



**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**

**DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

# **MODELAMIENTO DE UNIDADES LITO-GEOTÉCNICAS, PROYECTO CARACOLES**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA**

**CAMILA SOTO LEIVA**

**PROFESOR GUÍA:  
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
XAVIER EMERY  
SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA**

**SANTIAGO DE CHILE  
SEPTIEMBRE, 2012**

## RESUMEN

Este estudio se desarrolló a partir de la necesidad de caracterizar el macizo rocoso del proyecto Caracoles, yacimiento tipo pórfido cuprífero, el cual se ubica en el distrito Centinela perteneciente a la comuna de Sierra Gorda en la región de Antofagasta.

El objetivo de esta investigación se basó en la elaboración de un modelo de unidades lito-geotécnicas del proyecto, mediante datos geotécnicos y geológicos. Para realizar la confección descrita anteriormente se efectuaron las siguientes tareas: Estándares de mapeo geotécnico, compilación de la información en una base de datos, validación de la información existente y mediante el análisis de datos, la posterior caracterización geotécnica de cada litología. De esta forma se lograron reconocer distintas poblaciones de datos con una continuidad espacial y una base geológica que explica estas diferencias.

Como resultado de este proceso, se concluyó que la distribución espacial de la resistencia de la roca se ve seriamente afectada por: la Zona de Óxidos y la Falla Roja. Dicho de otro modo, la roca expuesta a estos procesos disminuirá considerablemente su resistencia. A partir de lo anterior se interpretó un sistema paralelo a la Falla Roja, ubicada en la zona de baja resistencia (al este de la Falla Roja) la cual muestra una intensa alteración argílica y zonas de cizalle.

Finalmente, se realizó el modelamiento de unidades lito-geotécnicas con su respectiva caracterización en cuanto a resistencia UCS, parámetros RQD y RMR.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>1</b>	<b>INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
1.1	GENERALIDADES	1
1.2	OBJETIVO GENERAL	1
1.3	OBJETIVOS ESPECIFICOS	2
1.4	ALCANCES	2
1.5	METODO DE TRABAJO	2
<b>2</b>	<b>MARCO GEOLOGICO</b>	<b>3</b>
2.1	GEOLOGÍA DISTRITAL	3
2.2	GEOLOGIA YACIMIENTO CARACOLES	5
2.2.1	GENERALIDADES	5
2.2.2	LITOLOGÍA Y ALTERACIÓN	6
2.2.3	ZONA MINERAL	8
2.2.4	ESTRUCTURAS	9
<b>3</b>	<b>CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA</b>	<b>10</b>
3.1	VARIABLES GEOTECNICAS DE INTERES	10
3.1.1	ZONA TECTONIZADA	10
3.1.2	ROCK QUALITY DESIGNATION-(RQD)	14
3.1.3	RESISTENCIA	14
3.1.5	CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO (RMR)	17
3.1.6	INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA (GSI)	24
<b>4</b>	<b>ANÁLISIS DE DATOS</b>	<b>27</b>
4.1	VALIDACIÓN DE LA BASE DE DATOS	27
4.2	ANÁLISIS DE LA BASE DE DATOS	35
<b>5</b>	<b>MODELAMIENTO DE UNIDADES LITO-GEOTÉCNICAS</b>	<b>39</b>
5.1	LIMITACIONES MODELAMIENTO	39
5.2	METODOLOGÍA	40
5.3	UNIDADES LITO-GEOTÉCNICAS	44
5.3.1	TOBA ANDESÍTICA (TUFAN)	44
5.3.2	PORFIDO DIORITICO (PDRTC)	56
5.3.3	DIATREMA (DIA)	64
5.3.4	BRECHA DE TURMALINA (BX TUR)	76
5.3.5	PORFIDO DACITICO (PORDAC)	81
5.3.6	PORFIDO GRANODIORITICO (PGRND)	85
5.3.7	PORFIDO RIODACÍTICO (PRD, DOMO)	89
5.3.8	SECUENCIA VOLCANO CLASTICA (SVC)	94
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>97</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>100</b>
<b>8</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>102</b>
<b>9</b>	<b>ANEXOS</b>	<b>103</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Perfil E_W mostrando la morfología regional d la zona de estudio. Geology of Chile, Charrier et al, 2007.	3
Figura 2.2: Conformación Geológico Estructural del Yacimiento Caracoles. ....	4
Figura 2.3: Ubicación General Proyecto Caracoles.....	5
Figura 2.4: Planta de Litologías y Estructuras, cota 1800 .....	7
Figura 2.5: Perfil de Mineralización, Sección N-S (Coordenadas 490300.00 E).....	8
Figura 2.6: Planta de las traza de fallas mayores en diseño de pit final. ....	9
Figura 3.1: Medición de tramos y formulación para el cálculo de RQD. ....	14
Figura 3.2: Correlación de ensayos de carga puntual y la resistencia a la compresión unaxial mediante pruebas de laboratorio.....	16
Figura 3.3: Ejemplo de cálculo de número de fracturas en un tramo con zona fracturada. ....	20

## ÍNDICE DE FOTOS

Foto 3.1: Tramo de roca sana con baja alteración. ....	11
Foto 3.2: Segmento de sondaje con una alta frecuencia de Fracturamiento. ....	11
Foto 3.3: Brecha de falla con matriz arcillosa y granos subangulares. ....	12
Foto 3.4: Roca alterada. ....	12
Foto 3.5: Zona afectada por cizallamiento (segmento de la Falla Roja). ....	13
Foto 3.6: Roca molida. ....	13
Foto 4.1: Sondaje JVC-281 en el tramo 588-590. ....	32
Foto 4.2: Sondaje JVC-196A a la profundidad de 416 m hasta los 420 m. ....	34
Foto 4.3: Sondaje GMC-20, desde 249.70 hasta 253.97. ....	36
Foto 4.4: Sondaje GMC-2, desde 715.05 hasta 722.30 metros. ....	37
Foto 4.5: Sondaje GMC-10 desde los 570 a los 572 metros de profundidad. ....	38
Foto 4.6: Sondaje JVC-287 desde 406.3 a 408.4 metros de profundidad. ....	38
Foto 5.1: Sondaje GMC-10, desde 595.23 hasta 599.65 metros de profundidad, TUFAN con alteración potásica. ....	44
Foto 5.2: Sondaje JVC-181, desde 569.88 hasta 577.20 metros de profundidad, TUFAN con alteración clorita-sericita. ....	45
Foto 5.3: Sondaje GMC-20, desde 188.96 hasta 193.50 m. ....	52
Foto 5.4: Sondaje GMC-20, desde 347.38 hasta 351.94 m. ....	53
Foto 5.5: Sondaje SGTF-03, desde 285.93 hasta 292.74. ....	58
Foto 5.6: Sondaje SGTF-03, desde 504.90 hasta 511.55. ....	58
Foto 5.3.7: Sondaje SG-05A en el metro 407,59. ....	65
Foto 5.3.8: Sondaje SG-05B en el metro 382.82. ....	66
Foto 5.3.9: Sondaje JVC-262 en el metro 235.5. ....	66
Foto 5.3.10: Primer tramo corresponde a 405 m de profundidad y el segundo a los 349.8 m. ....	68
Foto 5.3.11: Sondaje JVC-266 a los 209.23 metros de profundidad. ....	72
Foto 5.3.12: Sondaje JVC-115. ....	79
Foto 5.3.13: Sondaje SGTF-01. ....	79
Foto 5.14: Izq: Sondaje JVC-285A alrededor de los 540 m de profundidad, Der: JVC-288 alrededor de los 274 m de profundidad. ....	80
Foto 5.3.15: Sondaje JVC- 257 metraje 270.6, UCS de 17.84 MPa. ....	83
Foto 5.3.16: Sondaje JVC- 249 metraje 655.32, UCS de 32.71 MPa. ....	84
Foto 5.3.17: Sondaje JVC-152, metraje 717.73, UCS 161.75 MPa. ....	84
Foto 5.3.18: Sondaje JVC-237 y JVC-210 con UCS de 58.46 MPa y 59.36 MPa respectivamente. ....	88
Foto 5.3.19: Fotografía del sondaje SG-05A a los 315,81 metros. ....	92
Foto 5.3.20 Fotografía del sondaje SG-05A a los 570,25 metros. ....	93
Foto 5.3.21: Sondaje SGTF-10 con UCS de 27.96 MPa. ....	96
Foto 5.3.22: Sondaje SGTF-01 con UCS de 87.19 MPa. ....	96

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Valoración de la calidad de la roca a partir del porcentaje de RQD. ....	14
Tabla 3.2: Cálculo de la compresión simple aproximada en sondaje. ....	14
Tabla 3.3: Relación del largo de la muestra para pruebas de laboratorio respecto al diámetro de perforación. ....	15
Tabla 3.4: Relación del largo de la muestra para ensayos de carga puntual respecto al diámetro de perforación. ....	15
Tabla 3.5: Cuadro general de parámetros con puntajes para los parámetros del RMR ( Tomado de Bieniawski, 1989). ....	18
Tabla 3.6: Estimación de calidad de la roca a partir de los valores sumados de los parámetros de RMR de la Tabla 3.5. ....	18
Tabla 3.7: Relación de puntajes RMR para la condición de la discontinuidades. ....	21
Tabla 3.8: Relación de rugosidad y puntaje RMR para los sondajes anteriores al año 2011. ....	22
Tabla 3.9: Correlación de rugosidad teniendo en cuenta el JRC (Tomado de Barton and Choubey, 1974). ....	22
Tabla 3.10: Puntajes RMR relacionados para cada una de las rugosidades utilizadas en metodología desde la campaña Geotecnia 2011. ....	23
Tabla 3.11: Tabla de correlación de los rellenos en patina y su calidad. ....	23
Tabla 3.12: Isolíneas de GSI teniendo en cuenta tamaño de bloques vs condición paredes de las discontinuidades (MODIFICADO DE HOEK-MARINOS, 2000) ....	25
Tabla 3.13: Relación de la alteración de estructuras primarias y secundarias mostrando condición general de discontinuidades (MODIFICADO DE HOEK-MARINOS, 2000) ....	26
Tabla 4.1: Total sondajes caracterizados por la empresa E-Mining ....	27
Tabla 4.2: Total sondajes caracterizados por la empresa Geoblast ....	28
Tabla 4.3: Sondajes reportados por la empresa E-Mining presentan información incompleta. ....	29
Tabla 4.4: Base de Datos reportada por E-Mining donde se observa la falta de información en los tramos enteros. ....	29
Tabla 4.5: Base de Datos reportada por E-Mining donde se observa la falta de información en los tramos enteros, LRS y RQD. ....	30
Tabla 4.6: Base de Datos reportada por E-Mining donde se observa en LRS unidades en metros y en centímetros. ....	30
Tabla 4.7: Base de Datos corregida por Geoblast unidades LRS en centímetros. ....	30
Tabla 4.8: Base de Datos reportada por E-Mining donde se observa valores de RQD superiores a 100. ....	31
Tabla 4.9: Base de Datos ajustada. ....	32
Tabla 4.10: Base de Datos inicial donde se observa valores RQD superiores a 100. ....	32
Tabla 4.11: Base de Datos ajustada. ....	32
Tabla 4.12: Base de Datos donde se observa que no existe información. ....	33
Tabla 4.13: Base de Datos ajustada. ....	34
Tabla 4.14: BD inicial se observa RQD reportado 8. ....	37
Tabla 4.15: Base de Datos ajustada donde se observa RQD 100 ....	38
Tabla 5.1: Estadística descriptiva de los ensayos UCS por alteración presente en la Toba Andesítica. ....	46
Tabla 5.2: Estadística descriptiva de los ensayos UCS para la Toba Andesítica. ....	50
Tabla 5.3: Estadística descriptiva de los ensayos UCS para la Toba Andesítica, diferenciando entre zonas de enriquecimiento. ....	54
Tabla 5.4: Estadística descriptiva para la estimación de la Resistencia (ISRM), RQD y RMR para el Pórfido Diorítico. ....	56
Tabla 5.5: Ensayos UCS para el PDRT donde la ruptura fue por matriz. ....	59
Tabla 5.6: Estadística descriptiva de los ensayos UCS para el PDRTC. ....	59
Tabla 5.7: Estadística descriptiva para los ensayos UCS, estimación de la Resistencia, RQD y RMR. ....	65
Tabla 5.8: Ensayos UCS diferenciados por Lito-alteración en la Diatrema. ....	69
Tabla 5.9: Estadística descriptiva de la Resistencia a la compresión simple distinguiendo entre Unidades Lito-Geotécnicas. ....	70
Tabla 5.3.10: Resultados ensayos UCS, controlados por turmalina. ....	71
Tabla: 5.3.12: Estadística descriptiva de la Resistencia UCS* para la Diatrema con turmalina ....	72
Tabla: 5.3.13: Ensayos PLT del sondaje JVC-266. ....	72
Tabla: 5.3.14: Estadística Descriptiva de ensayos UCS y UCS* ....	73

Tabla 5.3.14: Resultados ensayos UCS para la BX TUR.....	78
Tabla 5.3.15: Resultados ensayos UCS para el PORDAC.....	82
Tabla 5.3.16: Resultados ensayos UCS para el PORDAC.....	84
Tabla 5.3.17: Resultados ensayos UCS para el PGRND.....	87
Tabla 5.3.18: Litología del sondaje JVC-202. ....	88
Tabla 5.3.19: Resultados ensayos UCS para el PRD.....	91
Tabla 5.3.20: Resultados ensayos UCS para la SVC. ....	95
Tabla: 6.1: Ensayos PLT del sondaje JVC-266. ....	97
Tabla: 5.3.11: Conversión de Resistencia a la carga puntual a Resistencia a la compresión simple. ....	104

# **1 INTRODUCCION**

## **1.1 GENERALIDADES**

Caracoles es un depósito de tipo Pórfido Cu (Au-Mo), que contempla la extracción de minerales oxidados y sulfuros de cobre, que considera una cubicación del orden de los 4500 MTON de material a remover.

Geográficamente, el Pórfido Caracoles está ubicado a 10 km al SSW de los pórfidos Esperanza-Telégrafo, y aproximadamente a 30 km al sureste del poblado de Sierra Gorda, a una altura de media de 2.370 m.s.n.m, en el Distrito Centinela, en la Precordillera de Antofagasta (II Región), Chile.

La ruta de acceso más directa es el camino de acceso a la mina El Tesoro y su desvío hacia el proyecto Esperanza, el cual se conecta con un antiguo camino de tierra que llega hasta el distrito Caracoles.

Caracoles está en las cercanías de la traza de la Falla Centinela, una de las ramas principales del Sistema de Fallas de Domeyko. Este sistema controla el emplazamiento de pórfidos mineralizados de edades entre 41 y 45 Ma (Eoceno-Oligoceno Superior).

El yacimiento presenta una forma elongada en dirección NE, con enjambres de diques orientados con rumbos variables entre NNE y ENE. El depósito alcanza hasta los 1.500 m de largo y 600 m de ancho con un desarrollo de columna mineralizada de más de 1.000 m de profundidad, bajo una columna de gravas post-minerales estériles de hasta 130 m de espesor. (Swaneck *et al.*, 2010)

En general, los contenidos mayores de cobre se encuentran directamente asociados a una mayor intensidad de alteración potásica (alteración dominante), representada por biotita secundaria y feldespatos potásicos. Fallas inversas de rumbo NE y ENE con manteos al SE controlan la mineralización a través del emplazamiento de los pórfidos dacíticos alimentadores.

La mineralización oxidada de cobre se desarrolla en los primeros 350 m del depósito, inmediatamente bajo la cobertura de gravas. (Swaneck *et al.*, 2010)

## **1.2 OBJETIVO GENERAL**

Elaborar el modelo de unidades lito-geotécnicas del proyecto Caracoles a partir de datos geotécnicos y geológicos.

### **1.3 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Estimación de propiedades del macizo rocoso a partir de ensayos de laboratorio y mapeo geotécnico.
- Definición de unidades lito-geotécnicas con la integración de la información geológica, geotécnica y la caracterización del macizo rocoso.
- Modelamiento de las unidades interpretadas.

### **1.4 ALCANCES**

Para la determinación de Unidades Lito-Geotécnicas y la caracterización de éstas, no se considerará la parte más dañada del macizo rocoso, la que será identificada en la base de datos como unidades diferentes. El modelamiento de éstas se deberá realizar una vez que se desarrolle el modelo estructural del yacimiento, ya que actualmente se desconoce la continuidad espacial de estas zonas de fracturas o fallas.

En la clasificación del macizo se considera todo el yacimiento como seco, ya que tampoco se cuenta con información de la hidrogeología.

### **1.5 METODO DE TRABAJO**

Se siguió la siguiente metodología de trabajo general:

- Realización de estándares de mapeo geotécnico
- Levantamiento geotécnico
- Realizar una base de datos con la compilación del levantamiento geotécnico
- Realizar una base de datos con la información de resultado de ensayos de laboratorio (UCS Y Carga Puntual)
- Compilación de la información en una Base de Datos
- Estimación de propiedades del macizo rocoso
- Definición de Lito Alteraciones y modelamiento de éstas.

## 2 MARCO GEOLOGICO

### 2.1 GEOLOGÍA DISTRITAL

El Distrito Centinela, al cual pertenece el yacimiento Caracoles, se ubica en el borde occidental de la Cordillera de Domeyko, en una zona asociada a las fallas mayores del Sistema de Fallas de Domeyko (Mpodozis *et al.*, 1993; Marinovic y García, 1999; Mpodozis *et al.*, 2009). En **Figura 2.1** se observa un Perfil E-W con las unidades morfoestructurales de la región, en el cuadro rojo se ubica el área del proyecto.

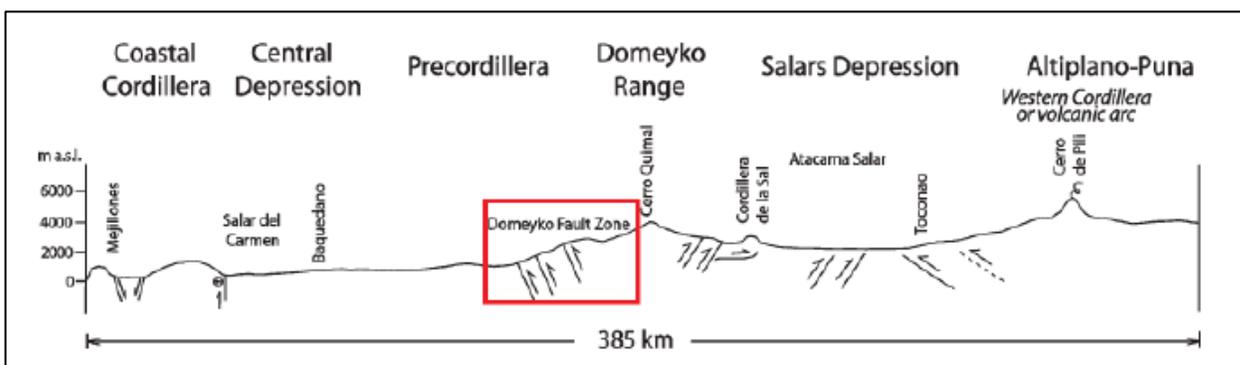


Figura 2.1: Perfil E\_W mostrando la morfología regional de la zona de estudio. *Geology of Chile, Charrier et al., 2007.*

El Sistema de Fallas de Domeyko corresponde a una compleja zona de deformación que, en el Distrito Caracoles, sirvió como canal para el ascenso y emplazamiento de intrusivos portadores de mineralización cuprífera. La ZFVC afecta a rocas sedimentarias intrusivas y volcánicas que en el Distrito Centinela abarcan desde el Triásico superior hasta el Eoceno. (Swaneck *et al.*, 2010)

Las relaciones estratigráficas y la geometría estructural del distrito son difíciles de establecer, ya que gran parte del área está cubierta por potentes secuencias de gravas formadas como consecuencia del alzamiento de la Cordillera de Domeyko durante el Paleógeno (Blanco y Tomlinson, 2000).

El relieve en esta área está formado por lomajes suaves sin cambios abruptos de pendiente, en donde se ha desarrollado una red de drenaje muy extendida y de escasa escorrentía, con algunos cauces que no superan algunos metros de profundidad pero que se extienden en una amplia sección. La topografía presenta alturas promedios entre 2400 y 2550 m s.n.m.

El yacimiento Caracoles se ubica en una zona cubierta, directamente sobre la prolongación hacia el norte del Dúplex Las Lomas (**Figura 2.2**). Este elemento estructural se desarrolla limitado entre la falla Centinela (por el oeste) y la "falla Centinela Este". Ambas fallas, de trazas rectas y rumbo NS, limitan entre ellas un panel deformado de 3 km de ancho en el que afloran las secuencias volcánicas y sedimentarias del Triásico al Paleoceno, que se disponen en franjas de orientación NNE a NE. En planta definen una geometría propia de un sistema de cizalle frágil típico de zonas de deformación dominada por movimientos de rumbo. (Swaneck *et al.*, 2010)

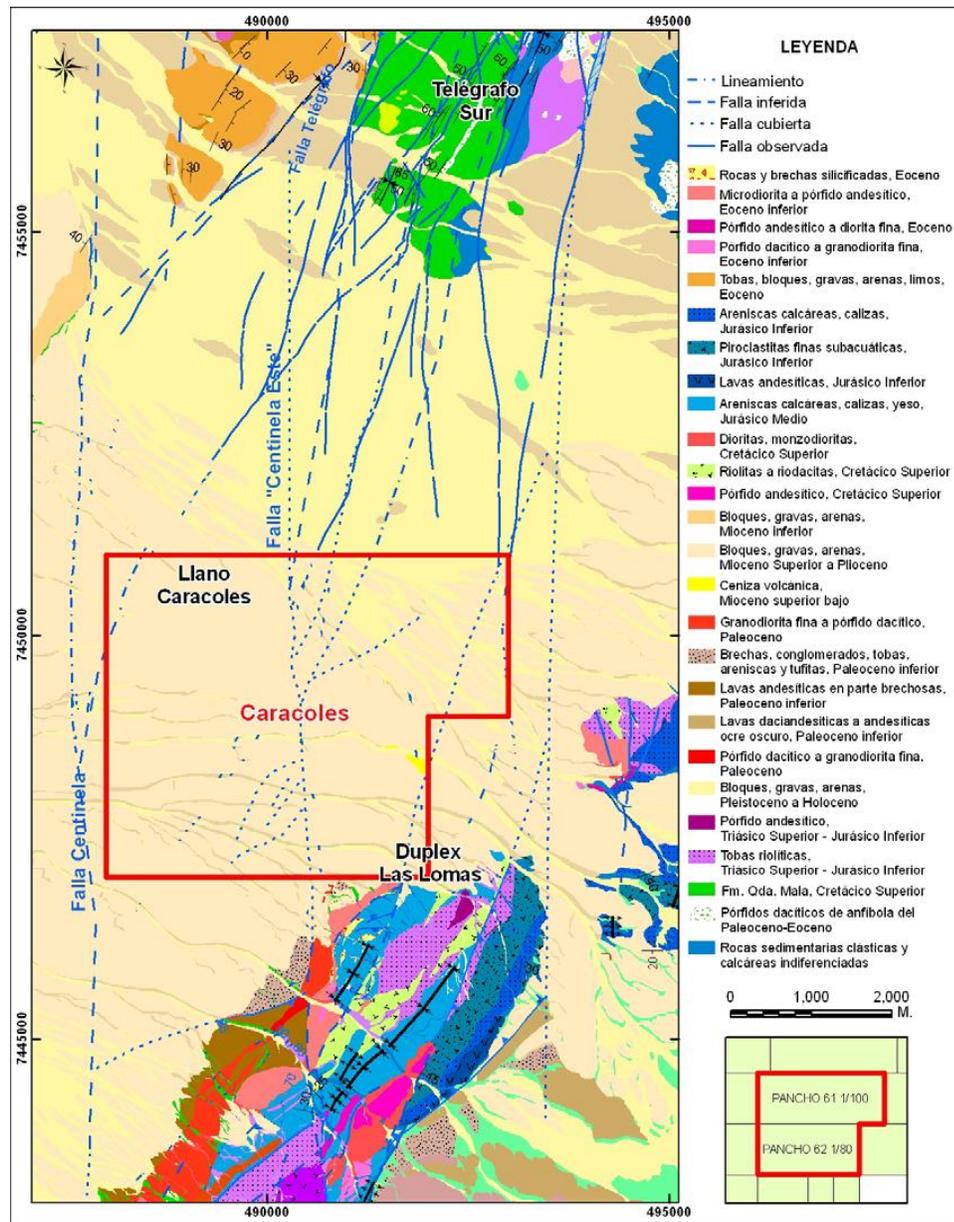


Figura 2.2: Conformación Geológico Estructural del Yacimiento Caracoles.

La relación estructural entre las fallas Centinela y “Centinela Este”, junto al Dúplex de las Lomas, es difícil de precisar debido a la extensa cubierta de gravas que constituye el Llano de Caracoles.

La historia tectónica del distrito es claramente polifásica, pero en general con una importante componente de movimientos de rumbo (Marinovic y García 1999; Mpodozis *et al.*, 2009).

Por último, discretas y localizadas reactivaciones de algunos de estos segmentos de fallas afectan a estas gravas generando plegamientos suaves y escarpes de fallas verticales (Blanco y Tomlinson, 2000).

## 2.2 GEOLOGIA YACIMIENTO CARACOLES

### 2.2.1 GENERALIDADES

El yacimiento Caracoles encuentra dentro de un lineamiento de pórfidos Cu-Au-Mo de unos 35 Km de longitud de orientación NNE (Mirador, El Tesoro, Esperanza, Telégrafo, Centinela y Polo Sur) (Figura 2.3).

