización en Rajo Mina Carmen

## **6.5 Anexo E: Planos de estructuras niveles**

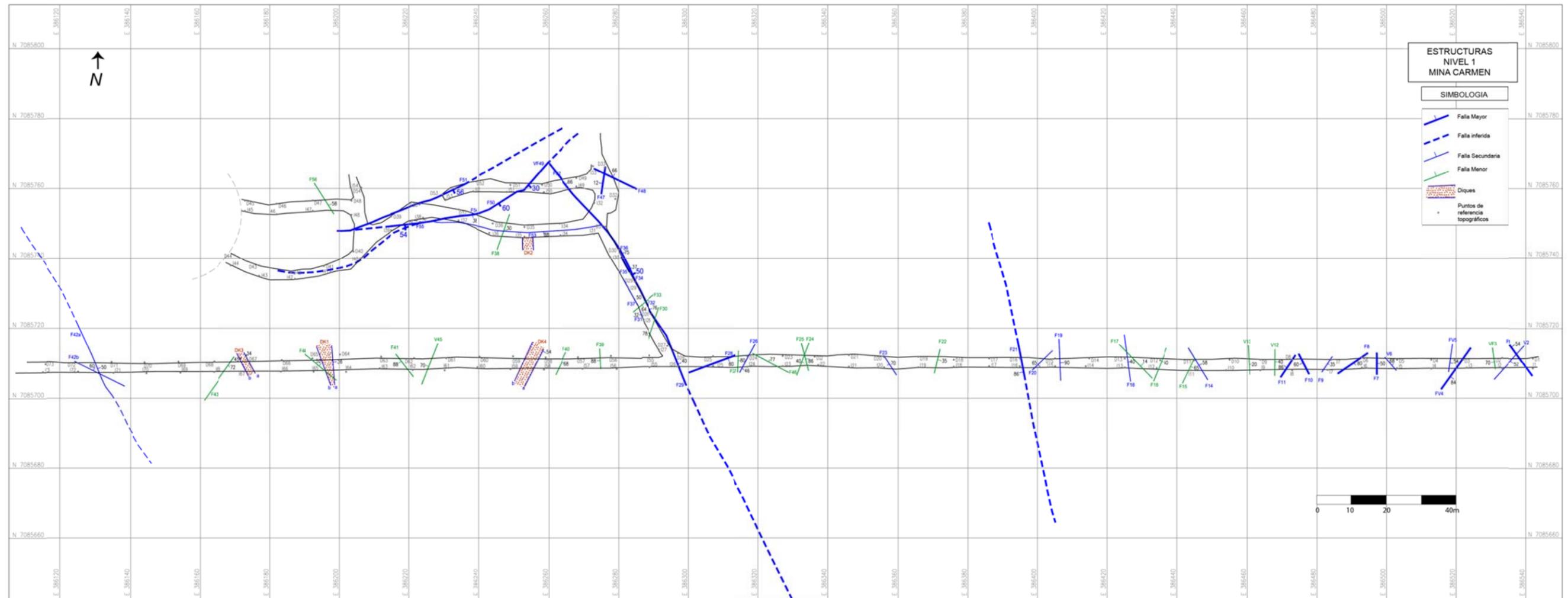


Figura 6-9: Estructuras levantadas en Nivel 1