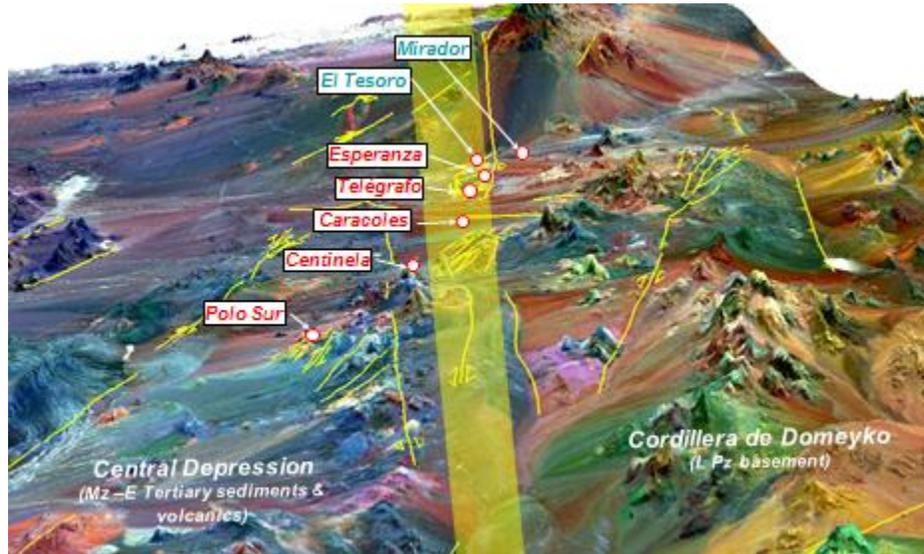


Figura 2.3: Ubicación General Proyecto Caracoles.

En general, se trata de un ambiente volcánico a volcanoclástico, afectado por intrusiones hipabisales, sobre las que yacen depósitos sedimentarios semiconsolidados, con espesores en torno a 100 m en algunos sectores del distrito.

Las unidades litológicas de pre-mineralización son la Formación Las Lomas, representada en rocas piroclásticas ácidas asociados a eventos de extensión tectónica durante el periodo Jurásico, depósitos marinos costeros de calizas, areniscas y yeso de la Formación Caracoles y localmente lavas andesíticas de la Formación Quebrada Mala. Dos unidades paleocenas equivalentes se identifican en toda la extensión del distrito, una secuencia de tobas basales y otra representada en domos intrusivos riolíticos. (Swaneck *et al.*, 2010)

Los episodios de mineralización son debido al emplazamiento de intrusivos y stocks grano-dioríticos eocenos asociados a fallas NNE-SSW.

Por último, una fase postmineral, evidenciada en una unidad de brecha de turmalina y una brecha freato-magmática fallada en el sector este, cierra el ciclo activo del yacimiento. (Swaneck *et al.*, 2010)

### 2.2.2 LITOLOGÍA Y ALTERACIÓN

A continuación se presenta una descripción de las unidades litológicas presentes en el área del proyecto Caracoles (Swaneck *et al.*, 2010):

#### **TOBAS ANDESÍTICAS** (TUFAN en **Figura 2.4**)

Litología que forma parte de una secuencia volcánica y sedimentaria continental, perteneciente a la Formación Quebrada Mala (Cretácico Sup?, Swaneck *et al.*, 2010). Esta unidad constituye la roca de caja del pórfido Caracoles, y agrupa andesitas de grano fino, lavas y tobas (algunas de ellas brechizadas) con textura porfírica fina, masa fundamental afanítica o brechosa. Esta litología está intensamente biotitizada (alteración potásica). Aflora hacia el oeste del área del proyecto.

#### **SECUENCIA VOLCANO CLÁSTICA** (SVC en **Figura 2.4**)

Litología que también está incluida, tentativamente, en la Formación Quebrada Mala. Corresponde a una secuencia volcanoclástica de brechas y tobas líticas y brechosas de composición andesítica y dacítica. Esta unidad constituye la roca de caja del bloque oriental estéril del yacimiento. Presenta biotitas cloritizadas y masa fundamental con alteración propilítica (clorita, epidota, sericita).

#### **PÓRFIDO DIORÍTICO** (PDRTC en **Figura 2.4**)

Se encuentra en la porción oeste del proyecto como diques de hasta 100 m de ancho y corridas de más de 1.000 m con una orientación general norte-sur a nor-noreste y manteo subvertical. Tiene un color gris oscuro, verdoso o negruzco, con textura equigranular fina o parcialmente porfídica, es poco abundante y ocurre como filones intruyendo las unidades estratificadas del Jurásico y Cretácico. Presenta una leve a moderada alteración potásica (biotitización) y vetillas tempranas tipo B, evidenciando su carácter de roca de caja del evento hidrotermal principal de alteración-mineralización.

#### **PÓRFIDO DACÍTICO** (PORDAC en **Figura 2.4**)

Contempla dos grupos de intrusiones: *Pórfido Dacítico Principal* y *Pórfido Dacítico Intermineral*. Definen pequeños stocks elongados o diques que intruyen las rocas volcánicas de la Formación Quebrada Mala. En ocasiones se reconoce la presencia de verdaderos enjambres de filones de pórfido con centenas de metros de ancho. Son rocas de color gris claro con débiles tonos parduscos con textura porfídica y masa fundamental afanítica a microfanerítica, formada por cuarzo anhedral, feldespato potásico, plagioclasa y biotita. La masa fundamental presenta alteración potásica, biotita cloritizada y anhidrita, en el caso del pórfido principal, y cuarzo feldespática, para el pórfido intermineral.

#### **GRANODIORITA** (PGRND en **Figura 2.4**)

Esta litología constituye stocks elongados en sentido noreste con diques de hasta 100 m de ancho y corridas de hasta de 800 m con orientación general noreste y manteo al sureste. Son rocas de color gris intermedio, con textura fanerítica de grano medio, compuestas por cristales subhedrales de plagioclasa, alteradas leve a moderadamente a sericita. Esta unidad además, carece de alteración potásica y de vetillas de cuarzo tempranas, está afectada por una moderada a fuerte alteración clorita-sericita y está cortada por vetillas de turmalina-calcopirita-pirita.

**DOMO RIODACÍTICO** (PRD en **Figura 2.4**)

Corresponde a intrusivo de carácter subvolcánico, elongado en dirección noreste, de color blanco con alteración argílica que ocurre al este del sistema mineralizado. Presenta una textura porfídica y un aspecto levemente poroso, típico de domos volcánicos

**DIATREMA** (DIA en **Figura 2.4**)

Corresponde a una brecha freatomagmática (volcánica) de textura brechosa en una matriz soportada de polvo de roca que ocurre al noreste del sistema mineralizado. Su composición es polimítica con ciertos rasgos de flujo, reconociéndose un grupo de fragmentos líticos mayores subredondeados, de orden centimétrico, en que la mayoría corresponden a rocas andesíticas porfídicas. La matriz está compuesta por fragmentos milimétricos, redondeados, de líticos silicificados, en que algunos de ellos parecieran corresponder a areniscas, y abundantes fragmentos de cristales liberados de cuarzo. La textura de la unidad es matriz-soportada (los fragmentos no están en contacto entre sí). Esta diatrema corta tanto al sistema mineralizado, a la granodiorita, como también al domo riodacítico, conteniendo clastos de todas esas unidades.

**BRECHA TURMALINA** (BXTUR en **Figura 2.4**)

Corresponde a una brecha hidrotermal con matriz de turmalina; los clastos líticos tienen amplia variedad de tamaños, entre 2-60 mm, con formas angulosas a subangulosas. Dependiendo del lugar donde ocurra esta brecha, dichos fragmentos corresponderán a rocas volcánicas y/o intrusivas intensamente alteradas, más vetillas de cuarzo desmembradas con algún contenido de sulfuros. La matriz constituye aproximadamente un 60% del volumen y está formada por un fino agregado de cemento hidrotermal de turmalina de color verde que incorpora fragmentos de rocas sericitizadas de hasta 2 mm y cristales de cuarzo de procedencia volcánica.

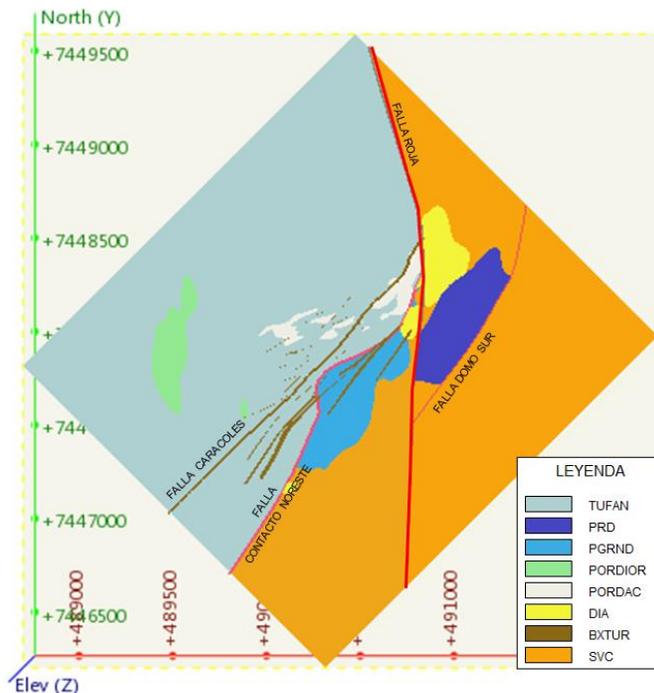


Figura 2.4: Planta de Litologías y Estructuras, cota 1800.

### 2.2.3 ZONA MINERAL

La mayor parte de la mineralización de cobre en Caracoles se asocia temporal y genéticamente a un evento central de alteración potásica, el que agrupa a más del 90% de la mena sulfurada y oxidada, y está controlado por diques del Pórfido Dacítico principal o alimentador.

Las zonas minerales más importantes son:

- Zona Hipógena con Bornita (PRBR), calcopirita y pitita (PRCPY, PRPY y PR(CPY+PY)),
- Zona de Óxidos Verdes (OXV),
- Zona de Óxidos Negros (OXN),
- Zona Mixta (MX),
- Zona de Enriquecimiento Secundario (SEC),
- Zona Lixiviada y Parcialmente Lixiviada (LIX y PLIX),
- Zona Primaria Estéril (ESTERIL).

La **Figura 2.5** corresponde a un perfil N-S al oeste de la Falla Roja, donde se visualiza la principal mineralización presente.

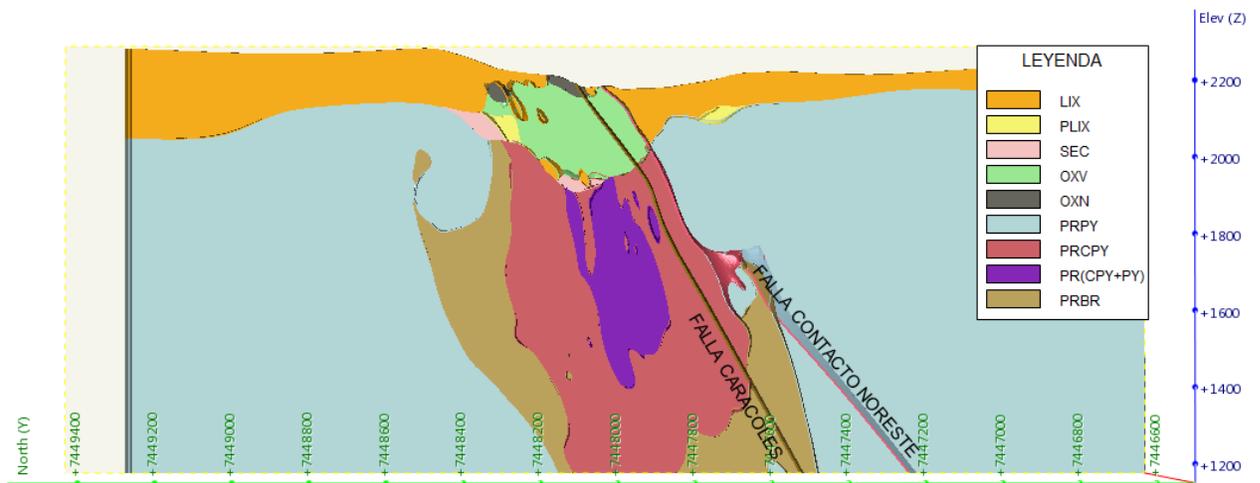


Figura 2.5: Perfil de Mineralización, Sección N-S (Coordenadas 490300.00 E)

## 2.2.4 ESTRUCTURAS

A escala distrital, Caracoles está asociado al ambiente del Sistema de Fallas Centinela-Limón Verde, de orientación NS y se encuentra afectado principalmente por el trazo de la falla “Roja” que delimita la extensión de la zona mineralizada en su borde Este (González 2010; Swaneck *et al.*, 2010). Se caracteriza por amplias zonas de daño y zonas de brecha, lo cual ofrece una amplia diversidad en cuanto a propiedades geo-mecánicas resultantes.

La principal restricción a este modelo estructural ocurre porque Caracoles es un depósito ciego, totalmente oculto por una cobertura de gravas sin mineralización cuya potencia promedio supera los 100 metros, y por lo tanto no existe exposición de fallas en superficie.

Se consideró como modelo de discontinuidades mayores al modelo de Fallas 3D de Caracoles entregado por la empresa AMSA, el cual incluye las siguientes estructuras:

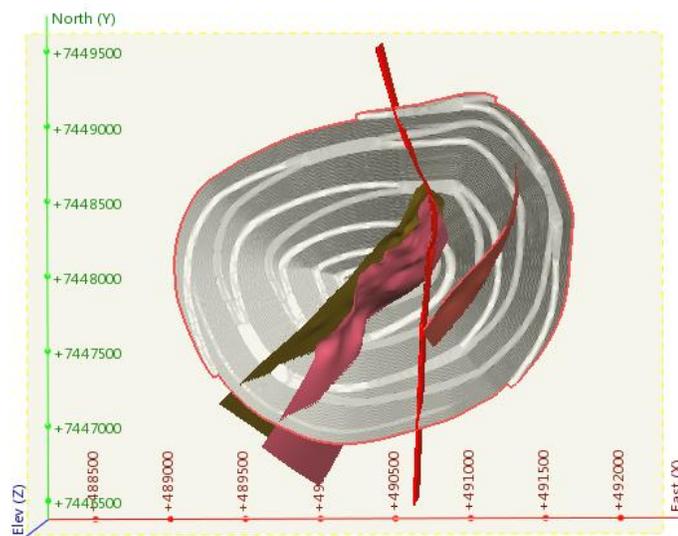
- Falla Contacto Noreste (Rosa en **Figura 2.6**)
- Falla Contacto Domo Sur (Azul en **Figura 2.6**)
- Falla Caracoles (Café en **Figura 2.6**)
- Falla Roja (Rojo en **Figura 2.6**)

Algunas características que cabe destacar del modelo de discontinuidades mayores son las siguientes:

La Falla Roja es la estructura de mayor envergadura del yacimiento, consiste en una zona de falla de hasta 19 m de ancho, con rumbo N-S y manteo entre 74° y 84° hacia el este (González, 2010).

Se reconoce una relación, al menos espacial, entre los pórfidos mineralizados al centro del rajo y la falla Caracoles (dirección NE-SW).

En la **Figura 2.6** se observa la traza de estas discontinuidades mayores, contra el diseño de rajo final.



**Figura 2.6: Proyección de las traza de fallas mayores en diseño de pit final.**

### 3 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

La caracterización geotécnica del proyecto Caracoles comenzó en el año 2007 con la primera de las campañas de Sulfuros, y continúa con la campaña Geotecnia orientados 2012. Las empresas que han participado en el logeo geotécnico son E-Mining y Geoblast.

A continuación los parámetros geotécnicos considerados en el mapeo en campo:

- Recuperación
- Largo tramos enteros, Largo Roca Sólida (LRS)
- Número de fracturas, Frecuencia de Fractura
- RQD (Rock Quality Designation)
- Estimación de la Resistencia por el método del martillo
- JRC (Joint Roughness Coefficient)
- Relleno de las discontinuidades (tipo, espesor, calidad)
- GSI

#### 3.1 VARIABLES GEOTECNICAS DE INTERES

En esta sección se detalla los fundamentos teóricos de los parámetros geotécnicos que se decide utilizar para la determinación de poblaciones de datos dentro de cada litología:

##### 3.1.1 ZONA TECTONIZADA

Se define este tipo de clasificación para dar un enfoque general a la condición geomecánica de la roca en cuanto al ambiente tectónico en que se encuentra, para hacer más precisa la caracterización y adquisición de información geotécnica, de nulo a mayor grado de afectación tectónica, en su orden:

- ***Roca sana.***
- ***Roca alterada.***
- ***Roca fracturada.***
- ***Roca cizallada.***
- ***Roca molida.***

### ROCA SANA

Se denomina roca sana a la muestra que preserva en un gran porcentaje dentro de su matriz, las características minerales o facies que la definen desde su formación. No se considera sana cuando estos minerales se han modificado por alteración geoquímica o por efectos tectónicos de una manera significativa aunque el tramo esté completo. (Ver **Foto 3.1**)



Foto 3.1: Tramo de roca sana con baja alteración.

### ROCA FRACTURADA

Definidas como segmentos con estructuras abiertas con menos de 3 cm de espaciamiento. Habitualmente son familias entrecruzadas que afectan la matriz de la roca por vetillo relleno de diversos minerales de alteración hidrotermal o tectónica en una alta frecuencia. (Ver **Foto 3.2**).



Foto 3.2: Segmento de sondaje con una alta frecuencia de Fracturamiento.

### **BRECHA TECTÓNICA**

Se refiere a brechas de falla que contiene fragmentos angulares a sub-angulares, algunas veces alargados, de tamaños que van desde 0.1 hasta 10 cm de roca, con múltiples superficies pulidas y cizalladas, con una matriz de polvo de roca o salbanda. (Ver **Foto 3.3**).



**Foto 3.3:** Brecha de falla con matriz arcillosa y granos subangulares.

### **ROCA ALTERADA**

Son rocas que han sufrido alteraciones principalmente en la mineralogía de sus compuestos originales dentro de su matriz (Ver **Foto 3.4**).



**Foto 3.4:** Roca alterada.

### ROCA CIZALLADA

Se caracteriza por una serie de planos de foliación y superficies de falla frágiles, subparalelas, que presentan en sus paredes estrías de falla y superficies pulidas, siendo un indicador de la presencia de la cercanía al plano principal de movimiento de falla o estructuras mayores.

La textura foliada de la roca evidencia el esfuerzo focalizado en esta región/plano donde la roca ha sido “triturada” hasta alcanzar fragmentos tamaño arcilla. Esta región o plano de ruptura puede separar dos bloques de litologías diferentes o iguales y su espesor depende de la intensidad del esfuerzo tectónico y el desplazamiento rumbo/buzamiento de la zona tectonizada en cuestión (Ver **Foto 3.5**)



**Foto 3.5:** Zona afectada por cizallamiento (segmento de la Falla Roja).

### ROCA MOLIDA

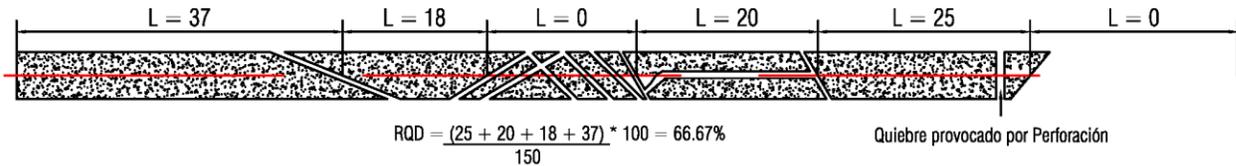
Son las zonas donde la roca recuperada durante el sondaje se encuentra completamente disgregada, es decir, sin cohesión ni consistencia (Ver **Foto 3.6**).



**Foto 3.6:** Roca molida.

### 3.1.2 ROCK QUALITY DESIGNATION-(RQD)

El cálculo del RQD se hace a partir de la teoría de Deere (1963-1967-1988) que dice que el RQD es igual a la suma de tramos completos mayores a 10 centímetros sobre la longitud total del tramo, multiplicado todo esto por 100 para darlo en porcentaje (Ver **Figura 3.1**) (Ver **Tabla 3.1**).



**Figura 3.1:** Medición de tramos y formulación para el cálculo de RQD.

**Tabla 3.1:** Valoración de la calidad de la roca a partir del porcentaje de RQD.

CLASE	CALIDAD	RQD (%)
I	MUY MALA	< 25
II	MALA	25-50
III	ACEPTABLE	50-75
IV	BUENA	75-90
V	MUY BUENA	90-100

### 3.1.3 RESISTENCIA

#### ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA UNIAXIAL (ISRM)

La Resistencia de la roca es calculada en un sondaje por el método del Martillo avalado por la ISRM, donde se hace una comparación del rango aproximado a un valor de resistencia a la compresión simple (Ver **Tabla 3.2**). Sin embargo estos valores son corroborados con pruebas de testigos en laboratorio con las cuales se logra obtener datos más precisos del cálculo de la resistencia.

**Tabla 3.2:** Cálculo de la compresión simple aproximada en sondaje.

TIPO	CÓDIGO	MPa	CARACTERÍSTICAS IDENTIFICACIÓN TERRENO
EXTREMADAMENTE DURA	R6	Mayor a 250	Sólo astillas con golpe de martillo
MUY DURA	R5	100 – 250	Fracturada con muchos golpes de martillo
DURA	R4	50 – 100	Más de un golpe para ser fracturada
MODERADAMENTE DURA	R3	25 – 50	Un golpe firme para ser fracturada
BLANDA	R2	5 – 25	Hendiduras poco profundas con golpe de martillo
MUY BLANDA	R1	1 – 5	Desgravable con firme golpe de martillo
EXTREMADAMENTE BLANDA	R0	0.25 – 1	Hendiduras con uña del pulgar

## **RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL**

Se realizan ensayos de compresión simple y de carga puntual para el cálculo de la resistencia uniaxial.

### ***ENSAYOS DE COMPRESIÓN SIMPLE (UCS)***

Para el cálculo de la resistencia a la compresión de la roca no confinada. El ensayo indica la fuerza en MegaPascales que se le debe aplicar a la roca para que se rompa. Las recomendaciones en este ensayo son establecidas en la norma ASTM C170:1087. El largo de la probeta seleccionada depende del diámetro del testigo, la relación se muestra en la **Tabla 3.3**.

**Tabla 3.3: Relación del largo de la muestra para pruebas de laboratorio respecto al diámetro de perforación.**

<b>PROBETAS UCS</b>
Diámetro testigo → largo muestra
PQ → 18.5 cm
HQ → 14.3 cm
NQ → 10.7 cm

La selección de probetas se realiza cada 14 a 16 metros. Estas son enviadas al laboratorio de mecánica de rocas ubicado en la ciudad de Calama para su ensayo.

### ***ENSAYOS DE CARGA PUNTUAL (PLT)***

Al igual que el ensayo de compresión simple, consiste en aplicar una carga a un testigo hasta la rotura. La fuerza aplicada, como lo dice el nombre, se realiza de forma puntual, obteniéndose un índice ( $I_s$ ) que relaciona la Fuerza soportada por la roca antes de su rompimiento (P) y el diámetro de la muestra (D) mediante la expresión:  $I_s = P / D^2$ .

La selección se realiza cada 7 a 9 metros teniendo en cuenta abarcar las diferentes litologías presentes. Se escogen dos muestras seguidas o relativamente cercanas para obtener un promedio de dos ensayos y tener datos más reproducibles y cercano a la realidad.

El largo de la muestra equivale a 2.5 veces el diámetro, según los estándares ya establecidos (**Tabla 3.4**).

**Tabla 3.4: Relación del largo de la muestra para ensayos de carga puntual respecto al diámetro de perforación.**

<b>ENSAYO PLT</b>
Diámetro testigo → largo muestra
PQ → 7 cm
HQ → 6 cm
NQ → 5 cm

Para el ensayo se utiliza una máquina adecuada con los estándares internacionales de la norma ASTM.

### CORRELACIÓN ENSAYOS UCS Y PLT

Es de gran importancia contar con una buena correlación entre los ensayos de Carga puntual y los de Compresión simple, ya que entre los beneficios de realizar ensayos PLT está la rapidez y que son bastante más económicos que realizar un ensayo UCS.

Esta correlación se basa en el método propuesto por la ASTM International (Norma D 5731-02) que indica que a cada litología se le puede asignar una resistencia a la compresión simple (UCS), a partir de ensayos de laboratorio y su consistencia con los PLT.

Los resultados de ensayos a utilizar corresponden a aquellos donde la ruptura haya sido por matriz, tanto los de compresión simple como los de carga puntual. Los ensayos PLT asociados a los UCS son los que están inmediatamente antes y después, pero se cuenta con una mínima cantidad de datos que respetan esta condición, por lo que se correlaciona los ensayos a no más de 2 metros de distancia, siempre y cuando correspondan a la misma litología y que sean afectados por la misma alteración. Lo anterior se comprueba mediante fotografía y la revisión de la base de datos de la empresa AMSA (**Anexo 2: Base de Datos Geología**).

De esta manera, se correlaciona la resistencia en MPa entregada por el laboratorio para los ensayos de compresión simple con el índice de carga puntual  $I_{s(50)}$  mediante una curva de tendencia lineal. Con esta ecuación se hace la conversión de resultados del  $I_{s(50)}$  de cada una de las litologías correspondientes. (Ver **Figura 3.2**).

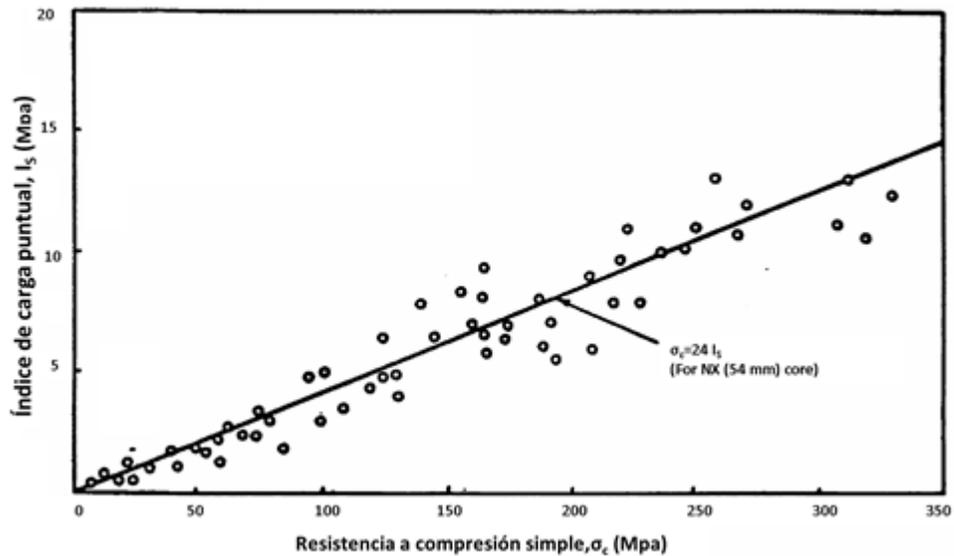


Figura 3.2: Correlación de ensayos de carga puntual y la resistencia a la compresión uniaxial mediante pruebas de laboratorio. ASTM D 5731 – 02

### 3.1.5 CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO (RMR)

**(INCLUYE EL ANEXO 1: “BASE DE DATOS GEOTECNIA CARACOLAS”)**

El método Rock Mass Rating (RMR) desarrollado por *Bieniawski (1989)* en su versión más actualizada, es el utilizado para la clasificación del macizo rocoso mediante la cuantificación de los parámetros que son la resistencia a la compresión uniaxial de la roca, el índice de calidad de la roca (RQD), el espaciamiento y condición de las discontinuidades y la condición del agua dentro del macizo. (Ver **Tabla 3.5**). De la sumatoria de cada uno de los parámetros resulta el índice de calidad del macizo (RMR) con el cual se puede determinar la calidad de sus condiciones geomecánicas. (Ver **Tabla 3.6**).

Tabla 3.5: Cuadro general de parámetros con puntajes para los parámetros del RMR ( Tomado de Bieniawski, 1989).

PARAMETROS DE CLASIFICACIÓN									
1	Resistencia de la Roca Intacta	Ensayo de Carga puntual (MPa)	>10	4 a 10	2 a 4	1 a 2	<1 (no se utiliza)		
		Compresión Simple (MPa)	>250	100 a 250	50 a 100	25 a 50	10 a 25	3 a 10	<3
	Puntaje	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD		90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	<25%		
	Puntaje		20	17	13	8	3		
3	Espaciado de las discontinuidades		>2 m	0.6-2 m	0.2-0.6 m	0.06-0.2 m	<0.06 m		
	Puntaje		20	15	10	8	5		
4	Estado de las Discontinuidades		Muy rugosas Discontinuas Sin separaciones Bordes sanos y duros	Ligeramente rugosas Abertura <1 mm Bordes duros	Ligeramente rugosas Abertura <1 mm Bordes blandos	Espejos de falla o con relleno <5 mm o abiertas 1-5 mm Diaclasas continuas	Relleno blando >5 mm o abertura >5 mm Diaclasas continuas		
	Puntaje		30	25	20	10	0		
5	Condición de Agua	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	<10 L/min	10-25 L/min	25-125 L/min	>125 L/min		
		Relación Presión agua-tensión principal mayor	0	0.0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
		Estado General	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteo	Flujo Continuo		
	Valoración		15	12	7	4	0		

Tabla 3.6: Estimación de calidad de la roca a partir de los valores sumados de los parámetros de RMR de la Tabla 3.5.

CLASE	I	II	III	IV	V
CALIDAD	MUY BUENA	BUENA	MEDIA	MALA	MUY MALA
VALORACION RMR	100-81	80-61	60-41	40-21	<20

De esta manera, para calcular el valor de RMR que es la suma de los puntajes asignados a los parámetros según la **Tabla 3.5**, se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

### **RESISTENCIA DE LA ROCA SANA**

Para el caso del cálculo del valor de resistencia a la compresión uniaxial simple, corresponde a los datos que se obtuvieron considerando la estimación de la resistencia medida en terreno por el método del martillo marca Estwing (estandarizado internacionalmente por el ISMR) a la cual se asocia un puntaje dependiendo del resultado que encasillaría en el rango de los UCS de la tabla de RMR (**Tabla 3.5**).

### **RQD**

En el punto de asignación del RQD (Rock Quality Designation), este toma su puntaje a partir de los datos obtenidos en terreno y basados en los fundamentos teóricos mencionados en la sección 4.1.2.

### **SEPARACIÓN ENTRE DIACLASAS**

El espaciamiento de las discontinuidades es una forma de medir la periodicidad con que aparecen las fracturas a través del sondaje. Se calcula dividiendo el largo de la roca sólida (LRS) sobre el número de fracturas presentes en el tramo, luego se le asigna el puntaje correspondiente.

En una Zona Fracturada, el número de fracturas puede variar dependiendo del criterio utilizado por el geólogo de mapeo, éste puede ser conservador como no (Ej. podría considerar menos fracturas de las que realmente son). Considerando las inconsistencias encontradas en la base de datos de geotecnia en las diferentes campañas, como por ejemplo un RQD de 0% y el número de fracturas de cero también, se propone homogenizar los datos de número de fracturas.

La modificación parte de la definición de segmento tectonizado, que corresponde a los tramos menores a 3 centímetros delimitados por fracturas naturales. El número de fracturas en este caso sería proporcional a la longitud de la zona fracturada y se calcula dividiendo el largo de esta zona fracturada en centímetros con los 3 centímetros de espaciamiento entre estas fracturas.

Para los tramos que corresponden en un 100% a Roca Sana, el número de fracturas en teoría son los tramos menos uno, con la excepción de cuando la fractura se encuentra justo en alguno de los bordes de los 2 metros considerados, que se debe considerar además la fractura del extremo.

Un ejemplo de lo anterior es en un tramo donde la recuperación es de 2 metros, de los cuales 1,5 metro corresponde a zona fracturada, haciendo el cálculo anterior se considerarían 50 fracturas dentro de este segmento tectonizado y en los 50 centímetros de roca sana, como se observa en la **Figura 3.3** dos fracturas más, con un total de 52.

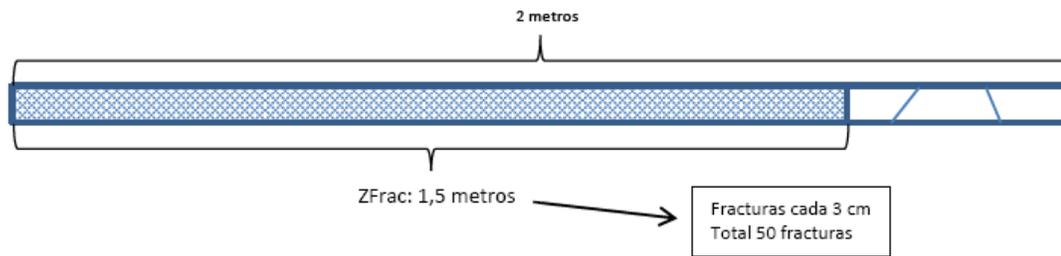


Figura 3.3: Ejemplo de cálculo de número de fracturas en un tramo con zona fracturada.

El **Gráfico 3.1** muestra un análisis de sensibilidad de los datos de los sondajes SGTF (campaña Geotecnia 2011 y 2012), del número de fracturas calculado contra el RQD medido. Se observa una coherencia entre los datos (relación lineal entre ambos).

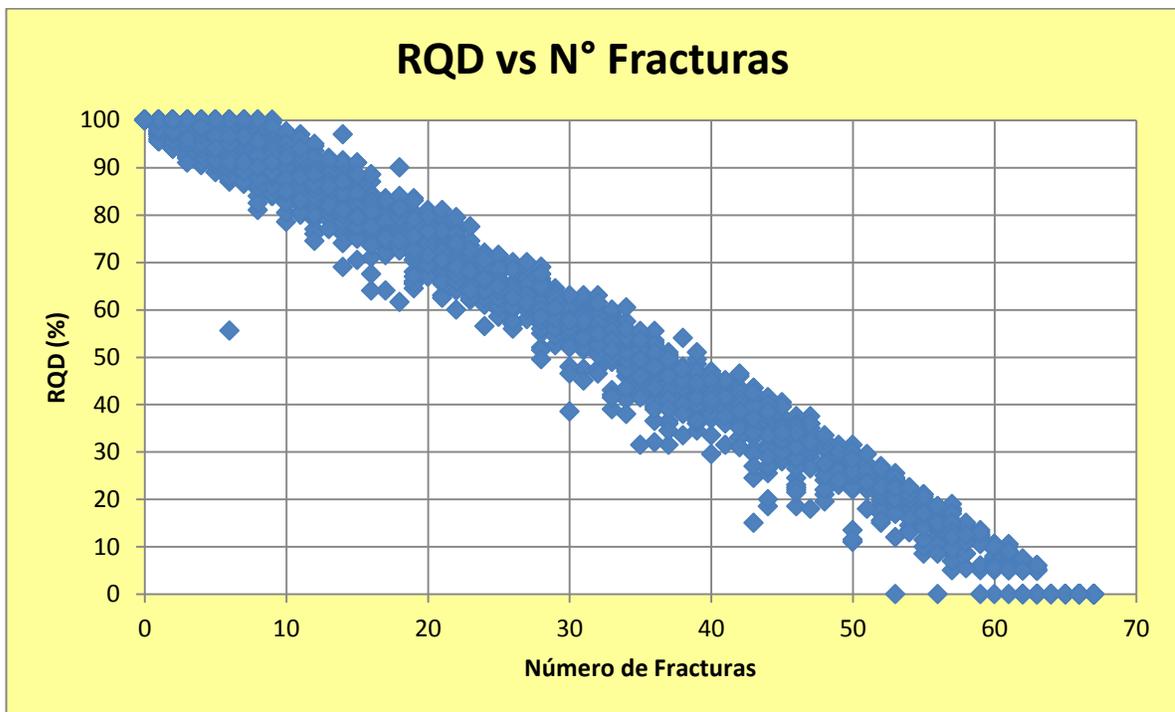


Gráfico 3.1: Análisis de sensibilidad de los datos de RQD versus Número de Fracturas calculado.

#### ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES

En la condición de las discontinuidades, se deben considerar parámetros por separado de cada característica (continuidad, apertura, rugosidad y relleno) ya que la combinación entre ellas, genera diferentes puntajes dependiendo del caso. (**Tabla 3.7**).

Tabla 3.7: Relación de puntajes RMR para la condición de la discontinuidades.

RESISTENCIA DE LA MATRIZ ROCOSA	COMPRESION UNIAxIAL (MPA)	>250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	<1
		PUNTAJE	15	12	7	4	2	1
GRADO DE FRACTURAMIENTO	RQD(%)	100-90	90-75	75-50	50-25	<		
	PUNTAJE	20	17	13	8	3		
	ESPACIAMIENTO(m)	>2	2-0,6	0,6-0,2	0,2-0,006	<0,006		
	PUNTAJE	20	15	10	8	5		
CONDICIÓN DISCONTINUIDADES	CONTINUIDAD (m)	<1	1-3	3-10	10-20	>20		
	PUNTAJE	6	4	2	1	0		
	ABERTURA(mm)	<0,01	0,01-0,1	0,1-1	-5	>5		
	PUNTAJE	6	5	4	1	0		
	RUGOSIDAD	Muy rugosa	Rugosa	Levemente Rugosa	Lisa	Pulida		
	PUNTAJE	6	5	3	1	0		
	RELLENO	Sin relleno	Duro <5 mm	Duro>5mm	Blando<5mm	Blando>5mm		
	PUNTAJE	6	4	2	2	0		
	ALTERACIÓN PAREDES	No alterada	Levemente Alterada	Moderadamente Alterada	Muy Alterada	Suelo Residual		
PUNTAJE	6	5	3	1	0			
CONDICIÓN DE AGUA	ESTADO GENERAL	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua Fluyendo		
	PUNTAJE	15	10	7	4	0		

De esta forma, se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones para cada caso.

**CONTINUIDAD:** Los valores de este parámetro no se pueden obtener de un testigo de sondaje, por lo que de manera conservadora se consideran valores de 3 a 10 metros, obteniéndose así un puntaje promedio de 2 según la **Tabla 3.7** para todas las litologías.

**APERTURA:** La metodología de *Bieniawski (1989)*, sugiere que este parámetro debe ser observado en terreno, por lo que de forma conservadora se utiliza los valores medios, es decir una apertura de 0,1 a 1 mm asociándole un puntaje de 4 para todos los datos.

**RUGOSIDAD:** Se manejaron dos tipos de puntajes en este parámetro debido a que la información anterior a las campañas del 2011, estaban con una convención diferente (Ver **Tabla 3.8**). De esta forma, se le han asignado los puntajes correspondientes para el cálculo del RMR teniendo en cuenta las características de rugosidades para cada caso.

**Tabla 3.8: Relación de rugosidad y puntaje RMR para los sondajes anteriores al año 2011.**

SIGLA	RUGOSIDAD	PUNTAJE RMR
R	Rugoso	5
LR	Levemente rugoso	3
L	Liso	1

Por otra parte, para los sondajes desde la Campaña Geotecnia 2011 se regularizó los puntajes de rugosidad teniendo en cuenta la correlación según *Barton and Choubey, 1977* (Ver **Tabla 3.9**) en donde se muestra gráficamente el valor del JRC (Join Roughness Condition) y comparativamente se determina un puntaje para cada caso (Ver **Tabla 3.10**).

**Tabla 3.9: Correlación de rugosidad teniendo en cuenta el JRC (Tomado de Barton and Choubey, 1974).**

Descripción	Perfil	$J_r$	JRC 200mm	JRC 1 m
Rugosa		4	20	11
Suave		3	14	9
Pulida		2	11	8
	Escalonada	2	11	8
Rugosa		3	14	9
Suave		2	11	8
Pulida		1.5	7	6
	Ondulada	1.5	7	6
Rugosa		1.5	2.5	2.3
Suave		1.0	1.5	0.9
Pulida		0.5	0.5	0.4
	Plana	0.5	0.5	0.4

**Tabla 3.10: Puntajes RMR relacionados para cada una de las rugosidades utilizadas en metodología desde la campaña Geotecnia 2011.**

SIGLA	RUGOSIDAD	PUNTAJE RMR
RE	Rugoso Escalonado	6
SE	Suave Escalonado	5
PE	Pulido Escalonado	5
RO	Rugoso Ondulado	5
SO	Suave Ondulado	3
PO	Pulido Ondulado	3
RPL	Rugoso Planar	1
SPL	Suave Planar	1
PP	Pulido Planar	0

**RELLENO:** El criterio de *Bieniawski de 1989* sólo considera rellenos duros o blandos y en el mapeo geotécnico de esta campaña además de los anteriores considera que el relleno se presente en pátina, se hizo una modificación dependiendo del tipo de relleno asociado. Es decir para rellenos como arcilla, limonita, sericita, calcita, yeso y anhidrita que se presentan en patina, se modificó a blando, y a los rellenos como óxidos de manganeso, óxidos de cobre, cuarzo y sulfuros se consideró que eran duros ya que su comportamiento se correlaciona adecuadamente teniendo en cuenta su composición mineralógica y consistencia (Ver **Tabla 3.11**)

**Tabla 3.11: Tabla de correlación de los rellenos en patina y su calidad.**

TIPO	ABREVIATURA	CALIDAD PROMEDIO DEL RELLENO EN PATINA
SIN RELLENO	SR	SR
CALCITA	CA	BLANDO
LIMONITA	LM	BLANDO
ARCILLAS	AR	BLANDO
SÚLFUROS	SU	DURO
ANHIDRITA	AN	BLANDO
YESO	Y	BLANDO
ROCA MOLIDA	RM	DURO
OXIDO DE MANGANESO	OXIDOS MN	DURO
OXIDO DE COBRE	OXIDOS DE COBRE	DURO
SERICITA	SER	BLANDO
CUARZO	QZ	DURO

## **CONDICIÓN DE AGUA**

Para la condición de agua dentro del macizo rocoso, se considera el estado general como “Seco” asociando de este modo, un puntaje general de 15 para el cálculo de RMR (Ver **Tabla 3.5**). Esto idealiza la mejor condición en este caso, pero por no contar con el modelo de hidrogeología, no se considera el nivel freático.

### **3.1.6 INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA (GSI)**

Este parámetro infiere el estado del macizo rocoso teniendo en cuenta tanto el grado de fracturamiento como la alteración de las paredes de las estructuras o del sondaje en sí (si no hay estructuras).

Se consideran dos versiones diferentes para el cálculo del GSI:

**CÁLCULO DE GSI A PARTIR DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO (RMR):** Para la estimación del valor del GSI según el RMR de Bieniawsky, 1989 se utiliza la relación teórica  $RMR-5=GSI$ , solo para valores acumulados de RMR mayores a 23 puntos.

**CÁLCULO DE GSI POR PARÁMETROS MEDIDOS EN TERRENO:** Se refiere a la aplicación de una metodología creada por Hoek-Marinos (2000), en la cual se logra determinar el Índice de Resistencia Geológica con datos de campo (en este caso, datos obtenidos en los sondajes) obteniendo una condición favorable o desfavorable de la roca en estudio, teniendo como referencia el estado de fracturamiento y la condición de las paredes de cada una de las estructuras presentes (Ver **Tabla 3.12**).

El cálculo del GSI por el método de Hoek-Marinos se comenzó a realizar desde la Campaña Geotecnia 2011. Los sondajes anteriores a esta (193 en total) no cuentan con esta información.

**Tabla 3.12: Isolíneas de GSI teniendo en cuenta tamaño de bloques vs condición paredes de las discontinuidades (MODIFICADO DE HOEK-MARINOS, 2000)**

CONDICION ALTERACION DE LA PAREDES DE LAS ESTRUCTURAS ABIERTAS QUE SEPARAN LOS TRAMOS)		VERY GOOD (VG): NA-NA	GOOD (GD): NA-LA / NA-MA / LA-NA / LA-LA	FAIR (FA): LA-MA / MA-NA / MA-LA / MA-MA	POOR (PO): LA-AA / AA-LA / AA-MA / MA-AA	VERY POOR (VP): AA-AA	
TAMAÑO DE LOS TRAMOS							
MASSIVE (MS): 100-200 CM		90				N/A	N/A
BLOCKY (BY): 30-100 CM		80					
VERY BLOCKY (VB): 10-30 CM		70					
BLOCKY / DISTURBED / SEAMY (BD): 3-10 CM		60					
DISINTEGRATED (DS): 1-3 CM		50					
LAMINATED / SHEARED (LS): 0-1 CM		40					
		30					
		20					
		10					
		N/A	N/A				

Los datos de campo corresponden a un rango de valores de acuerdo a la combinación de cada columna (condición de las discontinuidades) y fila (tamaño de los bloques) de la **Tabla 3.12**.

Para los 193 sondajes que no cuentan con esta información, se utilizó, para la clasificación del macizo rocoso, la fila de condición de las discontinuidades, ya que todos los sondajes considerados en el estudio cuentan con el parámetro “Alteración de las paredes” para las estructuras primarias (discontinuidades con mayor frecuencia en el tramo) y secundarias, que por medio de la **Tabla 3.13**, se puede realizar la conversión a “Condición de la Superficie de la Discontinuidad” propuesta por Hoek-Marinos (2000).

**Tabla 3.13: Relación de la alteración de estructuras primarias y secundarias mostrando condición general de discontinuidades (MODIFICADO DE HOEK-MARINOS, 2000)**

ALTERACIÓN PAREDES CÓDIGO		Condición Superficie Discontinuidades
Primaria	Secundaria	
NA	NA	VG
NA	LA	GD
NA	MA	GD
LA	NA	GD
LA	LA	GD
LA	MA	FA
MA	NA	FA
MA	LA	FA
MA	MA	FA
MA	AA	PO
LA	AA	PO
AA	LA	PO
AA	MA	PO
AA	AA	VP

**CONVENCIONES :** *NA: No alterado; LA: Levemente Alterado; MA: Moderadamente Alterado; AA: Altamente Alterado. VG: Very Good; GD: Good; FA: Fair; PO: Poor; VP: Very Poor.*

## 4 ANALISIS DE DATOS

En el capítulo anterior se ha revisado los principios teóricos y las bases para una adecuada adquisición de datos geotécnicos, pero como se mencionó en la introducción del capítulo 3, el logeo geotécnico ha estado a cargo de dos empresas, por lo que la verificación de estos datos es fundamental para el posterior análisis de datos.

### 4.1 VALIDACIÓN DE LA BASE DE DATOS

La empresa E-Mining S.A. estuvo a cargo de la caracterización geotécnica desde el año 2007 hasta el año 2010, completando un total de 193 sondajes, los que se muestran en la **Tabla 4.1**. La caracterización se desarrolló en cartillas de mapeo, las que luego fueron digitalizadas en archivos Excel.

**Tabla 4.1: Total sondajes caracterizados por la empresa E-Mining**

E-MINING	JVC-29	JVC-95	JVC-156	JVC-108	JVC-203	JVC-226	SG-1A
	JVC-30A	JVC-96	JVC-170	JVC-163A	JVC-208	JVC-227	SG-1B
	JVC-32B	JVC-97	JVC-171A	JVC-168	JVC-210	JVC-228	SG-2
	JVC-35	JVC-98	JVC-172	JVC-169A	JVC-211A	JVC-229	SG-3
	JVC-37	JVC-99	JVC-173	JVC-181	JVC-212	JVC-230	SG-4
	JVC-38A	JVC-101	JVC-174	JVC-184	JVC-214	JVC-231	SG-5A
	JVC-39B	JVC-102	JVC-175	JVC-190	JVC-215	JVC-270	SG-5B
	JVC-41	JVC-103	JVC-176	JVC-191	JVC-216	JVC-273	SG-6
	JVC-49	JVC-104	JVC-177	JVC-192	JVC-217	JVC-274	SG-6A
	JVC-66	JVC-105	JVC-178	JVC-193	JVC-258	JVC-275	SG-7
	JVC-67	JVC-106	JVC-179	JVC-194	JVC-259	JVC-278	GM-1
	JVC-68A	JVC-107A	JVC-180	JVC-196A	JVC-260	JVC-279	GM-2
	JVC-71	JVC-110	JVC-182	JVC-247	JVC-261	JVC-280	GM-3
	JVC-72	JVC-111	JVC-183	JVC-248	JVC-262	JVC-281	GM-4
	JVC-73	JVC-112	JVC-185	JVC-249	JVC-263	JVC-282	GM-5
	JVC-74	JVC-113	JVC-186	JVC-250	JVC-264	JVC-232	GMC-6
	JVC-75	JVC-115A	JVC-187A	JVC-251	JVC-265	JVC-233	GMC-7
	JVC-76	JVC-130	JVC-188	JVC-252	JVC-266	JVC-233A	GMC-8
	JVC-78	JVC-131	JVC-189	JVC-253	JVC-267	JVC-234	GMC-9
	JVC-86	JVC-145	JVC-191	JVC-254	JVC-268	JVC-235	GMC-10
	JVC-88	JVC-148A	JVC-203	JVC-254A	JVC-269	JVC-236	GMC-11
	JVC-89	JVC-149	JVC-208	JVC-255	JVC-218	JVC-237	GMC-12
	JVC-90A	JVC-150A		JVC-256	JVC-219	JVC-240	GMC-15
	JVC-91A	JVC-152		JVC-257	JVC-220	JVC-242	GMC-17
	JVC-92	JVC-153A		JVC-197	JVC-221	JVC-244	GMC-18
	JVC-93	JVC-154		JVC-198	JVC-222	JVC-245	
JVC-94	JVC-155		JVC-202	JVC-225	JVC-246		

La empresa Geoblast S.A. inició los trabajos geotécnicos en el distrito centinela para la empresa AMSA, en el Proyecto Caracoles en el año 2011, con el mapeo de los sondajes SGTF del 11 al 18 y luego el re-mapeo

de los sondajes SGTF de 1 01 al 10; posteriormente en noviembre del 2011, inicia la caracterización de los sondajes JVC-283 al JVC-288, los geometalúrgicos desde el GMC-19 al GMC-26 y los sondajes Geotécnicos SGTF-19 a SGTF-26 (**Tabla 4.2**)

**Tabla 4.2: Total sondajes caracterizados por la empresa Geoblast**

<b>GEOBLAST</b>	SGTF-1	SGTF-11	EL-1	JVC-283	SGTF-19	GMC-19
	SGTF-2	SGTF-12	EL-2	JVC-284	SGTF-20	GMC-20
	SGTF-3	SGTF-13	EL-3	JVC-284A	SGTF-21	GMC-21
	SGTF-4	SGTF-14	EL-4	JVC-285	SGTF-22	GMC-22
	SGTF-5	SGTF-15	CV-2	JVC-285A	SGTF-23	GMC-23
	SGTF-6	SGTF-16	CV-3	JVC-286	SGTF-24	GMC-24
	SGTF-7	SGTF-17	CV-4	JVC-287	SGTF-25	GMC-25
	SGTF-7A	SGTF-18		JVC-288	SGTF-26	GMC-26
	SGTF-8					
	SGTF-9					
SGTF-10						

Para el logeo de sondajes, se cuenta con computadores Getac y el software Xilab, el cual minimiza errores humanos, por ejemplo exceder la suma de los tramos al largo recuperado. Además se incluyen variables como Zona tectonizada y GSI en sondajes.