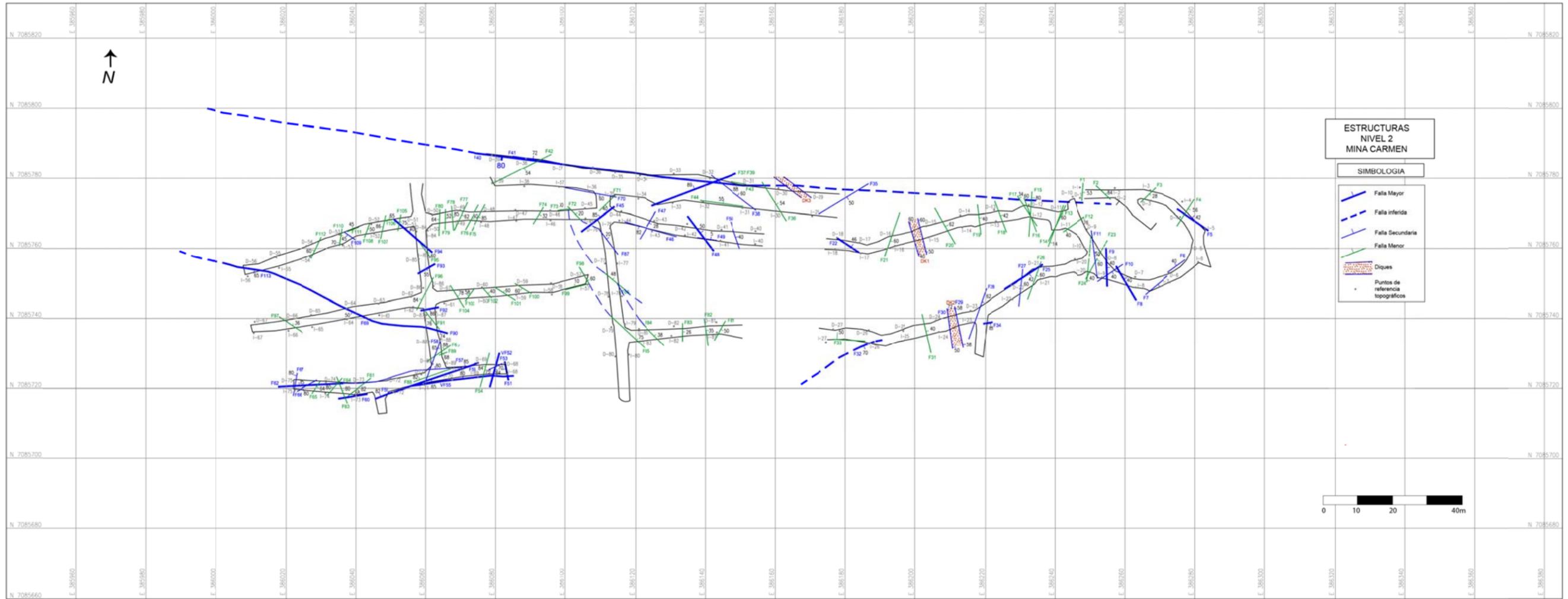


Figura 6-10: Estructuras levantadas en Nivel 2

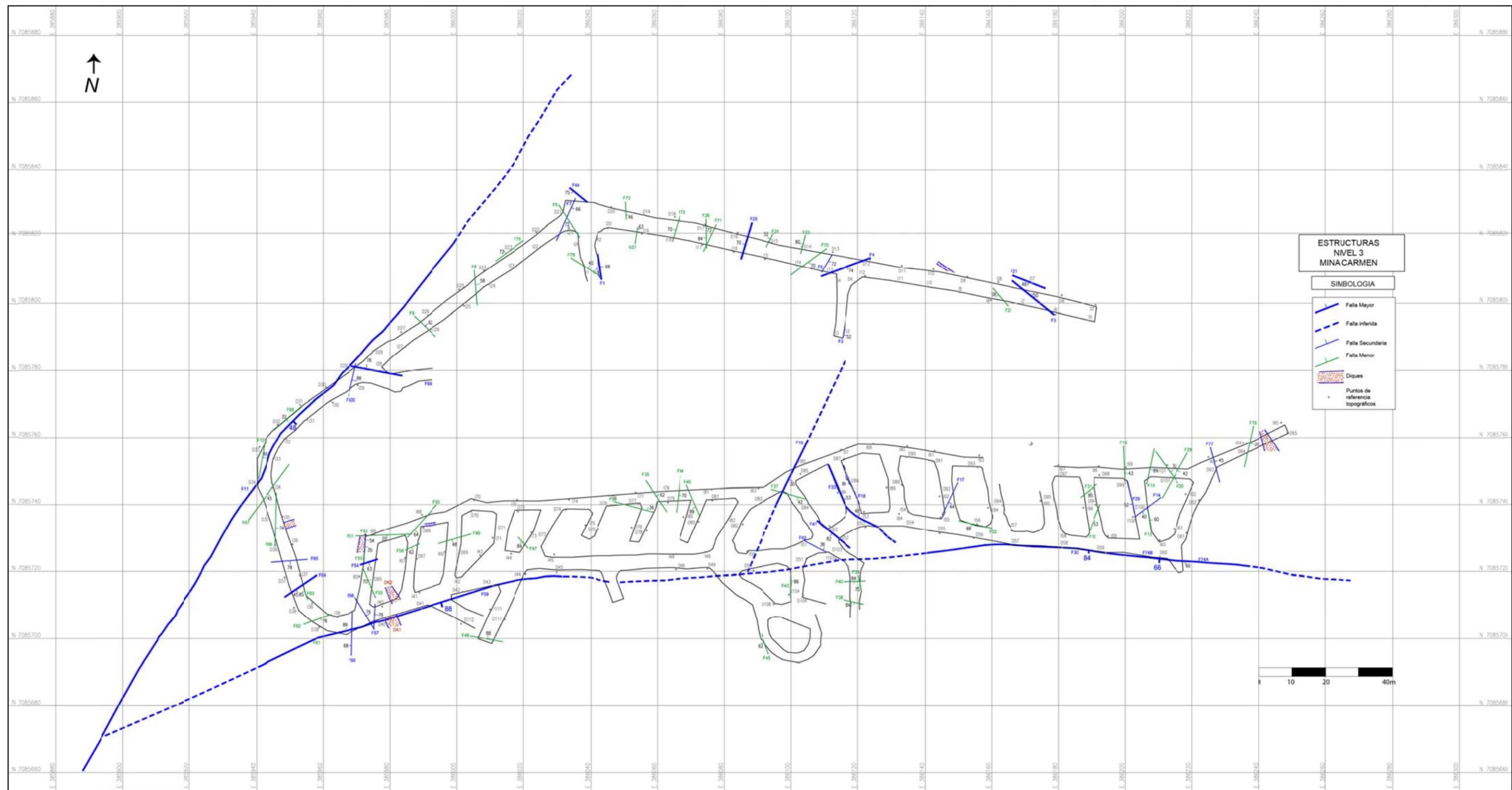