Se realizó una revisión de la información capturada tanto de la Empresa E-Mining como de la Empresa Geoblast; en esta revisión se detectaron inconsistencias las que se enumeran a continuación:

- CASO 1. Sondajes reportados por la empresa E-Mining que presentan información incompleta; no presenta la longitud de los tramos enteros.
- CASO 2. Las unidades de la celda LRS (Largo de Roca Sólida) son diferentes.
- CASO 3. En la celda RQD (%) existen valores mayores a 100%.
- CASO 4. La celda recuperación, número de tramos enteros, Largo RQD no aparece información.
- CASO 5. Revisión del número de fracturas, según el criterio de la sección 3.1.4

A continuación se detalla para cada caso, los ajustes realizados.





### Caso 3. En la celda RQD (%) existen valores mayores a 100%.

Se detectaron 15 tramos en cada sondaje donde se presentaba este valor RQD mayor a 100, posteriormente mediante la fotografía se revisó y corrigió dicho valor.

La **Tabla 4.8** corresponde al sondaje JVC-281, que contiene 8 de los 15 casos de esta irregularidad.

**Tabla 4.8:** .Base de Datos reportada por E-Mining donde se observa valores de RQD superiores a 100.

SONDAJE	DESDE (cm)	HASTA (cm)	REC (m)	N° FRACTURAS (Intervalo)	FF (f/m)	TRAMOS ENTEROS (cm)	N° TRAMOS	LRS (cm)	LARGO RQD (cm)	RQD (%)
JVC-281	188	190		3	1.5	76;66;58;131		200		165.5
JVC-281	496	498		2	1	10;108;52;32		200		101
JVC-281	532	534		4	2	38;43;48;24;55		200		104
JVC-281	544	546		5	2.5	53;55;23;15;56;28		200		115
JVC-281	588	590		3	1.5	134;22;18;126		200		150
JVC-281	632	634		3	1.5	34;38;114;19		200		102.5
JVC-281	648	650		2	1	112;52;46		200		105
JVC-281	662	664		3		65;59;76;20		200		110

La metodología de ajuste del valor se detalla para el tramo 588-590, del sondaje JVC- 281, (**Foto 4.1**) donde se reporta un valor RQD igual a 150, debido a que las longitudes de los tramos enteros en centímetros: 134, 22, 18, 126, supera la longitud del tramo analizado que es de 2 metros.

Se tiene como base el valor de el LRS que corresponde a la suma de los tramos enteros, en este caso este número es igual a 300 cm (100 cm más que el LRS).

Se escala la fotografía del tramo con respecto a la longitud de la bandeja (90 cm), se reconocen las fracturas abiertas mapeadas y se realiza el conteo de los tramos. En este ejemplo, el valor errado es el último tramo de 126 cm, que en la realidad corresponden a 26 cm, el cual posiblemente fue un error de digitación.

Luego se cuenta el número de tramos y se calcula el número de fracturas de acuerdo al criterio de la sección 3.1.4. La frecuencia de fractura (FF) consiste en calcular el número de fracturas en un metro.

En la **Foto 4.1**, el inicio y fin del tramo 588-590 se marca con líneas rojas, se señala el inicio del último tramo correspondiente a los 126 cm con una línea verde.

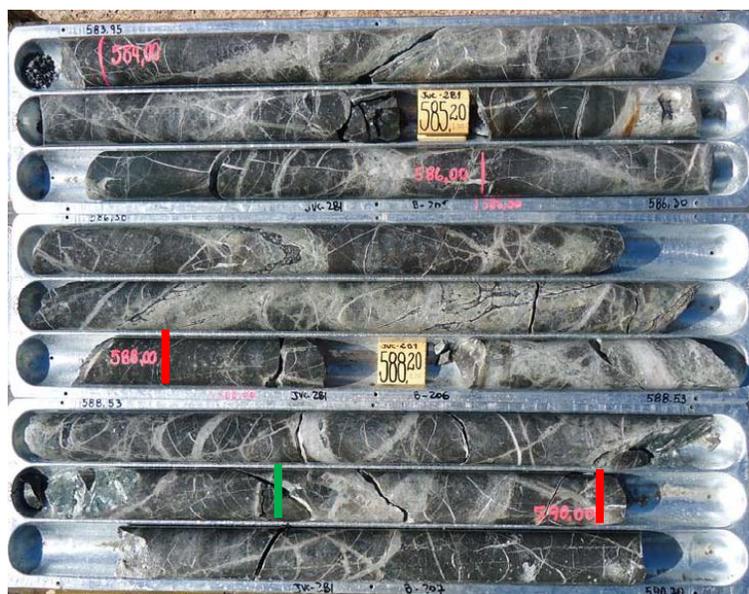


Foto 4.1: Sondaje JVC-281 en el tramo 588-590.

Revisada toda la información para cada tramo, a continuación se muestra la Base de Datos después de las modificaciones. (Ver **Tabla 4.9**)

Tabla 4.9: Base de Datos ajustada.

SONDAJE	DESDE (m)	HASTA (m)	REC. (m)	No. Fracturas (Intervalo)	FF (f/m)	TRAMOS ENTEROS (cm)					No. TRAMOS	LRS (cm)	LARGO RQD (cm)	RQD (%)
JVC-281	188	190	2	2	1,0	76	66	58			3	200	200	100
JVC-281	532	534	2	4	2,0	38	35	48	24	55	5	200	200	100
JVC-281	544	546	2	4	2,0	67	31	15	56	31	5	200	200	100
JVC-281	588	590	2	3	1,5	134	22	18	26		4	200	200	100
JVC-281	648	650	2	2	1,0	112	48	40			3	200	200	100
JVC-281	662	664	2	3	1,5	65	46	69	20		4	200	200	100

Siguiendo el mismo procedimiento anterior, en la **Tabla 4.10** se muestra el sondaje JVC-244 que contiene 2 tramos con RQD superior a 100%, la **Tabla 4.11** muestra el ajuste realizado.

Tabla 4.10: Base de Datos inicial donde se observa valores RQD superiores a 100.

SONDAJE	DESDE (cm)	HASTA (cm)	REC (m)	TRAMOS ENTEROS (cm)	LRS (cm)	N° TRAMOS	LARGO RQD (cm)	RQD (%)
JVC-244	230	232		88;1;4;77;50	200			107,5
JVC-244	636	638		30;61;64;79	200			117

Tabla 4.11: Base de Datos ajustada.

SONDAJE	DESDE (cm)	HASTA (cm)	REC (m)	TRAMOS ENTEROS (cm)				LRS (cm)	N° TRAMOS	LARGO RQD (cm)	RQD (%)
JVC-244	230	232	2	88	5	77	30	200	4	195	98
JVC-244	636	638	2	30	61	64	45	200	4	200	100

**Caso 4. La celda recuperación, número de tramos enteros, Largo RQD no aparece información.**

Al igual que el CASO 3, se revisó los tramos que presentaban este problema mediante fotografía, se completó las celdas de “Tramos enteros” y “Recuperación” para el posterior cálculo de RQD.

La **Tabla 4.12** muestra 4 metros correspondientes al sondaje 196A, donde no existe información, a la que luego de un análisis de la fotografía de este metraje, se agregó la información correspondiente (**Tabla 4.13**)

**Tabla 4.12: Base de Datos donde se observa que no existe información.**

SONDAJE	DESDE (cm)	HASTA (cm)	N° DE FRACT.	TRAMOS ENTEROS (cm)	N° TRAMOS	LRS (cm)	LARGO RQD (cm)	RQD (%)
JVC-196A	408	410						
JVC-196A	410	412						
JVC-196A	412	414						
JVC-196A	414	416						
JVC-196A	418	420						
JVC-196A	460	462						
JVC-196A	462	464						
JVC-196A	464	466						
JVC-196A	468	470						
JVC-196A	470	472						
JVC-196A	472	474						
JVC-196A	474	476						
JVC-196A	476	478						
JVC-196A	478	480						
JVC-196A	484	486						
JVC-196A	488	490						
JVC-196A	494	496						
JVC-196A	498	500						
JVC-198	540	542						

Mediante la observación del registro fotográfico se pudo determinar la longitud de los tramos enteros para posteriormente calcular el valor RQD. En la siguiente fotografía (Ver **Foto 4.2**) correspondiente al sondaje JVC-196A en el tramo 418-420 (señalado el inicio y fin con líneas rojas), se observa que no existe ninguna fractura de tipo natural por tanto existe un tramo igual a 200 cm.

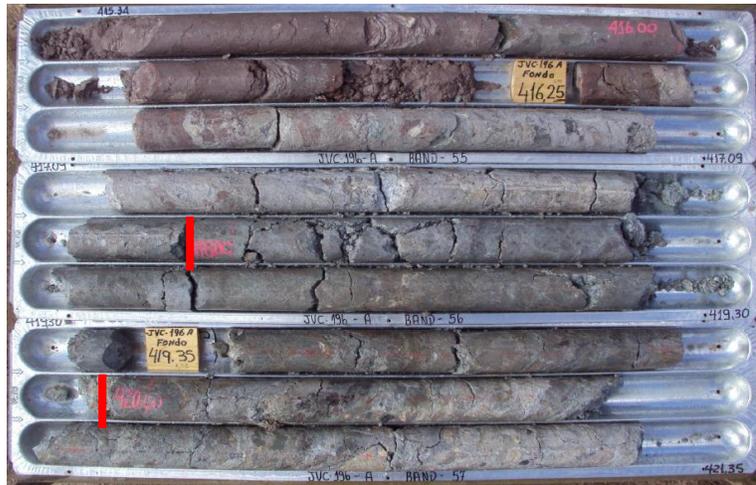


Foto 4.2: Sondaje JVC-196A a la profundidad de 416 m hasta los 420 m.

A continuación se muestra la **Tabla 4.13**, correspondiente a parte de base de datos donde se completó la información mediante la observación del registro fotográfico de la **Foto 4.2**.

Tabla 4.13: Base de Datos ajustada.

SONDAJE	DESDE (cm)	HASTA (cm)	RECUPERACION (m)	TRAMOS ENTEROS (cm)		N° TRAMOS	LRS (cm)	LARGO RQD (cm)	RQD (%)
JVC-196A	414	416	2	80	100	2	180	180	90
JVC-196A	418	420	2	200		1	200	200	100

#### Caso 5. Revisión del número de fracturas, según el criterio de la sección 3.1.4

El cálculo del número de fracturas se realizó según el criterio de la sección 3.14 para todos los sondajes del proyecto. En el **Anexo 1 "Base de Datos Geotecnia Caracoles"** en la columna "F" se muestra el cálculo anterior.

## 4.2 ANÁLISIS DE LA BASE DE DATOS

Ya verificados los datos que se usarán en el estudio, se procede a agruparlos en sus respectivas Litologías. Para esto, se realiza el cruce de las bases de datos de AMSA (**Anexo 2 “Base de Datos GEOLOGIA”**) y la Base de datos de la caracterización Geotécnica (**Anexo 1 “Base de Datos Geotecnia Caracoles”**), ya que como se mencionó en el capítulo 1, se trabajará bajo el concepto de Unidades Lito-geotécnicas.

Un primer análisis de la base de datos, consiste en reconocer dentro del macizo rocoso zonas con intenso daño estructural, el cual puede deberse a estructuras de fallas o zonas con intenso fracturamiento debido a esfuerzos.

Para lo anterior, se reconoce en los parámetros geomecánicos de interés de la sección 4.1, las condiciones que aseguran una mala calidad de la roca:

**ZONA TECTONIZADA:** Este parámetro es de gran utilidad al momento de reconocer las zonas de daño, ya que indican la presencia misma de la falla interpretada por el geólogo de campo y las zonas con intenso fracturamiento. Las clasificaciones que se consideran son: Roca cizallada, Brecha Tectónica, Roca Molida y Zona Fracturada.

**RQD:** Es el índice que define el grado de fracturación del macizo rocoso. La calidad que se considera en el estudio es de Mala a Muy Mala, es decir con menos de un 50% de los tramos mayor a 10 cm.

**RESISTENCIA:** Es el parámetro que permite caracterizar y clasificar la roca matriz y que considera además el grado de alteración de ésta. Se considerarán rocas blandas con una resistencia menor a 50 MPa, es decir que pertenecen a las clases R0, R1 y R2.

**RMR:** Considera la condición de las discontinuidades además de la resistencia y RQD ya mencionados. El valor numérico obtenido clasifica el macizo de una manera más completa. Se considera las Clases de calidad “Muy Mala”, “Mala” y “Regular”. La razón por la que se incluye la Clase III Regular es que se asume una condición seca en todo el rajo, aportando 15 puntos a la suma total, obteniéndose mejores valores de lo que realmente sería.

**GSI:** La condición de la calidad de las paredes de las discontinuidades es un gran aporte al momento de determinar zonas de falla, ya que la calidad “Pobre” o “Muy Pobre” indica gran alteración de las paredes, lo que puede significar zonas de intensa alteración, incluso cizalle.

A modo de ejemplo, se muestra en la **Imagen 4.1** una parte de la base de datos, correspondiente a la litología de Toba Andesítica en el sondaje GMC-20. Desde los 248 a los 252 metros de profundidad se observa:

- Un cambio de la resistencia estimada de R4 a R2, volviendo luego a R4
- El RMR pasa de Clase Buena a Regular
- El RQD cambia de calidad Muy Buena a Aceptable
- Zona de Brecha tectónica
- Calidad de las paredes de Muy pobre.

BHID	FROM	TO	GSI Cal paredes	RESISTENCIA	RMR	RMR_CLASES	RQD	RQD%	Zona Tectonizada
GMC-20	242	242,25	PO	R4	62	II BUENA	Muy Buena	100	Roca sana
GMC-20	242,25	243,100006	PO	R4	62	II BUENA	Muy Buena	100	Brecha Tectónica
GMC-20	243,100006	244	PO	R4	62	II BUENA	Muy Buena	100	Roca sana
GMC-20	244	246	FA	R4	66	II BUENA	Muy Buena	100	Roca sana
GMC-20	246	248	FA	R4	68	II BUENA	Muy Buena	100	Roca sana
GMC-20	248	249,399994	FA	R2	48	III REGULAR	Aceptable	73	Roca sana
GMC-20	249,399994	250	FA	R2	48	III REGULAR	Aceptable	73	Brecha Tectónica
GMC-20	250	252	VP	R2	46	III REGULAR	Aceptable	65	Brecha Tectónica
GMC-20	252	254	FA	R3	61	II BUENA	Muy Buena	100	Brecha Tectónica
GMC-20	254	254,600006	GD	R4	66	II BUENA	Muy Buena	100	Roca sana
GMC-20	254,600006	256	GD	R4	66	II BUENA	Muy Buena	100	Roca sana
GMC-20	256	258	GD	R4	72	II BUENA	Muy Buena	100	Roca sana
GMC-20	258	258,5	SI	R4	72	II BUENA	Muy Buena	100	Roca sana

Imagen 4.1: Parte de Base de Datos correspondiente al sondaje GMC-20 desde los 242 a los 258 metros de profundidad.

La interpretación de esta zona se verifica con la posterior revisión de las fotografías de los sondajes, sólo así se asegura una correcta identificación.

La **Foto 4.3** corresponde al tramo de material dañado del ejemplo.



Foto 4.3: Sondaje GMC-20, desde 249.70 hasta 253.97.

El ejemplo anterior integra las 5 variables de interés propuestas, siendo un caso bastante ideal ya que en la realidad puede presentarse una o dos de las condiciones que permitan el reconocimiento de este macizo de mayor daño.

La **Imagen 4.2** corresponde a una parte del sondaje GM-2, desde los 716 a los 726 metros de profundidad. Este sondaje pertenece a la campaña Geometalúrgicos 2010, por lo que no se cuenta con la información de Zona Tectonizada. De los datos que aseguran una mala calidad de la roca, sólo se observa uno: calidad de las paredes pobre. Además, los mismos 4 metros que presentan esta condición muestran un cambio en la estimación de la resistencia de la roca, de Dura (R4) a Moderadamente Dura (R3). Luego de observar la fotografía del tramo se determina que corresponde a una pequeña zona cizallada (**Foto 4.4**).

BHID	FROM	TO	GSI Cal paredes	RESISTENCIA	RMR	RMR_CLASES	RQD	RQD %	Zona Tectonizada
GM-2	716	718	GD	R4	66	II BUENA	Muy Buena	91	Sin Información
GM-2	718	720	PO	R3	65	II BUENA	Muy Buena	100	Sin Información
GM-2	720	722	PO	R3	63	II BUENA	Muy Buena	97	Sin Información
GM-2	722	724	GD	R4	68	II BUENA	Muy Buena	100	Sin Información
GM-2	724	726	GD	R4	68	II BUENA	Muy Buena	94	Sin Información

Imagen 4.2: Parte de Base de Datos correspondiente al sondaje GM-2 desde los 716 a los 726 metros de profundidad.



Foto 4.4: Sondaje GMC-2, desde 715.05 hasta 722.30 metros.

Dentro de esta revisión, se detectaron aproximadamente 1127 inconsistencias en el parámetro RQD reportado en la Base de datos, que se deben agregar a los 5 casos de la sección 3.1.

A continuación se muestran 2 ejemplos:

1. El sondaje GMC-10 a los 570 metros de profundidad registra un RQD de 8% (Tabla 4.14), perteneciente a Calidad "Muy Mala". Al revisar la fotografía del tramo (Foto 4.5) se observa que la roca es bastante buena. El ajuste que se realiza es del mismo modo que el Caso 3 de la sección 3.1 (Tabla 4.15).

Tabla 4.14: BD inicial se observa RQD reportado 8.

SONDAJE	DESDE	HASTA	REC (m)	TRAMOS ENTEROS (cm)			RQD %
GMC-10	570	572	2	15	7		8

Como se observa en la Foto 4.5 para el sondaje GMC-10 en el tramo 570-572 se observa que el RQD es 100.



Foto 4.5: Sondaje GMC-10 desde los 570 a los 572 metros de profundidad.

Tabla 4.15: Base de Datos ajustada donde se observa RQD 100

SONDAJE	DESDE	HASTA	REC (m)	N° FRACTURAS	FF (f/m)	TRAMOS ENTEROS (cm)					N° TRAMOS	LRS (cm)	RQD (%)
GMC-10	570	572	2	4	2	27	125	14	14	20	5	200	100

2. Sondaje JVC-287, a la profundidad de 406 a 408 metros, reporta un RQD de 0% (**Foto 4.6**).

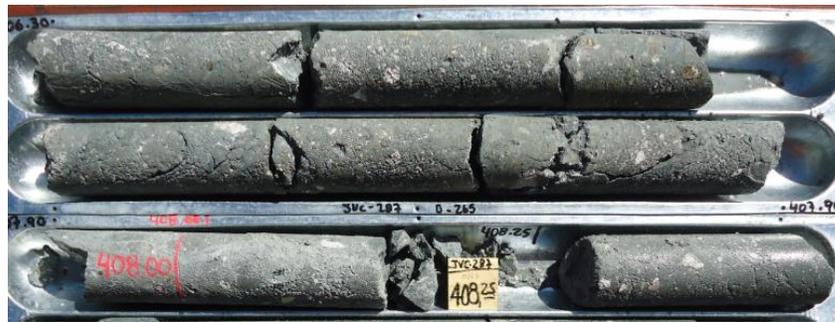


Foto 4.6: Sondaje JVC-287 desde 406.3 a 408.4 metros de profundidad

El procedimiento anterior se realiza para todas las litologías. La clasificación de los datos es entregada dentro del **Anexo 3 “Caracterización Unidades Lito-Geotécnicas”**, donde se indica el sondaje, la profundidad, la litología y la condición del macizo rocoso, es decir si pertenece a las zonas de material dañado.

El siguiente análisis de la Base de datos consiste en el reconocimiento de distintas poblaciones de datos dentro de las litologías, su desarrollo se detalla en el capítulo 5.

## 5 MODELAMIENTO DE UNIDADES LITO-GEOTÉCNICAS

En este capítulo se diferenciarán las litologías en Unidades Lito-Geotécnicas, con el uso de estadística, fotografía de sondajes y el programa Leapfrog para la visualización de los datos y la posterior construcción de sólidos 3D.

Se define una metodología de trabajo, la cual será aplicada a cada una de las litologías del estudio y las limitaciones al momento de modelar en 3D.

### 5.1 LIMITACIONES MODELAMIENTO

El modelamiento de las unidades Lito-geotécnicas se desarrolló en el software Leapfrog, para este se consideraron las siguientes restricciones:

1. Las Unidades Lito-Geotécnicas se restringirán a los sólidos entregados por la empresa AMSA en Agosto del 2012. Este punto se menciona ya que existen sondajes que quedan fuera de estos cuerpos. Un ejemplo de lo anterior es en la Toba Andesítica. En la **Imagen 5.1**. Se observa el sólido modelado por AMSA, y los sondajes con información geotécnica correspondiente a esta litología (sondajes en amarillo). 12 sondajes ubicados en la parte Este quedan fuera de la litología modelada, los que no serán considerados en la construcción del sólido, pero sí en la determinación de los valores de los parámetros geo mecánicos que se asignará a cada Unidad Lito-geotécnica.

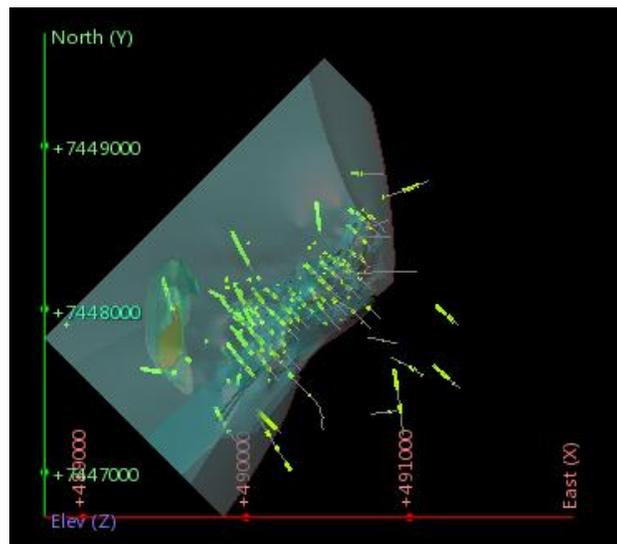


Imagen 5.1: Sólido de la Toba Andesítica modelado por la empresa AMSA en celeste, en amarillo sondajes con información correspondiente a esta litología.

2. Como se mencionó en la sección 1.3 de los Alcances Generales, no existe un Modelo Estructural actualizado, por lo que no se puede modelar la continuidad de las zonas de intenso fracturamiento o de falla interpretadas en el capítulo anterior.

## 5.2 METODOLOGÍA

A partir del análisis de los datos realizado en la sección 4.2, se logró identificar zonas con material fracturado, cizallado o molido para cada una de las litologías. Estas zonas se excluyeron de los datos generales, creándose otro grupo “Macizo Material Dañado” el que no será modelado. El resto del macizo se clasificará en las unidades lito-geotécnicas.

Se sigue un procedimiento de trabajo basado en búsqueda de poblaciones mediante análisis de datos que tengan una continuidad espacial y control geológico. Esta diferencia se reconoce mediante estadística descriptiva; histogramas de frecuencia, frecuencia acumulada.

Los controles que diferenciarán el macizo son distintos dependiendo de su naturaleza y ubicación. A continuación se visualiza la distribución espacial de los parámetros geomecánicos RQD (**Imagen 5.2**) (49.393 datos en total) y las probetas UCS (**Imagen 5.2**) (283 probetas), con el fin de buscar algún control espacial que explique las poblaciones de datos.

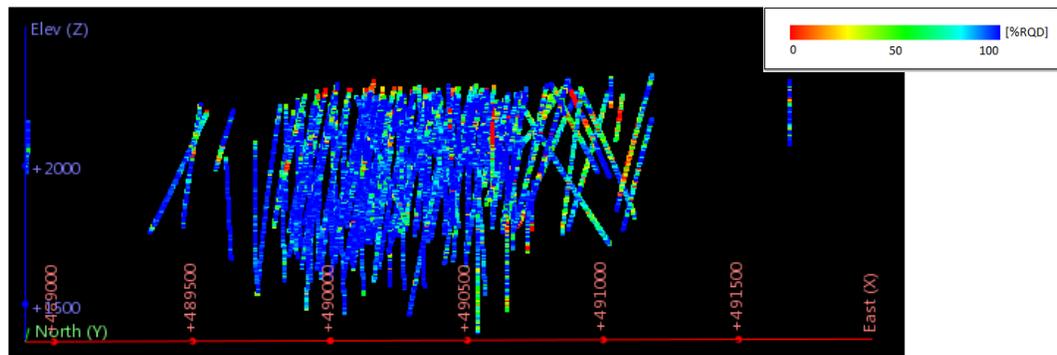


Imagen 5.2: Distribución espacial datos RQD %

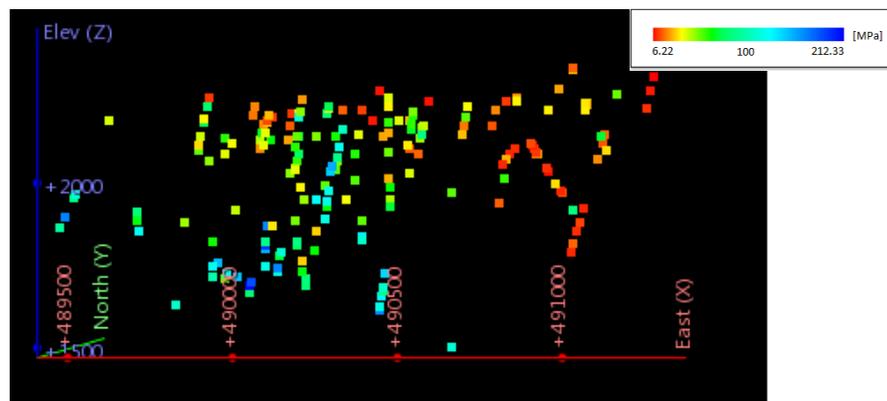
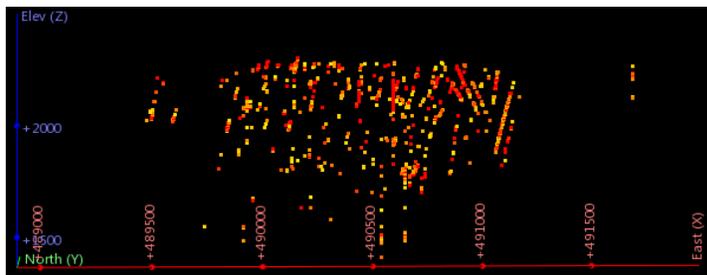
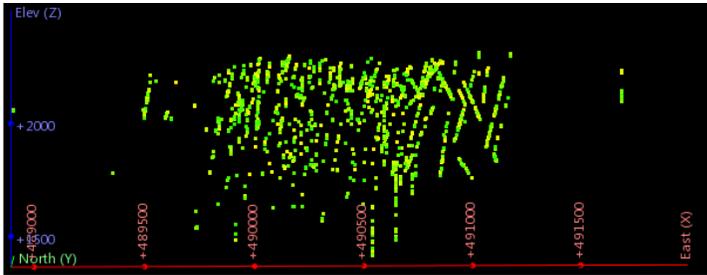


Imagen 5.3: Distribución espacial datos Probetas [MPa]

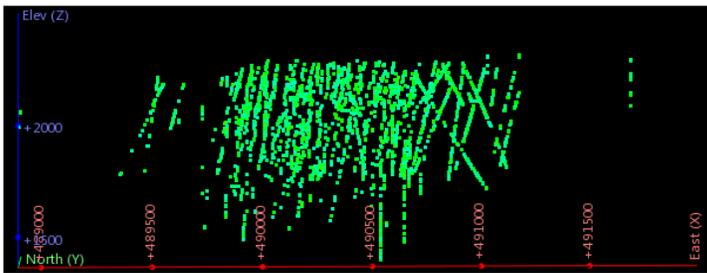
La tendencia no es muy evidente, pero se observa una pequeña concentración de valores de baja calidad al lado este. Las siguientes imágenes (**Imagen 5.4** e **Imagen 5.5**) muestran los datos separados por los rangos descritos por el ISRM para el RQD y la resistencia de la roca (**Tablas 3.1** y **Tabla 3.2**).



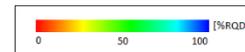
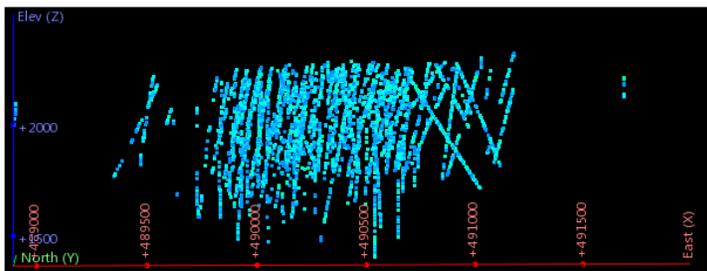
CLASE	CALIDAD	RQD (%)
I	MUY MALA	< 25



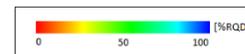
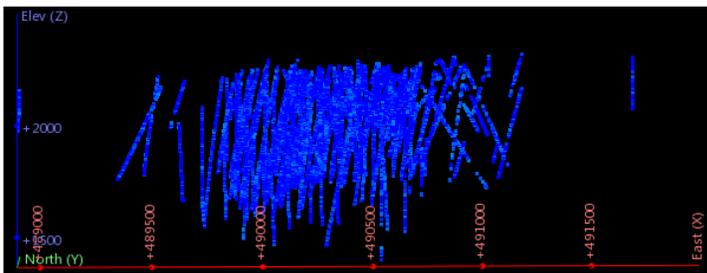
CLASE	CALIDAD	RQD (%)
II	MALA	25-50



CLASE	CALIDAD	RQD (%)
III	ACEPTABLE	50-75

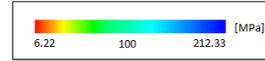
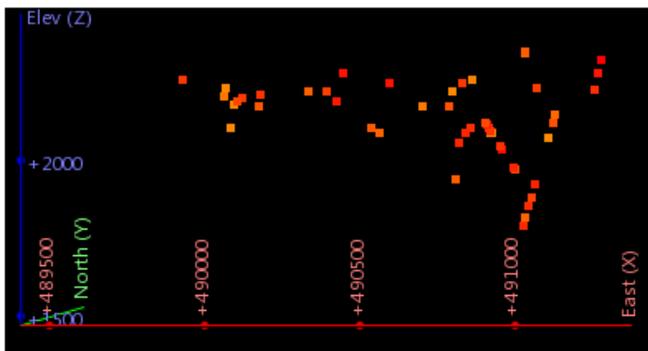


CLASE	CALIDAD	RQD (%)
IV	BUENA	75-90

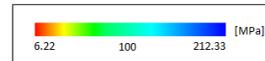
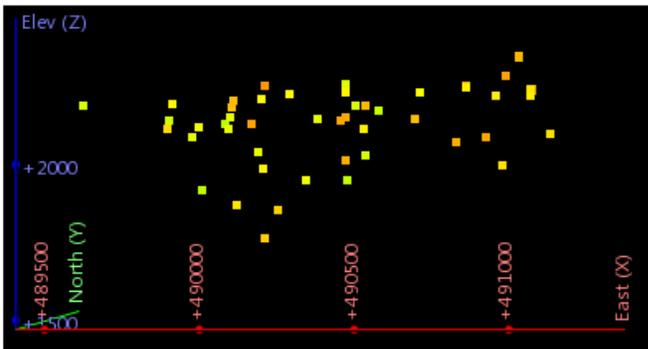


CLASE	CALIDAD	RQD (%)
V	MUY BUENA	90-100

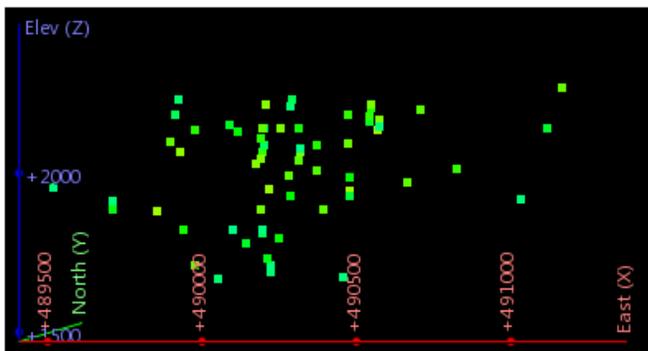
Imagen 5.4: Información de RQD separada por clases, ubicación espacial.



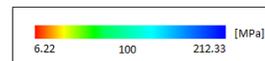
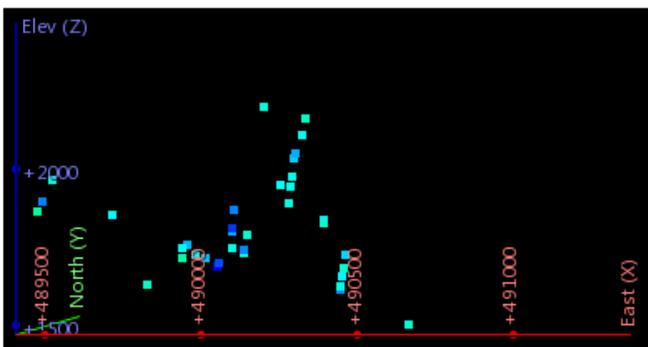
TIPO	CÓDIGO	MPa
BLANDA	R2	5 – 25



TIPO	CÓDIGO	MPa
MODERADAMENTE DURA	R3	25 – 50



TIPO	CÓDIGO	MPa
DURA	R4	50 – 100



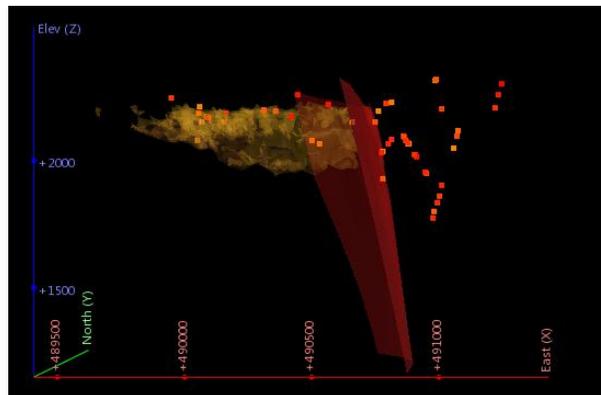
TIPO	CÓDIGO	MPa
MUY DURA	R5	100–50

Imagen 5.5: Información de Ensayos UCS separada por clases, ubicación espacial.

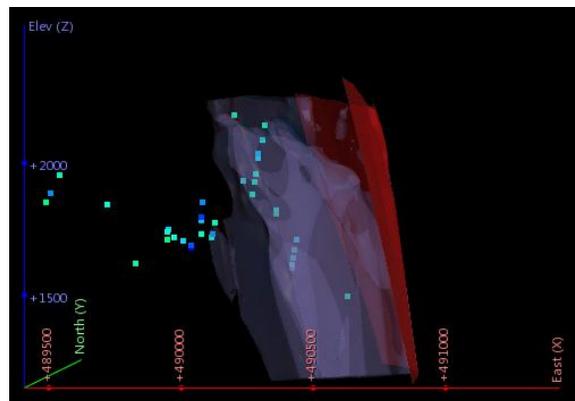
Para el RQD, las clases están distribuidas de forma más o menos homogénea, es decir, no se observan zonas con una alta concentración de un tipo de calidad. **(Imagen 5.4)**

Para los resultados de los ensayos UCS, los rangos extremos (5 a 25 MPa y 100 a 250 MPa) muestran una tendencia más clara:

- 5 a 25 MPa: Tienen a concentrarse en dos zonas: **(Imagen 5.6)**
  - Cercana a la en superficie, coincidiendo con la zona de óxidos
  - En la parte Este del proyecto (Este de la Falla Roja), los bajos valores se interpretan como zonas argilizadas.
- 100 a 250 MPa: También se observan dos concentraciones de datos: **(Imagen 5.7)**
  - Desde los 400 a 800 metros de profundidad (zona primaria)
  - En la parte central, desde 200 a 400 metros de profundidad, corresponde a la litología de Pórfido Granodiorítico, el cual no entra en la zona de óxidos.



**Imagen 5.6:** Ensayos UCS con valores entre 5 y 25 MPa, ubicación con respecto la Zona de Oxidos y Falla Roja.



**Imagen 5.7:** Ensayos UCS con valores entre 100 y 250 MPa, ubicación con respecto al Pórfido Dacítico y Falla Roja.

Del ejercicio anterior, con respecto a la resistencia se concluye que existen dos controles evidentes: La zona de óxidos y la Falla roja. Se identificará en las litologías controles como el anterior, que permitan comprender el comportamiento de las poblaciones de datos para luego modelar. El criterio que se use dependerá de la naturaleza de la roca o la ubicación de ésta con respecto a otras variables como fallas, zona mineral o alteraciones.

### 5.3 UNIDADES LITO-GEOTÉCNICAS

#### 5.3.1 TOBA ANDESÍTICA (TUFAN)

Corresponde a la litología con un mayor volumen dentro del Pit final de Óxidos (más de 50 %) y alberga más del 80% de la mineralización de óxidos. En la **Imagen 5.8** se observa la Toba Andesítica en celeste, intruida por los Pórfidos Diorítico (en verde) y Dacítico (el blanco), en la parte más superficial en color amarillo se observa la mineralogía de Óxidos Verdes y Negros.

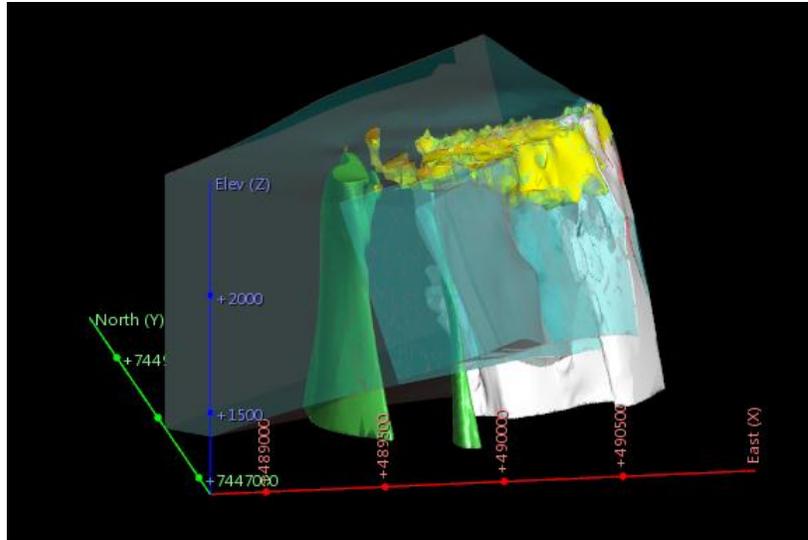


Imagen 5.8: Toba andesítica en celeste, zona de óxidos en amarillo, Pórfido Diorítico en verde y Pórfido Dacítico en blanco.

La Toba Andesítica presenta alteración potásica (incluye potásico feldespático, potásico clorítico y potásico biotita) (**Ver Foto 5.1**), sericítica y clorita sericita (**Ver Foto 5.2**). La ubicación de éstas con respecto a la toba se muestra en la **Imagen 5.9**, la alteración sericítica se ubica más superficialmente que las alteraciones potásica y clorita sericita.



Foto 5.1: Sondaje GMC-10, desde 595.23 hasta 599.65 metros de profundidad, TUFAN con alteración potásica.



Foto 5.2: Sondaje JVC-181, desde 569.88 hasta 577.20 metros de profundidad, TUFAN con alteración clorita-sericita.

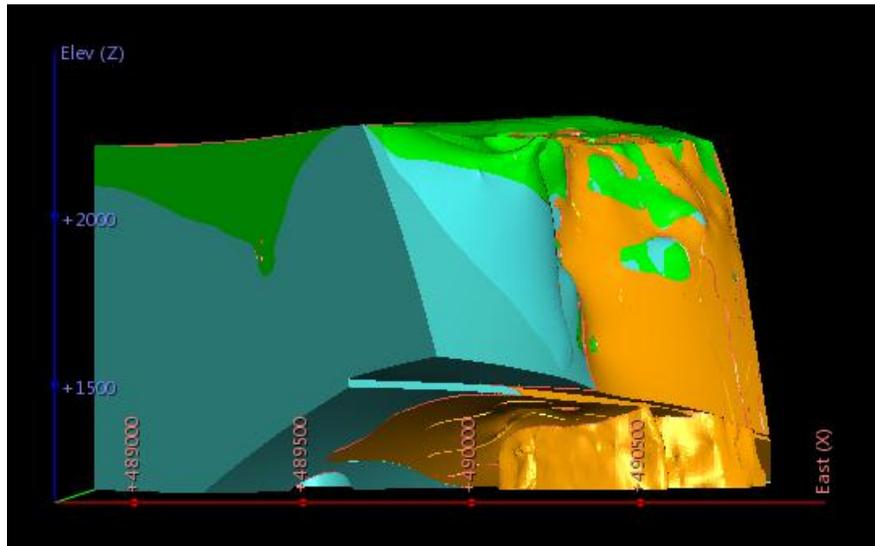
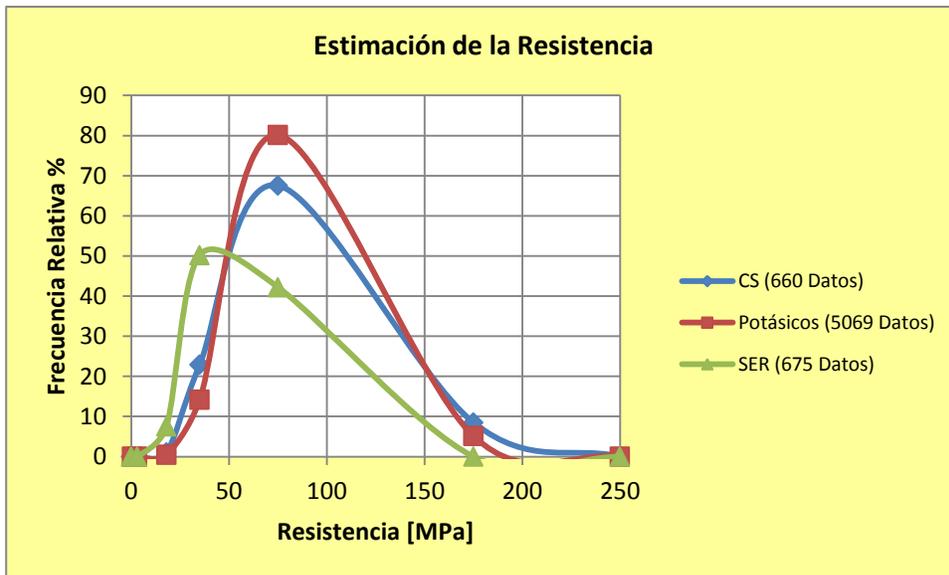


Imagen 5.9: Alteraciones dentro de la Toba Andesítica. Verde: alteración sericítica, Naranja: alteración potásica, celeste: alteración clorita-sericita.

Los **Gráficos 5.1, 5.2 y 5.3** corresponden a histogramas de frecuencias relativas de estas tres alteraciones con respecto a su estimación de la resistencia, RQD y RMR. A partir de ellos se observa que las propiedades geomecánicas de las alteraciones no muestran grandes diferencias.



Clase	Resistencia a La Compresión simple (MPa)
R0	< 1
R1	1 – 5
R2	5 – 25
R3	25 – 50
R4	50 – 100
R5	100 – 250
R6	> 250

Gráfico 5.1: Histogramas de frecuencia relativa de la estimación de la resistencia, diferenciando las alteraciones presentes.

La estimación de la resistencia no diferencia entre las alteraciones potásicas y clorita sericita, pero se observa que la media de la alteración sericítica muestra una leve baja. Se hizo una conversión de las clases al valor medio del rango en MPa asignado según la tabla de correlación entre estas variables (**Tabla a la derecha del Gráfico 5.1**), por ejemplo para la clase R2 se utilizó el valor de 13 MPa ya que la proporción entre las clases no es homogénea y al momento de visualizar los datos se observa con más claridad la diferencia entre resistencias. Para el RQD y RMR también se usó la metodología de usar el valor medio de las clases.

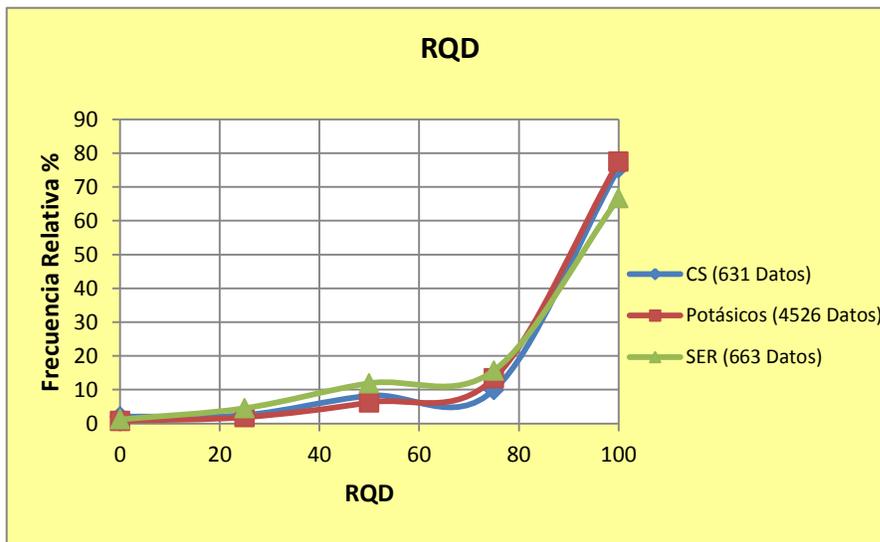
Esta diferencia entre la resistencia estimada en la alteración sericítica y las otras dos, se comprueba con los resultados de los ensayos UCS. La **Tabla 5.1** muestra los resultados de estadística descriptiva, el número de probetas ensayadas en la alteración potásica es alrededor de 80% más que para las otras alteraciones, y la mediana de las probetas pertenecientes a la alteración sericítica muestran que realmente es menos resistente que la alteración potásica y clorita sericítica, que tienen una resistencia media similar.

Tabla 5.1: Estadística descriptiva de los ensayos UCS por alteración presente en la Toba Andesítica.

	POTASICA	SERICITA	CLO-SER
Valid cases	92	9	4
Std. Deviation	36,9	22,7	81,1
Minimum	15,7	14,5	31
Maximum	212,3	84,8	181,5
25th percentile	81,5	35,5	33,6
Median	104,5	43,57	106,4
75th percentile	132,8	72,4	178,9

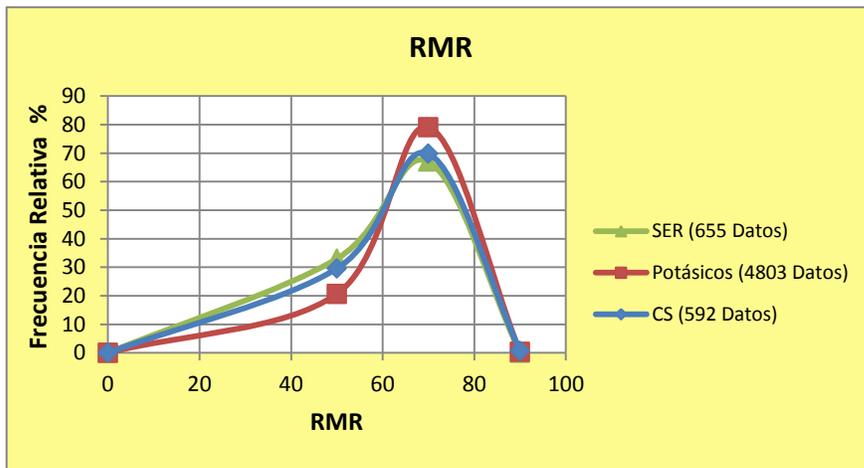
Para los parámetros RQD y RMR no se observa diferencia entre las alteraciones, la media y desviación estándar es bastante similar. (Gráfico 5.2, Gráfico 5.3)

La gran variabilidad en los datos del Gráfico 5.1 (la estimación de la resistencia con el método del martillo varía desde R1 a R5) y Gráfico 5.2 (RQD, desde calidad “Muy Mala” a “Muy Buena”), se debe a que las zonas de daño definidas en la sección 4.2 no se han separado aún del macizo de mejor calidad.



Calidad	RQD (%)
Muy mala	< 25
Mala	25 – 50
Aceptable	50 – 75
Buena	75 – 90
Muy buena	90 – 100

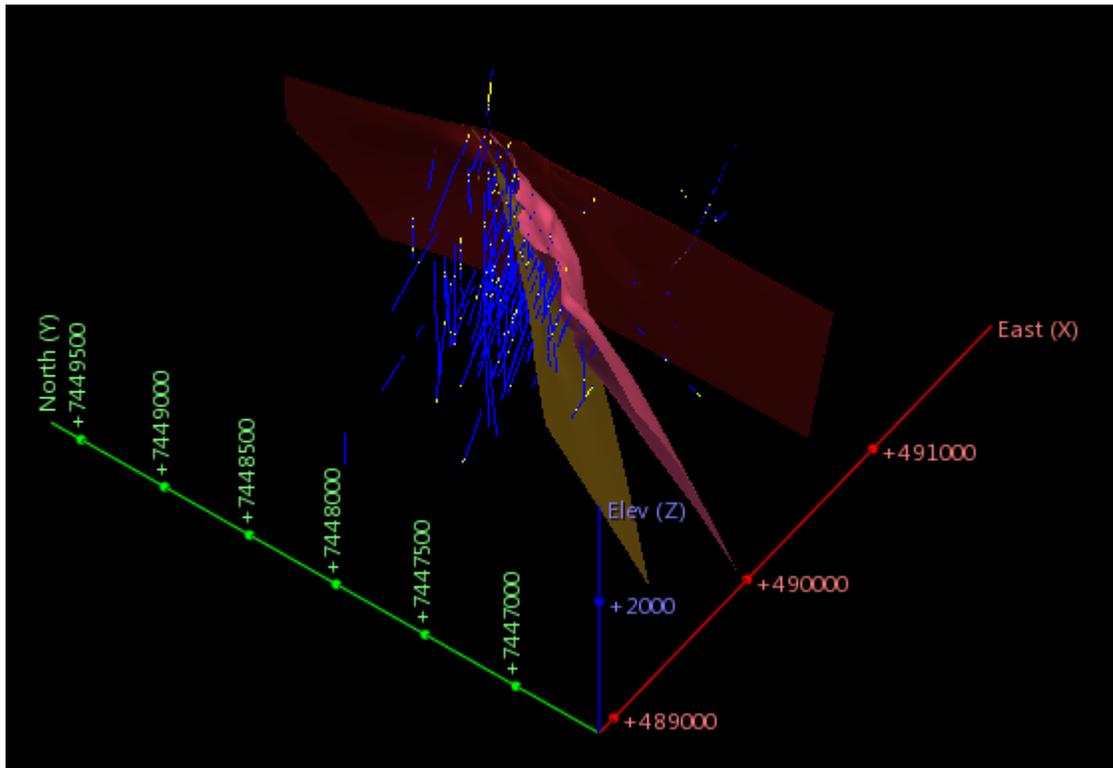
Gráfico 5.2: Histogramas de frecuencia relativa parámetro RQD, diferenciando las alteraciones presentes.