Figura 6-11: Estructuras levantadas en Nivel 3

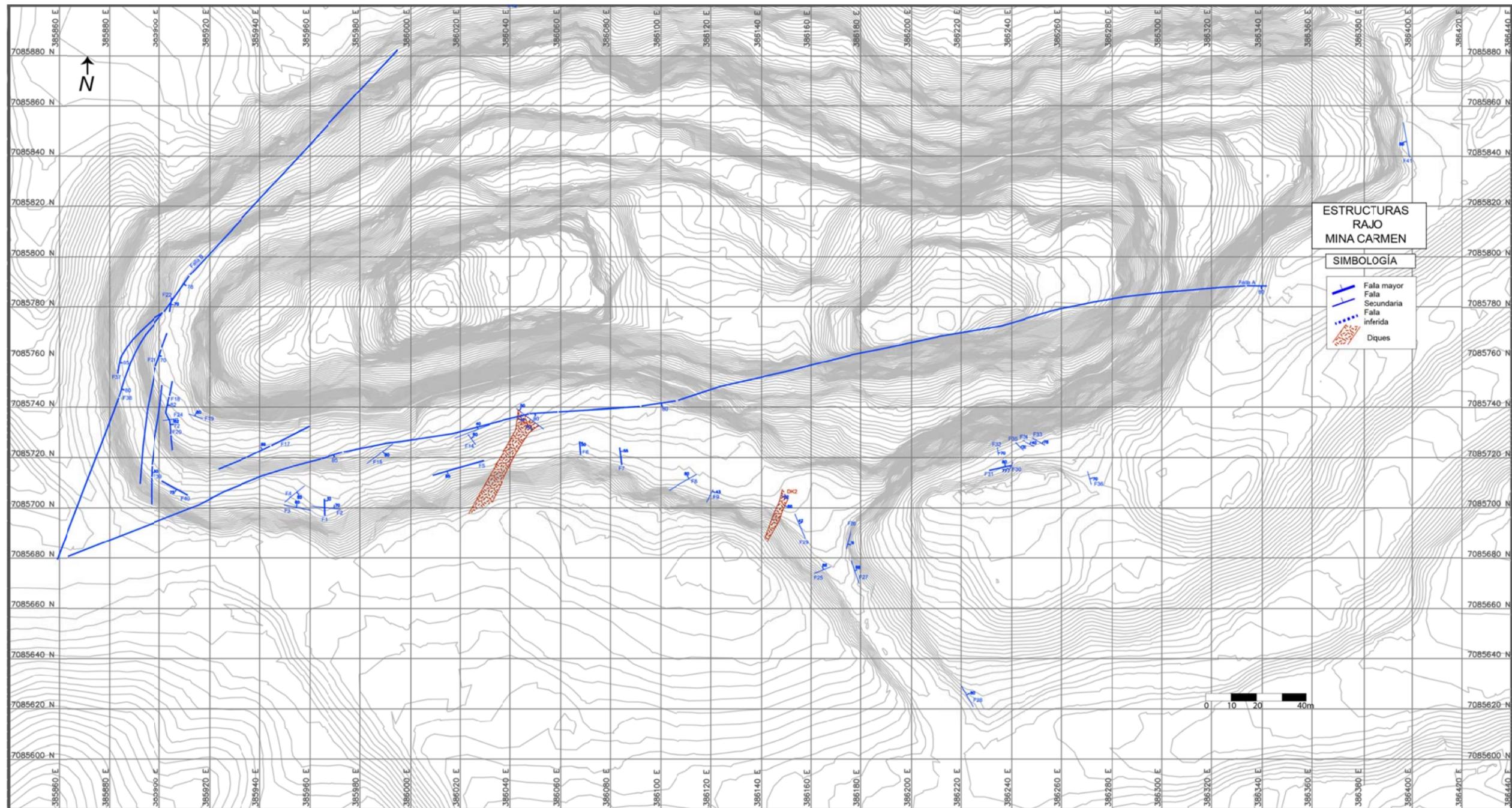


Figura 6-12. Estructuras levantadas en Rajo Mina Carmen