Clase	Calidad	Valoración
I	Muy Buena	100 - 81
II	Buena	80 - 61
III	Media	60 - 41
IV	Mala	40 - 21
V	Muy Mala	< 20

Gráfico 5.3: Histogramas de frecuencia relativa parámetro RMR, diferenciando las alteraciones presentes.

La **Imagen 5.10** corresponde a la visualización de la información de sondajes del macizo diferenciado en zonas de material dañado, en amarillo y las zonas del macizo de mejor calidad en azul. Además se incluye La Falla Roja en rojo, Falla Caracoles en café, y Falla Contacto Noreste en rosado.



**Imagen 5.10:** Información de sondajes diferenciando en zonas de material dañado, en amarillo y las zonas del macizo de mejor calidad en azul para la TUFAN.

La continuidad de estas zonas de daño se podrá modelar una vez que se haya realizado el modelo estructural del proyecto, debido a que se cuenta con datos aislados correspondiente a posibles fallas.

Las zonas de material fracturado van desde R1 A R3 (**Gráfico 5.4**) con un RQD de “Muy Malo” a “Muy Bueno” (**Gráfico 5.5**), la razón de esta variabilidad en el parámetro RQD es la naturaleza misma de las fallas, en este caso los dos valores de RQD alto, calidad “Buena” y “Muy Buena”, corresponden a la falla roja, la que cizalla y argiliza intensamente la roca, donde se observa una baja resistencia pero al mantenerse “unida” presenta estos valores de RQD.

Los gráficos a continuación muestran la diferencia entre los macizos identificados.

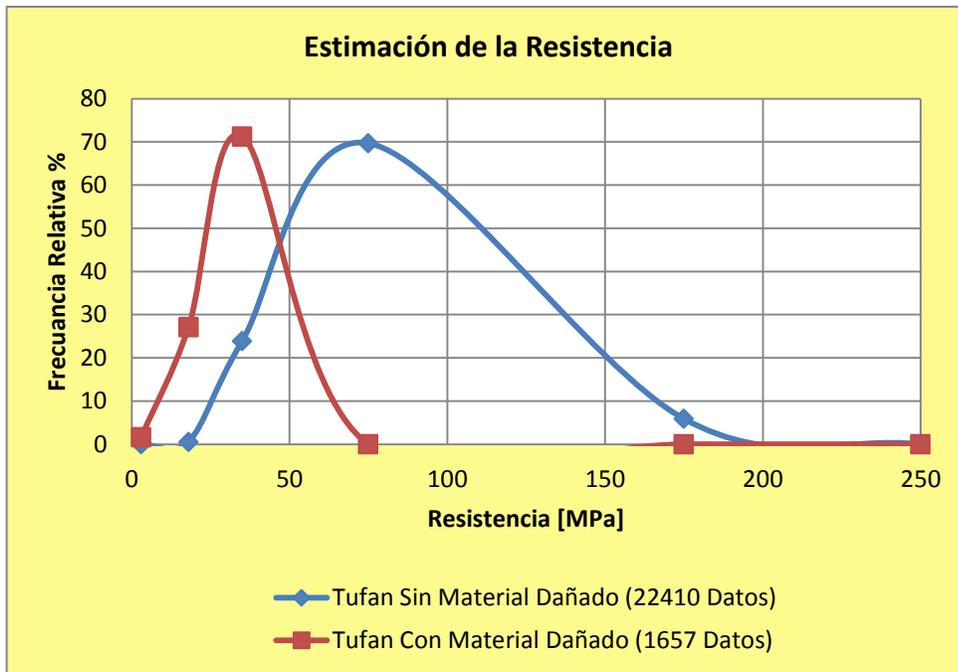


Gráfico 5.4: Histograma de frecuencia relativa de la estimación de la resistencia, diferenciando la zona de macizo dañado.

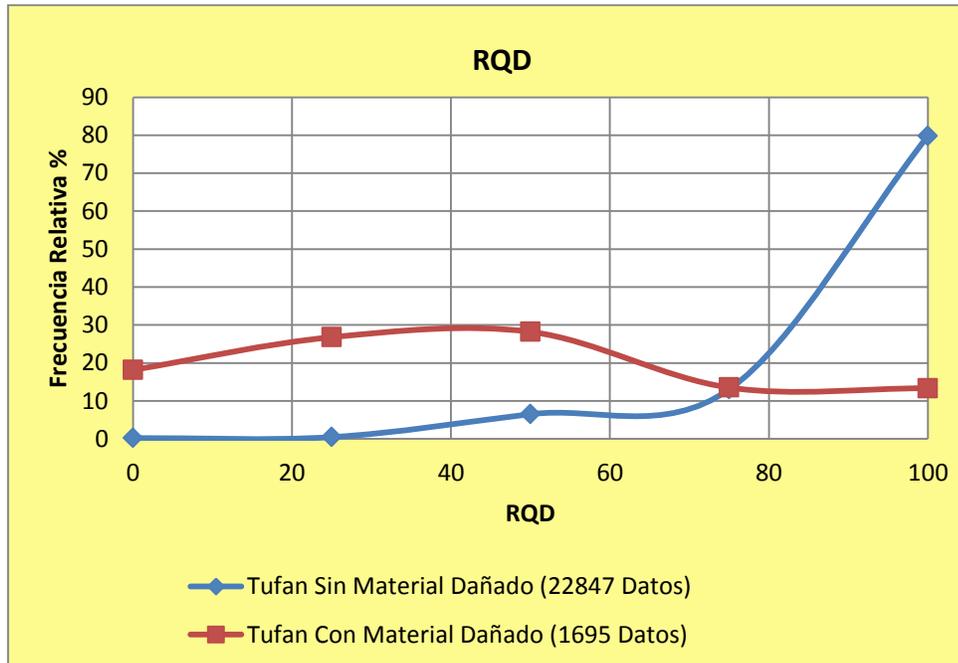


Gráfico 5.5: Histograma de frecuencia relativa del parámetro RQD, diferenciando la zona de macizo dañado.

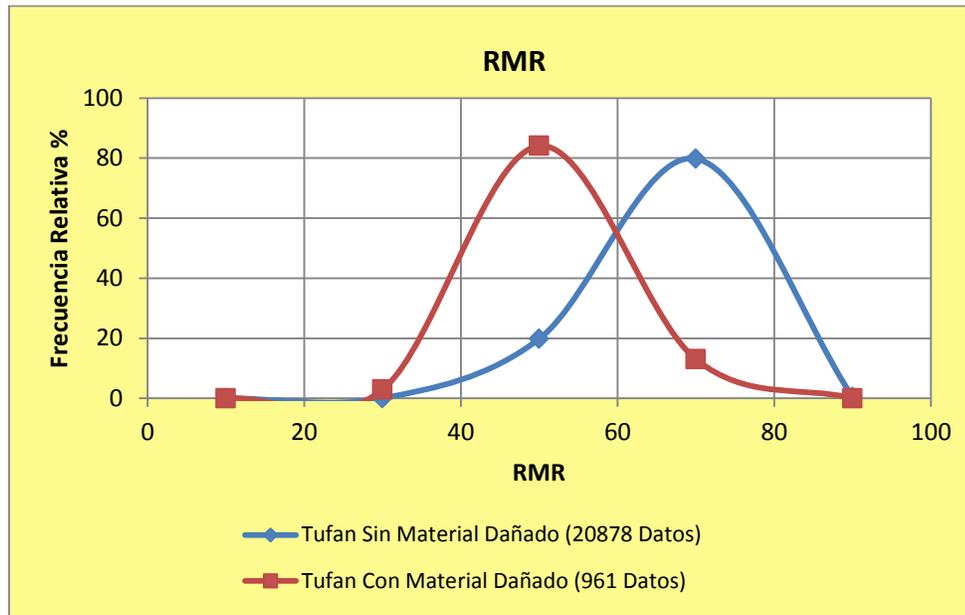


Gráfico 5.6: Histograma de frecuencia relativa del parámetro RMR, diferenciando la zona de macizo dañado.

En los 3 parámetros de interés se observa una clara diferencia entre ambos macizos. Aun así la estimación de la resistencia, en el **Gráfico 5.4**, muestra una gran variabilidad en los datos de la toba sin el material con intenso fracturamiento o presencia de fallas (desde R2 a R5). Esta diferencia entre los datos se verifica con los ensayos UCS, sólo con las probetas donde la ruptura haya sido por matriz, con un total de 90 datos.

La **Tabla 5.2** muestra la estadística descriptiva desarrollada para este parámetro, con un mínimo de 12,32 MPa y un máximo de 212 MPa. Según la tabla de la relación entre las clases y el rango en Mega pascales correspondería a un R2 y a un R5.

Tabla 5.2: Estadística descriptiva de los ensayos UCS para la Toba Andesítica.

Valid cases	90
Std. Deviation	48,8
Minimum	12,3
Maximum	212,3
25th percentile	41,1
Median	68,1
75th percentile	117,7

Ya que esta variabilidad no es explicada con las alteraciones identificadas en la toba, se realiza un análisis comparando los valores de los ensayos UCS con su ubicación en profundidad. El **Gráfico 5.7** muestra una tendencia a aumentar la resistencia en profundidad. Esto da luces de una separación dentro de esta litología.

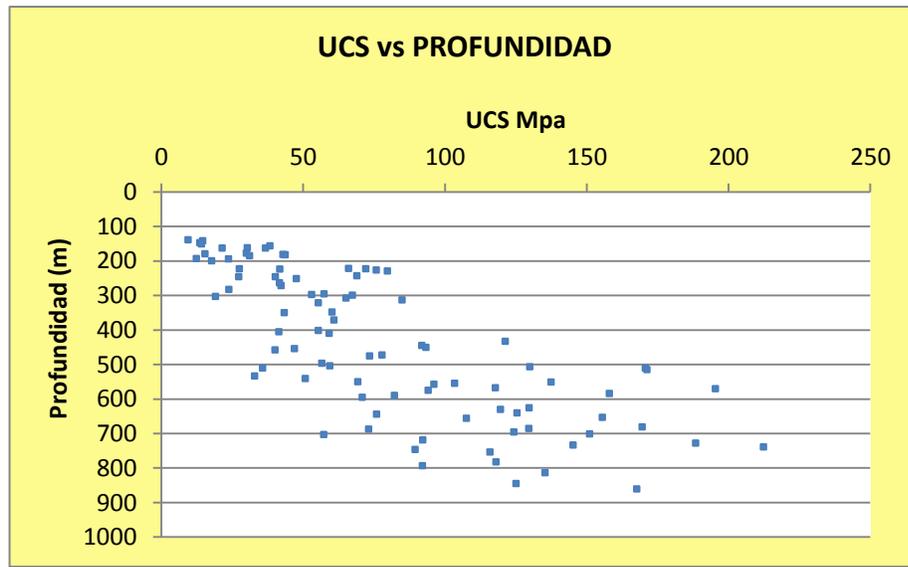


Gráfico 5.7: Ensayos UCS en profundidad para la Toba Andesítica.

En la **Imagen 5.11** se muestra la ubicación de las 90 probetas UCS ensayadas con sus valores en Mega pascales, los menores valores en colores más rojizos y los mayores valores representados por colores más cercanos a azul. Se observa la misma tendencia del **Gráfico 5.7**.

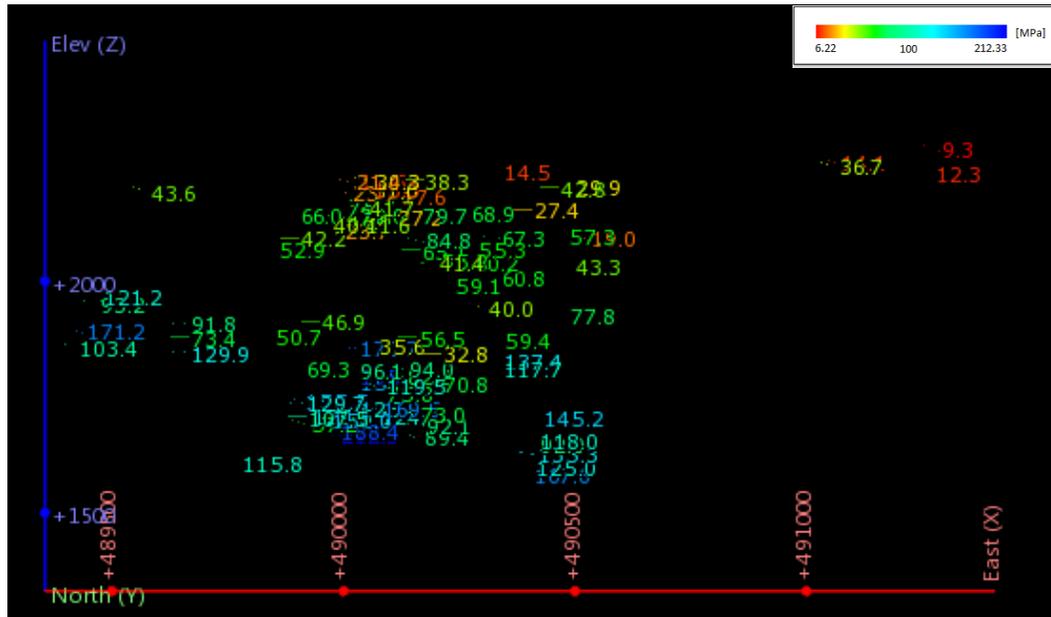


Imagen 5.11: Visualización de la distribución de los ensayos UCS, vista al Norte.

La variación de los resultados en los ensayos UCS con la profundidad se debe a distintos ambientes de enriquecimiento. El modelo entregado por AMSA y las fotografías de los sondajes permiten visualizar claramente este control. La **Imagen 5.12** corresponde a los resultados de los ensayos distribuidos en el espacio con el ambiente de enriquecimiento secundario modelado por AMSA, donde incluye zonas lixiviadas y con Óxidos, los menores valores UCS (con color rojo a amarillo verdoso) están ubicados dentro de esta zona.

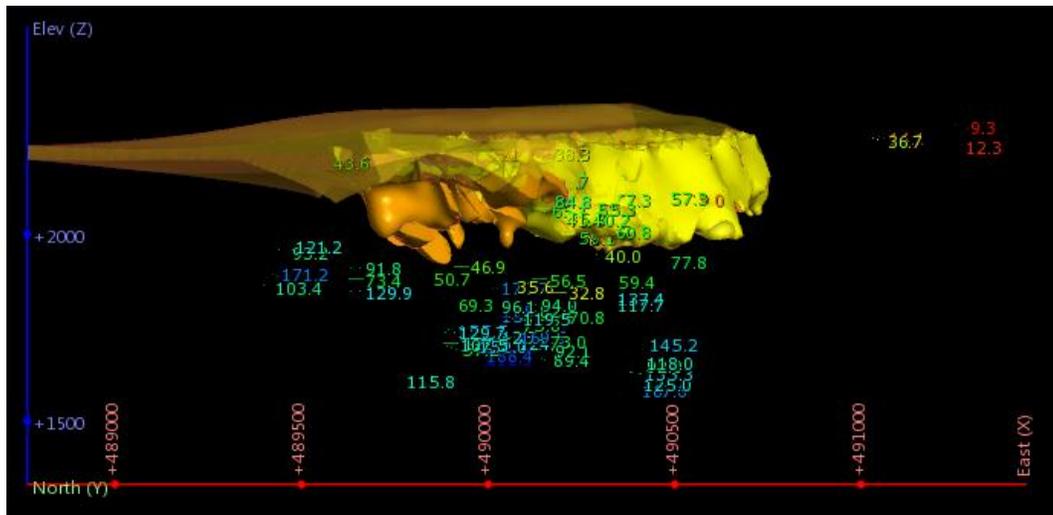


Imagen 5.12: Visualización de la distribución de los ensayos UCS con la zona de enriquecimiento secundario, vista al Norte.

Las **Foto 5.3** y **Foto 5.4** corresponden al sondaje GMC-20 a distintas profundidades, la primera se ubica alrededor de los 165 metros de profundidad en la zona de Óxidos verdes, la segunda fotografía pertenece a la zona primaria a los 350 metros.



Foto 5.3: Sondaje GMC-20, desde 188.96 hasta 193.50 m.



Foto 5.4: Sondaje GMC-20, desde 347.38 hasta 351.94 m.

La separación entre los ambientes primario y secundario se realizó cruzando la información de la Base de datos geología AMSA con la Base de datos de geotecnia en la sección de Zona Mineral. El ambiente Secundario incluye: Zona Óxidos Verdes, Óxidos Negros, Zona Lixiviada, Parcialmente Lixiviado, Minerales Mixtos y Secundario. El ambiente primario incluye las zonas: Primario con Bornita, Primario con Calcopirita, Primario con Pirita y Primario.

El **Gráfico 5.8** corresponde al histograma de frecuencias relativas de la resistencia a la compresión simple con los dos ambientes de enriquecimiento separados. Se observa la baja resistencia en el ambiente secundario con una media de 36.68 MPa y el ambiente primario una media de 93.22 MPa. (Tabla 5.3)

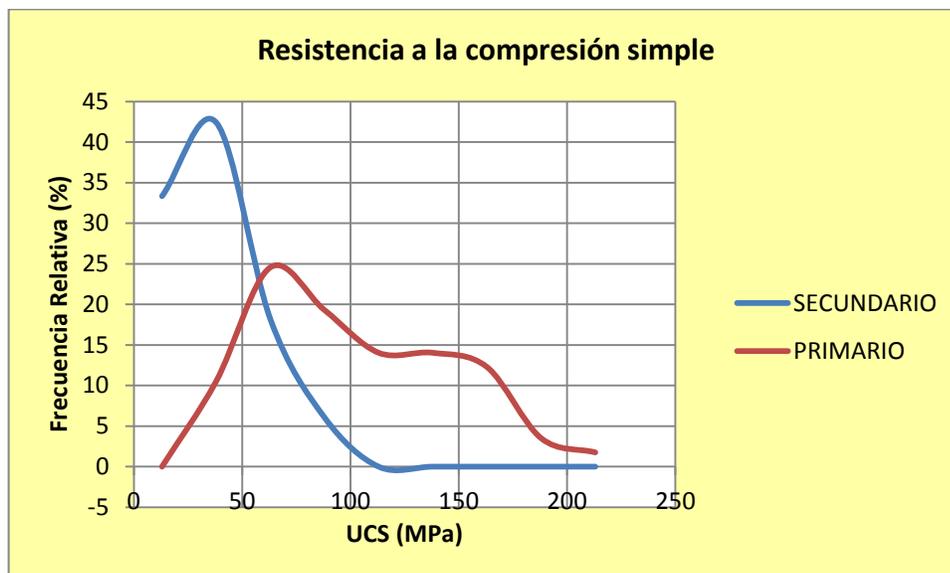


Gráfico 5.8: Histograma de Frecuencias Relativas ensayos UCS, diferenciando los ambientes de enriquecimiento.

Tabla 5.3: Estadística descriptiva de los ensayos UCS para la Toba Andesítica, diferenciando entre zonas de enriquecimiento.

	SECUNDARIO	PRIMARIO
Valid cases	33	57
Std. Deviation	20,6	45,2
Minimum	9,3	32,8
Maximum	79,7	212,3
25th percentile	20,2	59,8
Median	36,7	93,2
75th percentile	50,2	129,7

En el **Gráfico 5.9** se observa la estimación de la resistencia con el método del martillo. Se observa una leve diferencia entre los ambientes identificados. La zona Tectonizada se ha separado por el mismo criterio anterior, pero no se observa una diferencia entre la zona Tectonizada en el secundario y en el primario.

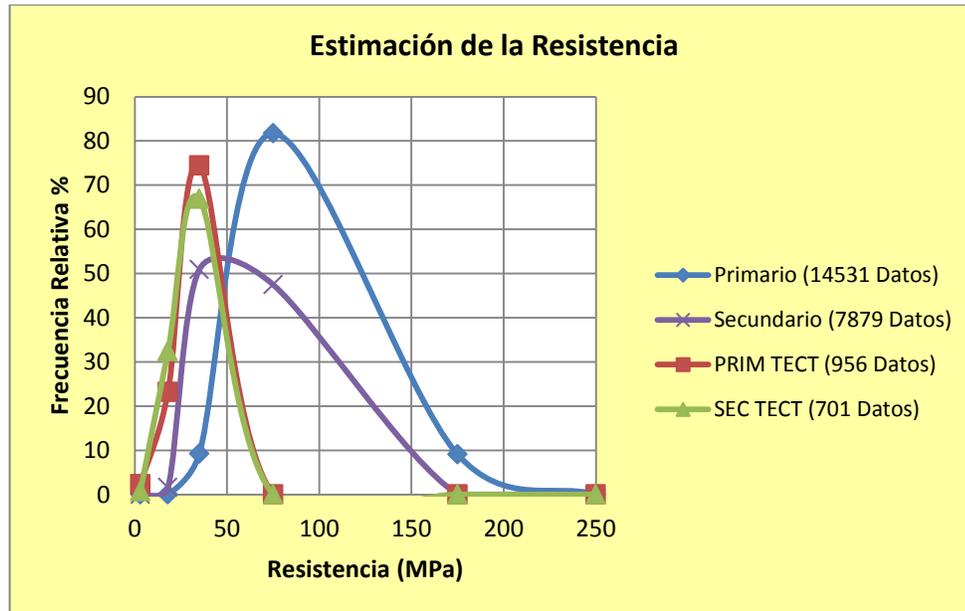


Gráfico 5.9: Histograma de Frecuencias Relativas de la estimación de la resistencia, diferenciando los ambientes de enriquecimiento.

El **Gráfico 5.10** muestra los resultados del RQD para las mismas 4 zonas del Gráfico anterior. Sólo se observa una diferencia entre las zonas tectonizadas y el macizo sin este daño intenso.

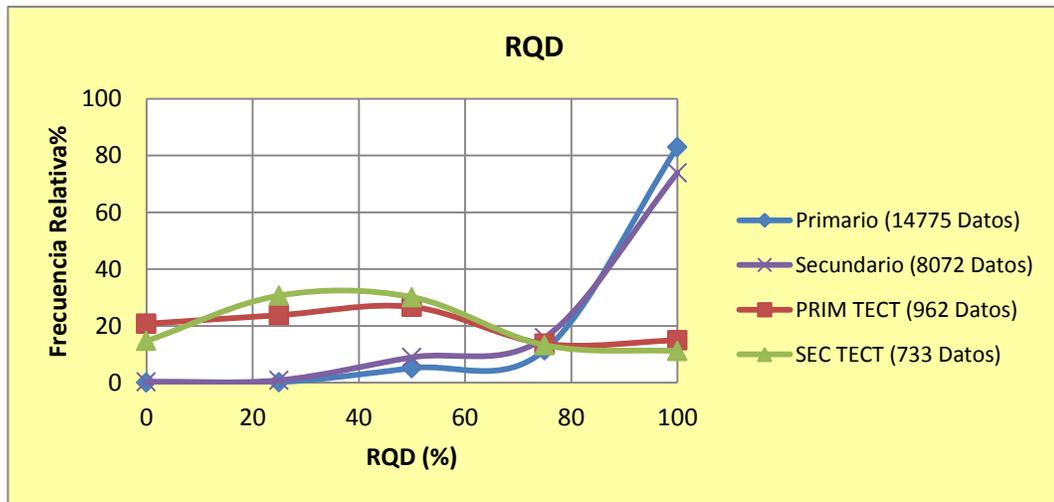


Gráfico 5.10: Histograma de Frecuencias Relativas para el parámetro RQD, diferenciando los ambientes de enriquecimiento.

El RMR muestra una relación similar a la del RQD, no hay una diferencia entre los dos ambientes de enriquecimiento. (Gráfico 5.11)

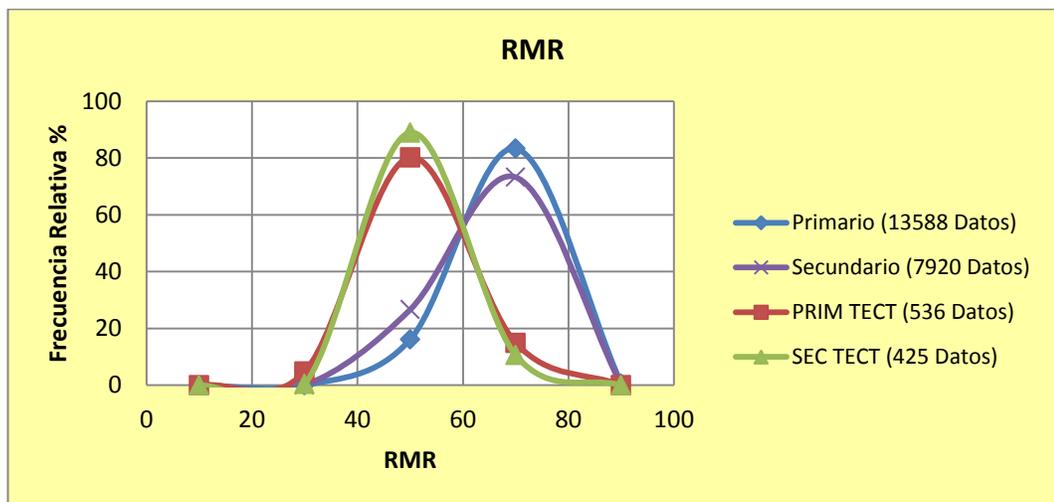


Gráfico 5.11: Histograma de Frecuencias Relativas para el parámetro RMR, diferenciando los ambientes de enriquecimiento.

En la Toba por lo tanto, el parámetro que tiene mayor influencia en la separación de unidades de lito-geotécnicas es la resistencia (Gráfico 5.1).

Una vez realizada la diferenciación dentro de la toba y el control geológico que lo define, se procede al modelamiento en el software Leapfrog, teniendo en consideraciones las limitaciones de la sección 5.1.

Pero en este caso hay una nueva limitación con respecto al modelamiento. La toba es intruida por el Pórfido Diorítico por lo que hay que comprobar que el control observado en la toba se observa en el intrusivo también. De este modo se modelaría los dos en conjunto para una mejor diferenciación entre los ambientes de enriquecimiento.

### 5.3.2 PORFIDO DIORITICO (PDRTC)

Se encuentra ubicado en el lado este del pit, intruyendo a la toba andesítica. En la **Imagen 5.13** se observa la ubicación del pórfido diorítico, en verde, con respecto a la toba en celeste. Muestra una alteración propilítica homogénea para todo el pórfido.

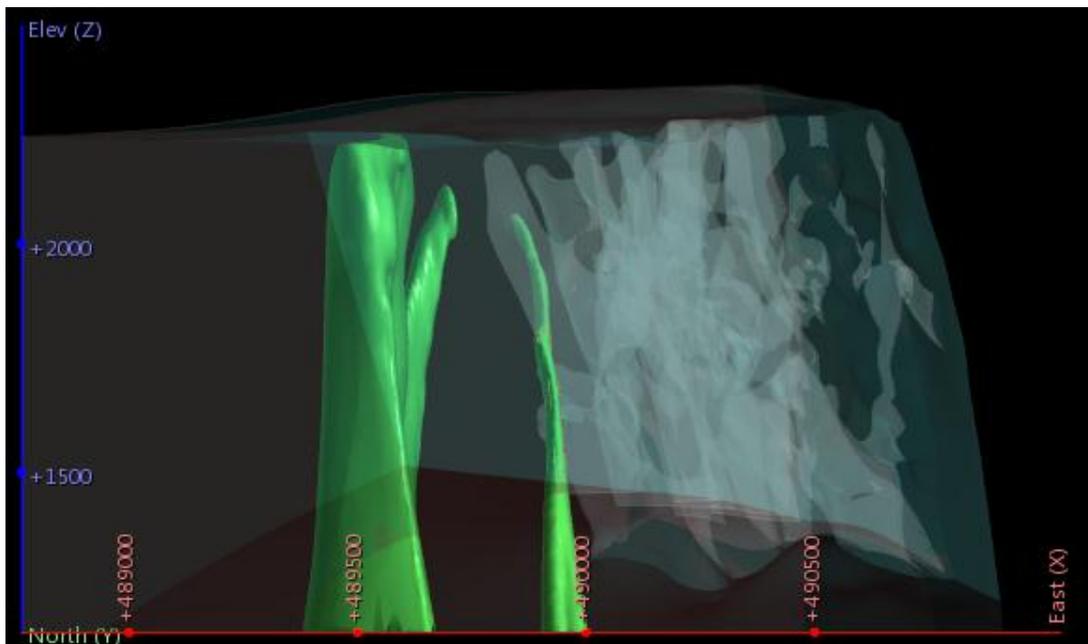


Imagen 5.13: Pórfido Diorítico en verde intruyendo a la Toba Andesítica en celeste.

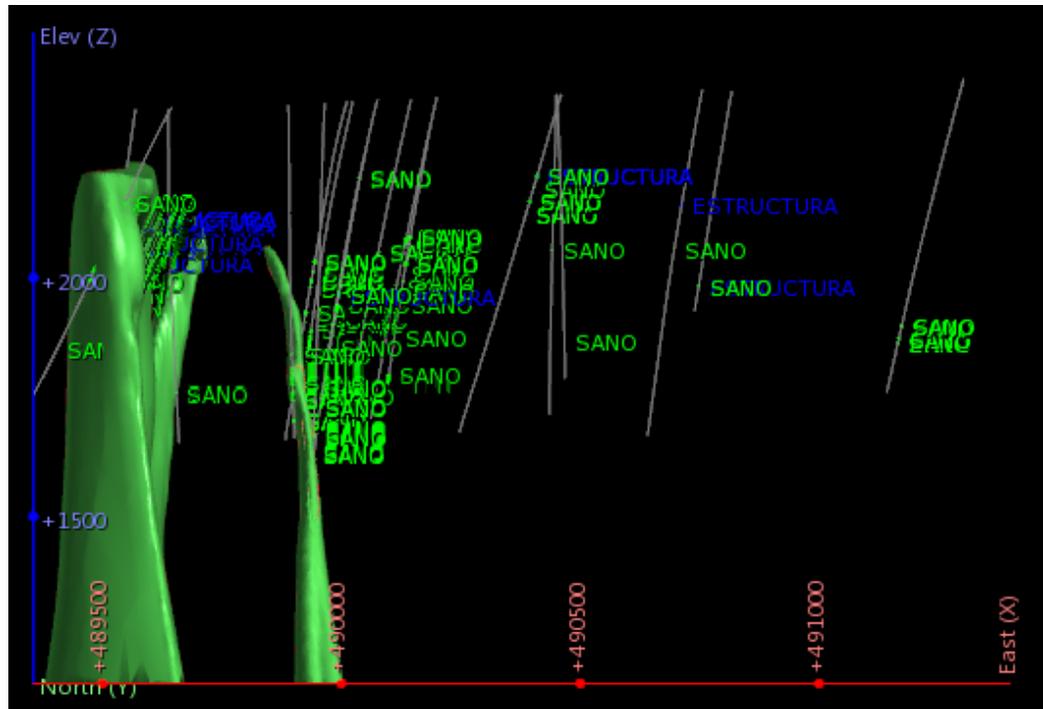
Para este pórfido se reconocen al igual que la toba, zonas de material dañado, que hacen que se observe grandes variaciones en los resultados de las variables de interés. La resistencia estimada por el método del martillo varía desde R1 R5 al igual que el RQD que tiene valores asociados a calidad Muy Mala a Muy Buena y el RMR desde la clase IV Mala a I Muy Buena. (Tabla 5.4)

Tabla 5.4: Estadística descriptiva para la estimación de la Resistencia (ISRM), RQD y RMR para el Pórfido Diorítico.

	RESISTENCIA	RQD	RMR
Valid cases	454	395	376
Std. Deviation	0,8	20,2	10,8
Minimum	1	0	40
Maximum	5	100	83
25th percentile	3	85	52
Median	4	96	67
75th percentile	4	100	69,75

En la **Imagen 5.14** se observa el sólido modelado por AMSA, los sondajes sólo contienen información perteneciente a este tipo de litología, 13 sondajes quedan fuera de este sólido modelado.

De las zonas reconocidas como material dañado, solo 3 corresponden a fallas interpretadas por AMSA, las otras 6 son zonas de fallas o con intenso fracturamiento, de las cuales se debe interpretar su continuidad.



**Imagen 5.14:** Información de sondajes diferenciando en zonas de material dañado, en azul y las zonas del macizo de mejor calidad en verde para el PDRTC.

Luego de separado el macizo, los valores de resistencia estimada se restringen de R2 a R5. Sin embargo, se considera aún un rango muy amplio.

Del mismo modo que la Toba Andesítica se identifica una zona más superficial con menores valores de resistencia estimada, que según el modelo de zona mineral entregada por AMSA corresponde al ambiente secundario. En fotografía, se observa claramente la diferencia entre el ambiente de enriquecimiento secundario y primario del Pórfido Diorítico.

Un ejemplo es el sondaje SGTF-03, alrededor de los 285 metros de profundidad se encuentra en ambiente de enriquecimiento secundario, en la **Foto 5.5** se observa el color anaranjado característico. A mayor profundidad, bajo la línea de sulfuros, se observa una roca grisácea, en ambiente primario (**Foto 5.6**).



Foto 5.5: Sondaje SGTF-03, desde 285.93 hasta 292.74.



Foto 5.6: Sondaje SGTF-03, desde 504.90 hasta 511.55.

En cuanto a los ensayos de compresión simple existen 6 probetas donde la ruptura fue por matriz, distribuida en los sondajes JVC-186 y JVC-237 (**Tabla 5.5**). Los valores varían desde 54.15 a 112.08 MPa, con una media de 89.74 MPa. (**Tabla 5.6**).

**Tabla 5.5: Ensayos UCS para el PDRT donde la ruptura fue por matriz.**

BHID	FROM	TO	LITOLÓGÍA	DIÁMETRO	ENSAYO	RUPTURA	UCS (MPa)
JVC-186	480,94	481,12	PDRTC	HQ	UCS	Matriz	73.78
JVC-186	496,68	496,88	PDRTC	HQ	UCS	Matriz	92.60
JVC-186	509,44	509,62	PDRTC	HQ	UCS	Matriz	108.67
JVC-186	524,19	524,39	PDRTC	HQ	UCS	Matriz	86.88
JVC-186	540,20	540,38	PDRTC	HQ	UCS	Matriz	112.08
JVC-237	362,71	362,85	PDRTC	HQ	UCS	Matriz	54.15

**Tabla 5.6: Estadística descriptiva de los ensayos UCS para el PDRTC.**

Valid cases	6
Std. Deviation	21,80
Minimum	54,15
Maximum	112,08
25th percentile	68,87
Median	89,74
75th percentile	109,52

Especialmente todas las probetas se encuentran ubicadas en la zona de enriquecimiento primario, (la menor profundidad es a los 362 metros). Para el ambiente secundario no se tienen datos de compresión simple.

La media que se obtuvo para el ambiente primario de la Toba (**Tabla 5.3**) es de 93.22 MPa, valor consistente para el ambiente primario del Pórfido Diorítico.

Como el pórfido presenta sólo una alteración y no se tiene registro claro de intensidades de alteraciones anormales para explicar la variación de los datos, se revisa si los datos tienen el mismo comportamiento que la Toba Andesítica. Para esto se sigue el mismo procedimiento de hacer un cruce de la Base de datos AMSA con la base de datos de geotecnia y ver si se observan diferencias entre ambos ambientes.

Para el caso del Pórfido, el ambiente primario contiene zonas con calcopirita y piritita, mientras que el secundario tiene una minoría de Óxidos Verdes y el resto consiste en Zonas Lixiviadas y Parcialmente Lixiviadas.

El **Gráfico 5.12** muestra la diferencia entre las dos zonas de enriquecimiento y las zonas dañadas del macizo en cuanto a la estimación de la resistencia.

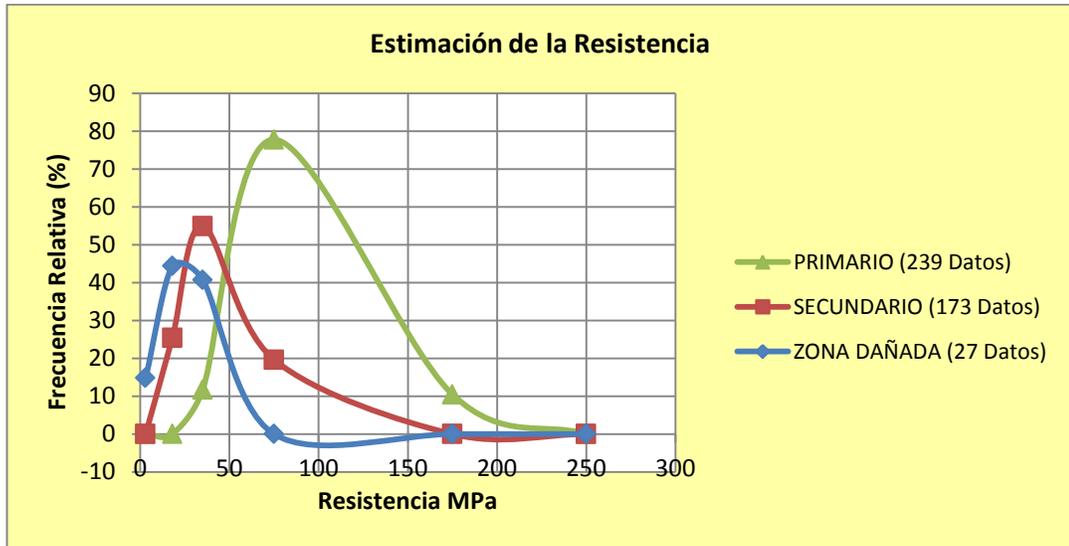


Gráfico 5.12: Histograma de frecuencias relativas para la estimación de la resistencia para el PDRTC.

El RQD muestra diferencias entre las 3 zonas identificadas, un ambiente primario con un bajo fracturamiento evidenciado por los altos valores de RQD, la zona dañada muy fracturada y la zona de enriquecimiento secundario desde una calidad “Mala” a “Muy Buena”. (**Gráfico 5.13**)

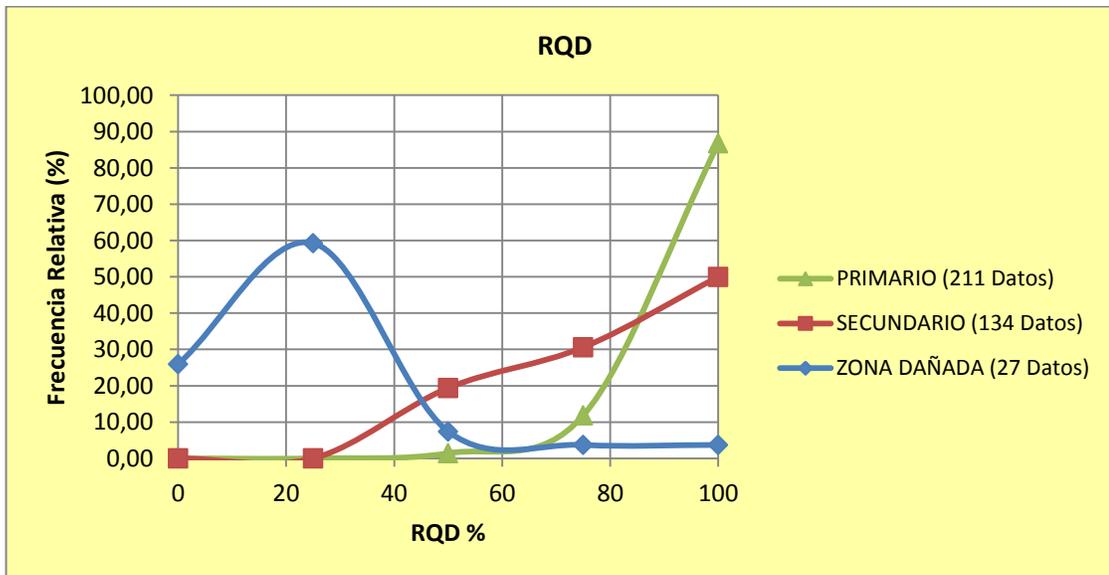


Gráfico 5.13: Histograma de frecuencias relativas del parámetro RQD para el PDRTC.

La diferencia para el RMR en el **Gráfico 5.14** es clara, se espera una zona de alto fracturamiento y una baja resistencia con un RMR bajo, centrando la media en la clase III Regular a Mala, y la zona primaria con altos valores de RMR de la clase II “Buena”.

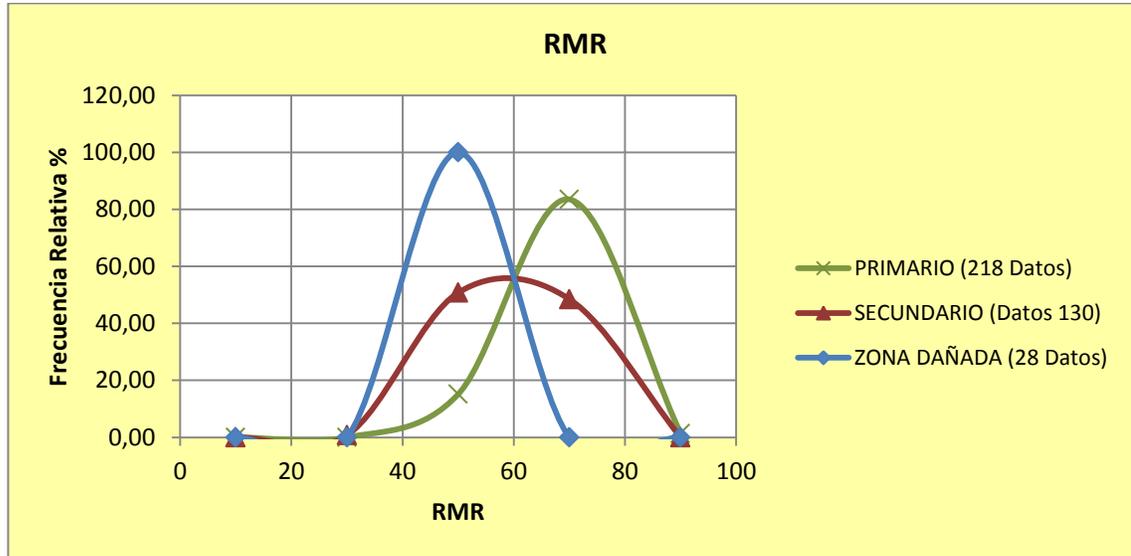


Gráfico 5.14: Histograma de frecuencias relativas del parámetro RMR para el PDRTC.

### Modelamiento de Toba Andesítica y Pórfido Diorítico

La información ya diferenciada entre ambientes para las dos litologías (En **Anexo 3**) se carga el archivo csv en el programa Leapfrog, la **Imagen 5.15** muestra en rojo la zona de enriquecimiento secundario para las dos litologías y en celeste la zona primaria.

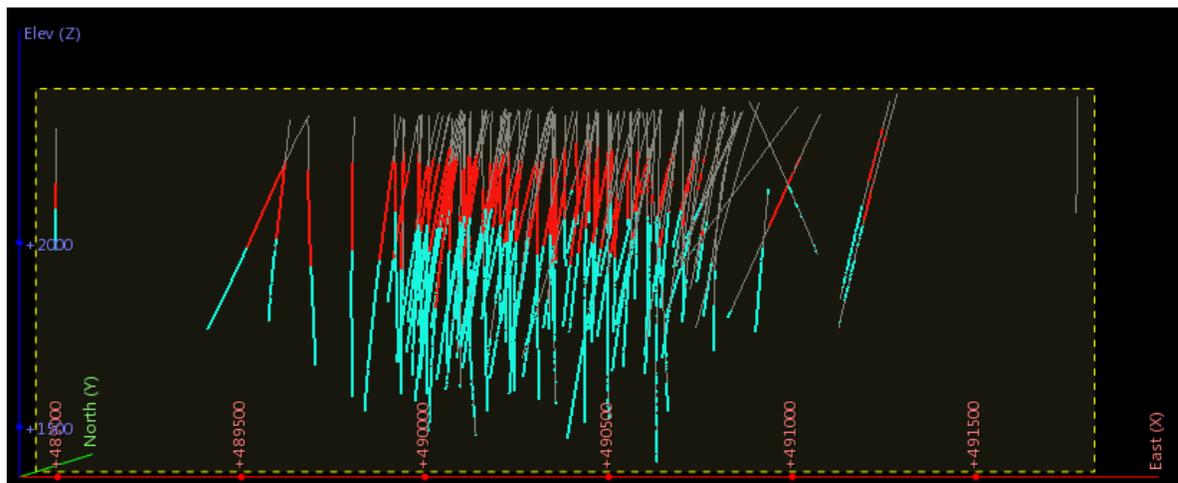


Imagen 5.15: Perfil WE, información de sondajes para las zonas de enriquecimiento, rojo secundario y celeste primario.

Con la función “Extract Volume Point” del programa Leapfrog, se visualiza la cercanía entre los dominios. En la **Imagen 5.16**, la zona de enriquecimiento secundario es representada por los puntos de color rojo, la línea semi horizontal verde que se observa son los puntos de contacto con la zona primaria, a medida que se aleja de este contacto el color se va haciendo más azul, ya que el programa realiza una interpolación de la distancia en el dominio, es decir, la zona azul es la zona primaria.

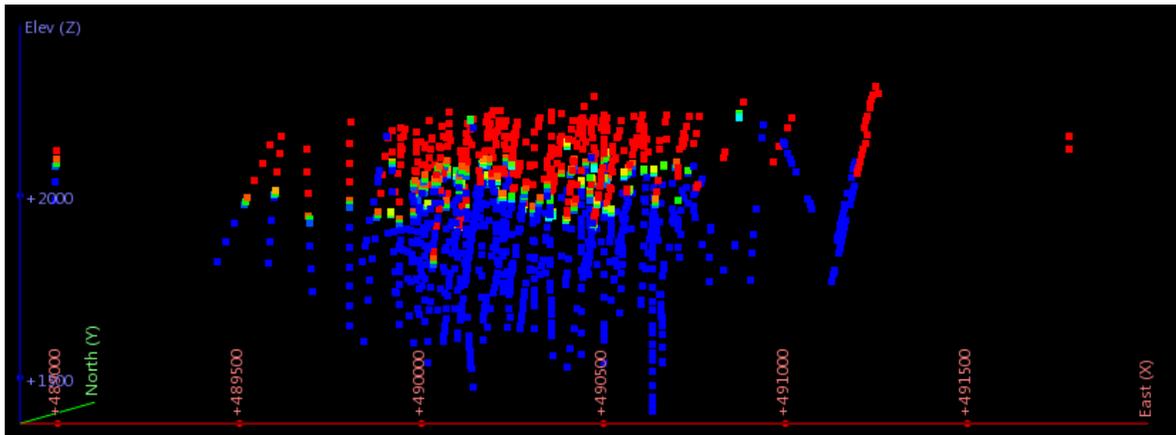


Imagen 5.16: Volume Point de las zonas de enriquecimiento.

Para la construcción del sólido se debe ingresar una dirección preferencial representada por un plano, de acuerdo al comportamiento espacial de las variables que en el caso de la Toba Andesítica y el Pórfido Diorítico es horizontal.

La **Imagen 5.17** muestra la superficie de contacto modelada entre las dos zonas de enriquecimiento. A partir de ella se generan los 4 sólidos que representan las dos litologías con sus dos Unidades Lito-Geotécnicas. Se observa en la imagen que hay datos que han quedado fuera de la superficie, ya que como se mencionó en la sección 5.1 en las limitaciones del modelamiento, los sólidos generados son restringidos a los modelados por la empresa AMSA.

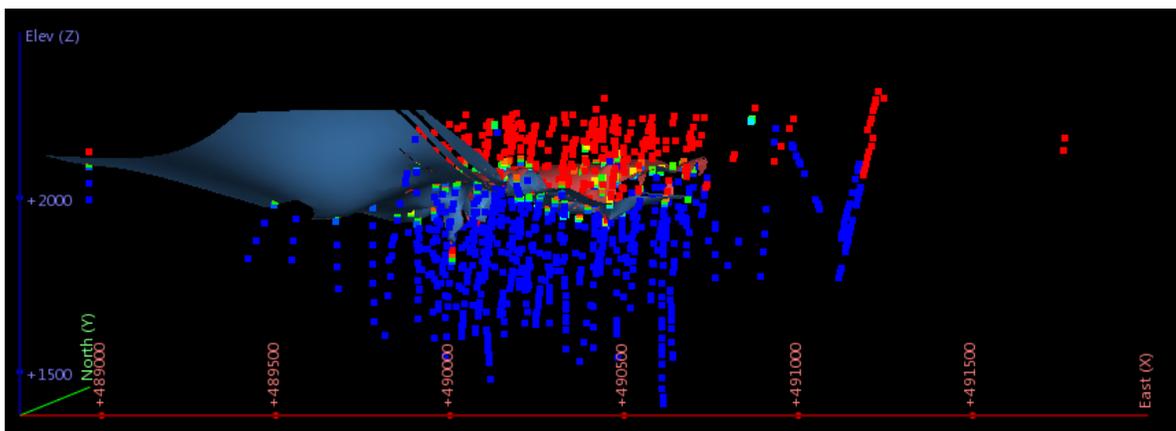
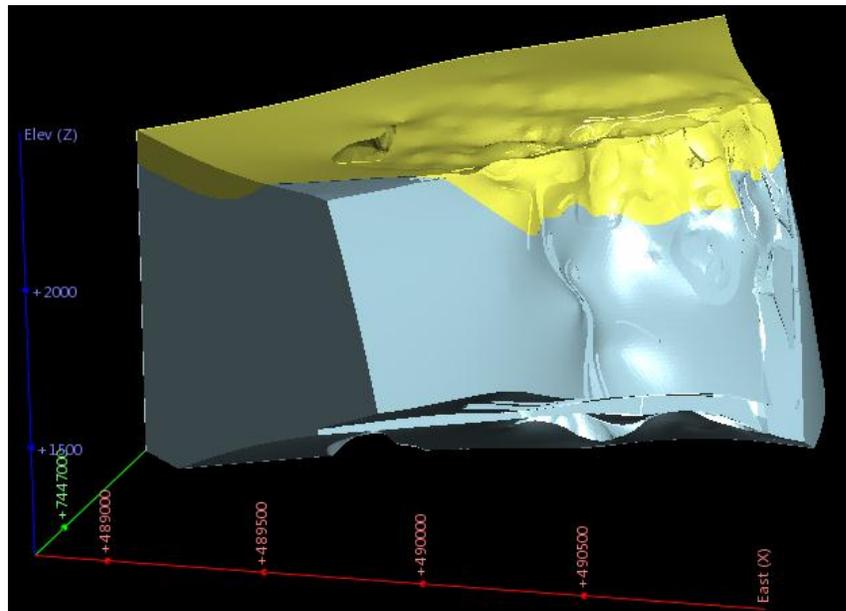
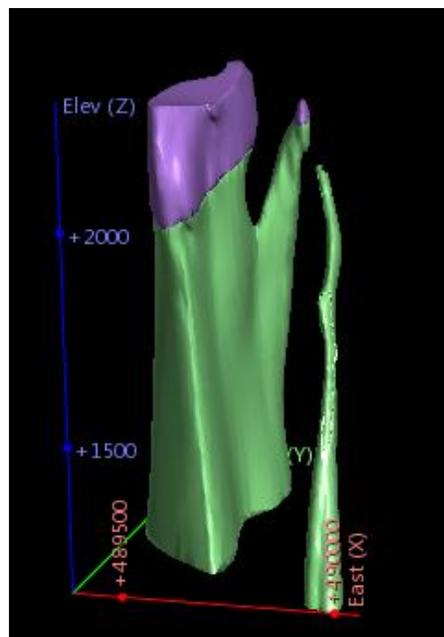


Imagen 5.17: Superficie generada a partir de los Volume Point.

Los sólidos generados se muestran en la **Imagen 5.18** (Unidades Lito-Geotécnicas de la Toba Andesítica) e **Imagen 5.19** (Unidades Lito-Geotécnicas del Pórfido Diorítico).



**Imagen 5.18:** TUFAN en ambiente secundario en amarillo, TUFAN en ambiente primario en celeste.



**Imagen 5.19:** PDRTC en ambiente secundario en violeta, PDRTC en ambiente primario en verde.

En el capítulo 6 se muestra una tabla resumen con los rangos de los parámetros geotécnicos de cada Lito-alteración.

### 5.3.3 DIATREMA (DIA)

La Diatrema se orienta NE-SW y es cortada por la Falla Roja, En la **Imagen 5.20**, se presenta con el color amarillo, además se observa litologías como la Brecha de Turmalina en Café y Pórfido Riodacítico en azul. Por el Oeste limita con la Falla contacto Noreste en fucsia.

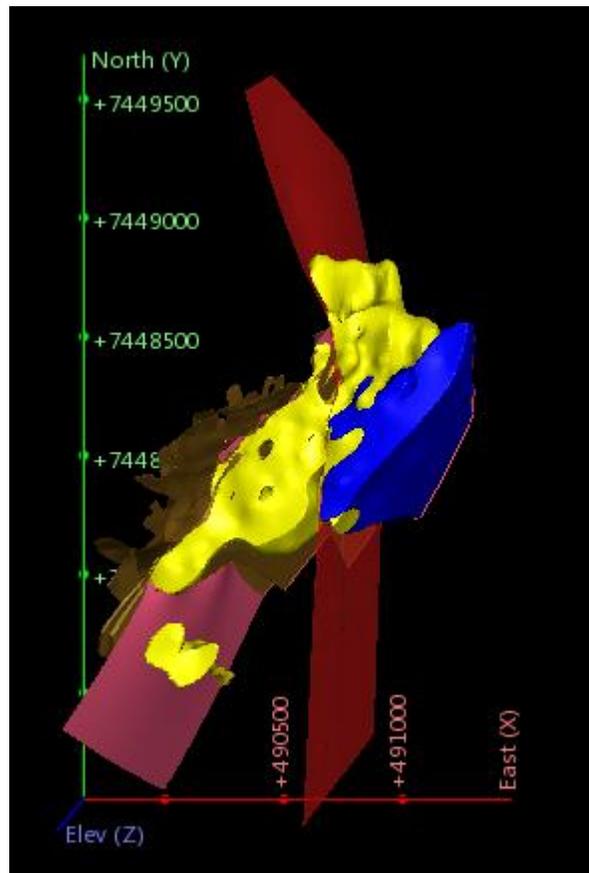


Imagen 5.20: Diatrema en amarillo, Brecha de Turmalina en Café, Pórfido Riodacítico en azul, Falla contacto Noreste en fucsia y Falla Roja en Rojo.

Según la metodología de la sección 4.2 se identifican las zonas con mayor daño estructural, estas son excluidas en el análisis de la diferenciación de las Unidades Lito-Geotécnicas.

Según la Base de datos entregada por AMSA, la Diatrema presenta alteración argílica y sericítica, pero no hay una diferenciación espacial de éstas, es decir toda la Diatrema está modelada con las dos alteraciones.

La **Tabla 5.7** muestra la variabilidad de los datos para los parámetros geotécnicos de interés, Estimación de la resistencia, Resistencia UCS, RQD y RMR

**Tabla 5.7: Estadística descriptiva para los ensayos UCS, estimación de la Resistencia, RQD y RMR.**

	RESISTENCIA	UCS	RQD	RMR
Valid cases	3748	41	3794	2460
Std. Deviation	0,7	25,9	10,5	9,1
Minimum	1	7,14	10	38
Maximum	6	121,6	100	87
25th percentile	3	13,1	96	61
Median	3	25,5	100	67
75th percentile	3	48,4	100	71

Se observa una gran diferencia entre los mínimos y máximos valores de los 4 parámetros geotécnicos, en especial la resistencia tanto estimada como medida con ensayos UCS, va desde desde “Roca Blanda” a “Roca Muy Dura”.

Al revisar los tramos de los sondajes de la selección de probetas se observa una cierta relación.

El sondaje SG-05A, en el metro 407,59 y SG-05B en el metro 382,82 muestran bajos valores de UCS: 7,14 MPa y 11,21 MPa respectivamente. (**Foto 5.3.7 y Foto 5.3.8**).



**Foto 5.3.7: Sondaje SG-05A en el metro 407,59.**



Foto 5.3.8: Sondaje SG-05B en el metro 382.82.

El sondaje JVC-262 a los 235.5 metros se le asocia un UCS de 41.71 MPa. (Foto 5.3.9).



Foto 5.3.9: Sondaje JVC-262 en el metro 235.5.

La Diatrema de los sondajes SG-05A y SG-05B se observa un color más rojizo que la del sondaje JVC-262 la que se caracteriza por tener una matriz más oscura.

La **Figura 5.21** corresponde a una vista en planta donde se muestra la distribución espacial de las probetas UCS ensayadas. Como referencia, la ubicación de la Diatrema en amarillo, la Brecha de Turmalina en café y la Falla Roja en rojo.

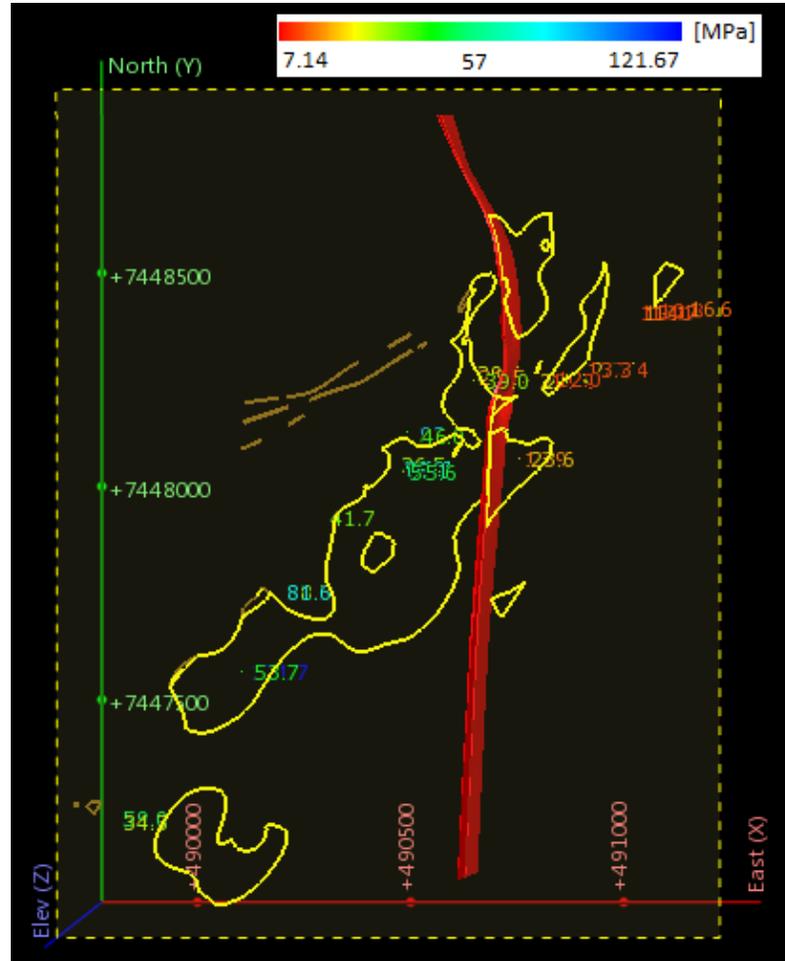


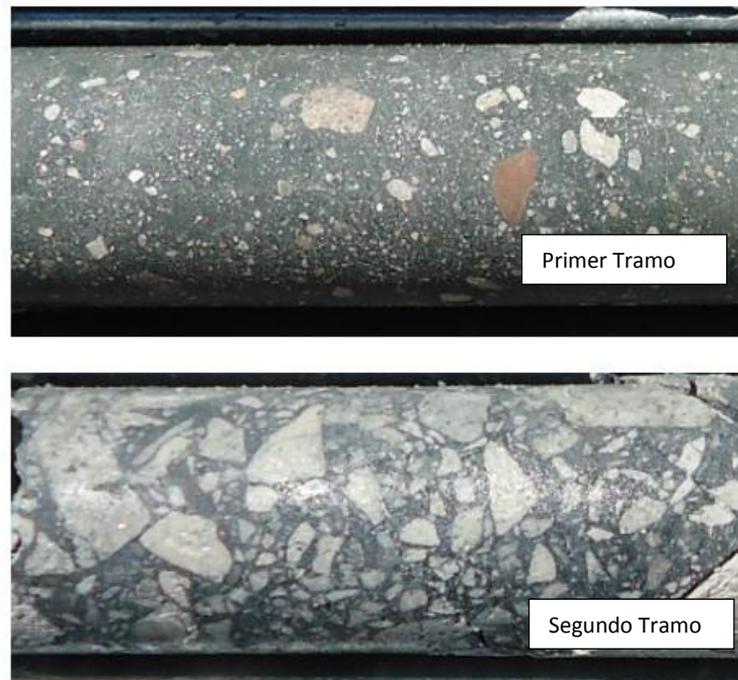
Imagen 5.21: Ubicación espacial de probetas UCS ensayadas de la Diatrema

Los menores valores (en la imagen colores rojizos) se ubican en las cercanías de la Falla Roja, y como se mencionó en la sección 2.2.4, la característica principal de esta falla es la alteración argílica, por lo que se infiere que esta baja resistencia observada se debe a que la Diatrema cercana a la Falla Roja se encuentra argilizada.

Al observar las fotografías en los tramos en donde hay probetas de laboratorio con valores de resistencia mayores a 50 MPa y su ubicación en el espacio, hay dos características que las relaciona:

- *La matriz es color grisáceo*
- *Se ubican espacialmente lejos de la Falla roja*

La cercanía con la brecha de turmalina y la característica que ambos pertenezcan a los últimos eventos post-mineralización del yacimiento, da pie a buscar la relación entre ambas. La **Foto 5.3.10** pertenece al sondaje JVC-287 a dos profundidades distintas, este fue revisado en una de las visitas al proyecto. El primer tramo del sondaje corresponde a la Diatrema a los 405 metros de profundidad, y el segundo a la Brecha de Turmalina a los 349.8 metros, ambas presentan alteración sericítica. La distancia entre los dos tramos es de 50 metros aproximadamente.



**Foto 5.3.10:** Primer tramo corresponde a 405 m de profundidad y el segundo a los 349.8 m.

Se identificó que la Diatrema en este lugar es más competente, más resistente y con menos fracturas que la Diatrema ubicada cerca de la Falla roja.

Se infiere entonces que esta litología se ve diferenciada por dos controles:

- *La turmalina entra en la matriz de la Diatrema, mejorando la calidad de la roca.*
- *La Falla Roja la argiliza intensamente, empeorando su calidad.*

La diferenciación espacial de estos factores que controlan la calidad de la roca se realiza ubicando espacialmente los valores de Resistencia, RQD, RMR y revisando las fotografías de los sondajes. Nuevamente el parámetro geotécnico que mejor describe los controles es la resistencia. El factor más importante en la revisión fotográfica es el color de la roca que está relacionada con la intensidad de alteración presente; la Diatrema intensamente argilizada es de color rojizo y la Diatrema con sericita es grisácea. En los casos que hubo dudas se realizó una visita a terreno a chequear la información con geólogos de AMSA.

La Diatrema por tanto se divide en dos Unidades Lito-Geotécnicas:

- Diatrema Argilizada
- Diatrema con turmalina (en la matriz)

La **Tabla 5.8** muestra los 41 ensayos realizados para esta litología, además se incluye una columna donde se identifica a qué lito-alteración pertenece.

**Tabla 5.8: Ensayos UCS diferenciados por Lito-alteración en la Diatrema.**

BHID	FROM	TO	UCS	LITO-ATERACION
EL-2	160,57	160,71	23,59	DIA ARGILIZADA
EL-2	209,34	209,48	16,90	DIA ARGILIZADA
JVC-228	138,67	138,85	81,62	DIA CON TURMALINA
JVC-228	142,37	142,51	38,21	DIA CON TURMALINA
JVC-237	118,06	118,20	25,49	DIA CON TURMALINA
JVC-237	161,04	161,18	53,69	DIA CON TURMALINA
JVC-237	176,50	176,64	121,67	DIA CON TURMALINA
JVC-262	235,15	235,29	41,71	DIA CON TURMALINA
JVC-273	148,66	148,80	39,03	DIA CON TURMALINA
JVC-273	209,45	209,59	21,54	DIA CON TURMALINA
JVC-273	240,54	240,68	30,58	DIA CON TURMALINA
JVC-274	153,52	153,66	55,64	DIA CON TURMALINA
JVC-274	168,51	168,66	68,09	DIA CON TURMALINA
JVC-274	199,00	199,15	66,05	DIA CON TURMALINA
JVC-274	212,65	212,79	75,73	DIA CON TURMALINA
JVC-274	265,20	265,34	36,49	DIA CON TURMALINA
JVC-281	206,50	206,66	45,97	DIA CON TURMALINA
JVC-281	237,32	237,48	92,62	DIA CON TURMALINA
JVC-281	248,09	248,23	50,98	DIA CON TURMALINA
SG-05A	329,95	330,14	13,29	DIA ARGILIZADA
SG-05A	342,69	342,88	12,83	DIA ARGILIZADA
SG-05A	347,51	347,68	23,69	DIA ARGILIZADA
SG-05A	348,22	348,41	27,83	DIA ARGILIZADA
SG-05A	351,34	351,53	24,87	DIA ARGILIZADA
SG-05A	353,27	353,46	38,75	DIA ARGILIZADA
SG-05A	404,51	404,69	12,41	DIA ARGILIZADA
SG-05A	407,59	407,78	7,14	DIA ARGILIZADA
SG-05A	414,85	415,03	7,94	DIA ARGILIZADA
SG-05B	360,30	360,50	12,01	DIA ARGILIZADA
SG-05B	382,82	383,02	11,21	DIA ARGILIZADA
SG-05B	401,65	401,85	28,75	DIA ARGILIZADA
SG-05B	425,25	425,45	24,69	DIA ARGILIZADA
SG-05B	426,60	426,80	11,22	DIA ARGILIZADA
SGTF-01	278,31	278,45	34,32	DIA CON TURMALINA
SGTF-01	296,62	296,76	59,01	DIA CON TURMALINA
SGTF-16	286,86	287,00	16,58	DIA ARGILIZADA
SGTF-16	511,33	511,44	10,82	DIA ARGILIZADA
SGTF-16	557,21	557,32	14,74	DIA ARGILIZADA
SGTF-16	589,72	589,83	12,12	DIA ARGILIZADA
SGTF-16	629,00	629,11	19,06	DIA ARGILIZADA
SGTF-16	661,19	661,30	11,43	DIA ARGILIZADA

De la Tabla anterior, se realiza un histograma de frecuencias relativas que compara las resistencias (Ver **Gráfico 5.16**).

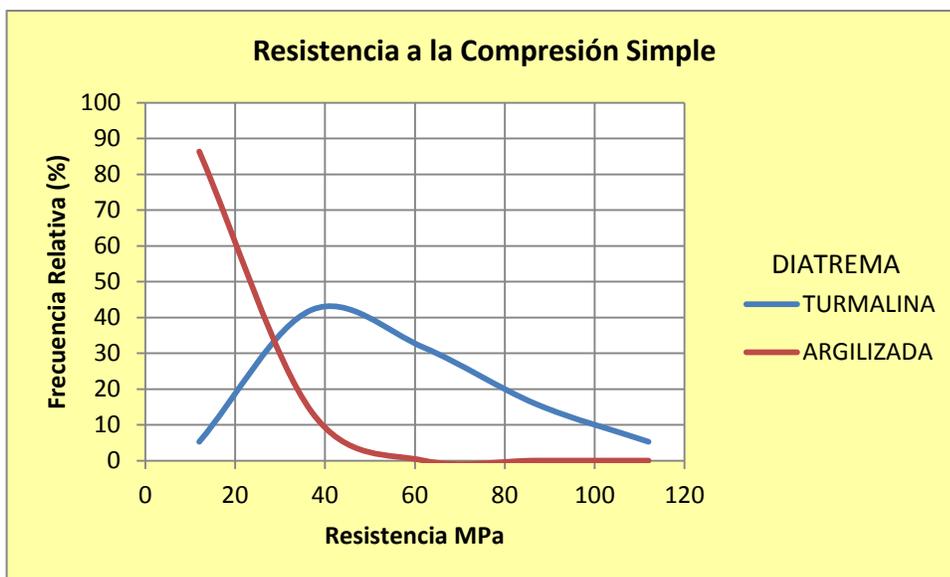


Gráfico 5.15: Histograma de frecuencia de la Resistencia a la compresión simple distinguiendo entre Unidades Lito-Geotécnicas.

La media, valores máximos y mínimos del histograma del **Gráfico 5.16**, se muestran en la **Tabla 5.9**, la diferencia observada en el valor máximo de cada uno se comprueba con la siguiente tabla, el máximo de la Diatrema argilizada es de 38.7 MPa y el de la con turmalina es de 121.7 MPa.

Tabla 5.9: Estadística descriptiva de la Resistencia a la compresión simple distinguiendo entre Unidades Lito-Geotécnicas.

	DIATREMA	
	ARGILIZADA	TURMALINA
Valid cases	22	19
Std. Deviation	8,1	25,2
Minimum	7,1	21,5
Maximum	38,7	121,7
25th percentile	11,4	36,5
Median	14	51
75th percentile	23,9	68,1

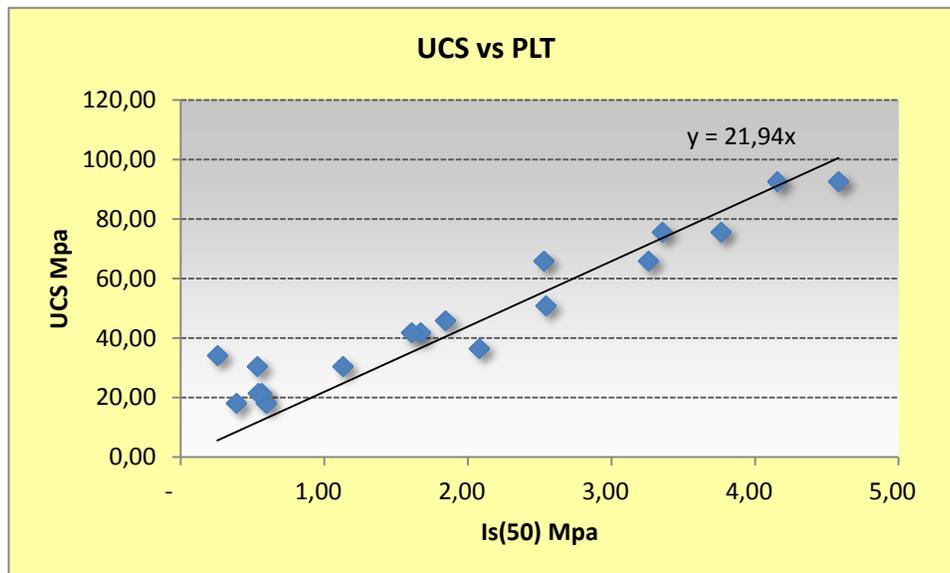
Los menores valores UCS de la Diatrema con turmalina están en el sondaje JVC-273, con una resistencia de 21.54, 30.6 y 39 MPa, estos son las probetas más cercanas a la Falla Roja, pero con una alteración sericítica dominante frente a la argílica.

Solo para la Diatrema controlada por turmalina es posible calcular el factor de correlación entre probetas UCS y PLT ya que se cuenta con la suficiente cantidad de datos que se pueden asociar, estos se muestran en la **Tabla 5.3.10**.

**Tabla 5.3.10: Resultados ensayos UCS, controlados por turmalina.**

SONDAJE	DIAMETRO	UCS (MPA)	RUPTURA	AT	SONDAJE	DIAMETRO	Is <sub>(50)</sub>	RUPTURA	AT
JVC-262	HQ	41,71	M	235,15	JVC-262	HQ	1,67	M	234,95
JVC-263	HQ	41,71	M	235,15	JVC-262	HQ	1,61	M	235,45
JVC-273	HQ	18,22	M	191,51	JVC-273	HQ	0,60	M	191,45
JVC-273	HQ	18,22	M	191,51	JVC-273	HQ	0,39	M	191,72
JVC-273	HQ	21,54	M	209,45	JVC-273	HQ	0,56	M	209,23
JVC-273	HQ	21,54	M	209,45	JVC-273	HQ	0,54	M	209,59
JVC-273	HQ	30,58	M	240,54	JVC-273	HQ	1,13	M	240,39
JVC-273	HQ	30,58	M	240,54	JVC-273	HQ	0,53	M	240,78
JVC-274	HQ	68,09	M	168,51	JVC-274	HQ	4,67	M	168,45
JVC-274	HQ	68,09	M	168,51	JVC-274	HQ	6,04	M	168,66
JVC-274	HQ	66,05	M	199,00	JVC-274	HQ	2,53	M	198,62
JVC-274	HQ	66,05	M	199,00	JVC-274	HQ	3,26	M	199,25
JVC-274	HQ	75,73	M	212,65	JVC-274	HQ	3,35	M	212,58
JVC-274	HQ	75,73	M	212,65	JVC-274	HQ	3,76	M	213,02
JVC-274	HQ	36,49	M	265,20	JVC-274	HQ	3,21	M	265,13
JVC-274	HQ	36,49	M	265,20	JVC-274	HQ	2,08	M	265,34
JVC-281	HQ	45,97	M	206,50	JVC-281	HQ	1,84	M	206,66
JVC-281	HQ	92,62	M	237,32	JVC-281	HQ	4,15	M	237,26
JVC-281	HQ	92,62	M	237,32	JVC-281	HQ	4,58	M	237,48
JVC-281	HQ	50,98	M	248,09	JVC-281	HQ	2,54	M	248,00

Cada par de datos es representado en un diagrama de dispersión (**Gráfico 5.17**), en el que se observa una tendencia lineal entre los datos. El factor K corresponde a la pendiente de la recta, donde la correlación es:  $UCS = 21,94 I_{s(50)}$



**Gráfico 5.16: Correlación entre UCS y PLT para la Diatrema con turmalina.**

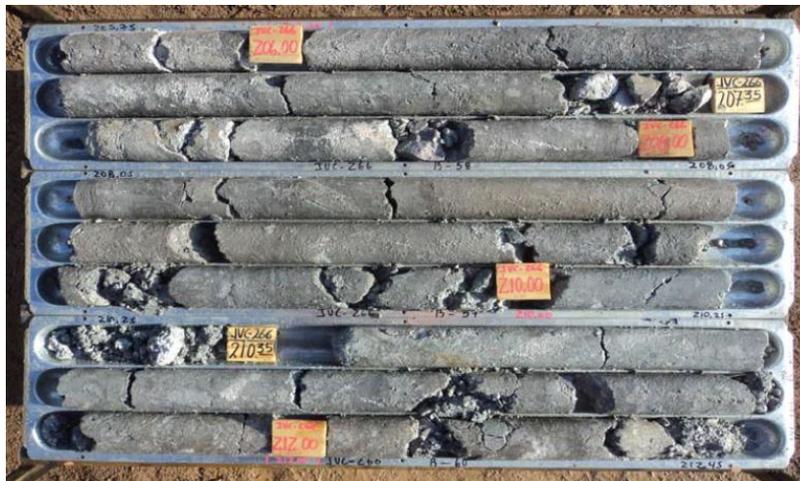
Para esta alteración, existen 173 ensayos PLT, repartidos en 10 sondajes, en la **Tabla 5.3.11** (ver **Anexo 4**) se realiza la conversión a Resistencia a la compresión simple en Mega Pascales, que se obtuvo multiplicando el  $I_s(50)$  de cada PLT por el factor de correlación hallado en el **Gráfico 5.17**, donde se obtiene una resistencia a la compresión simple que se llamará UCS\*.

Los valores obtenidos son bastante variables, el mínimo es de 1.97 MPa y el máximo es de 181.66 MPa (**Tabla 5.3.12**).

**Tabla: 5.3.11: Estadística descriptiva de la Resistencia UCS\* para la Diatrema con turmalina**

Valid cases	173
Std. Deviation	26,89
Minimum	1,97
Maximum	181,66
25th percentile	17,11
Median	32,03
75th percentile	43,01

Este valor máximo es bastante mayor que el obtenido de los ensayos de laboratorio UCS (121,67 MPa). La **Foto 5.3.11** muestra el sondaje JVC-266 a los 209.23 metros de profundidad, en ella se observa que se encuentra bastante alterada, además se ubica relativamente cerca de la Falla roja.



Los menores valores de la **Tabla 5.3.11** son bastante continuos, no hay un valor que se escape como lo fue los 181.66 MPa, además son bastante bajos (pertenecientes a un R1 Roca Muy Blanda, menor a 5 MPa). El menor valor obtenido de los ensayos UCS para esta lito-alteración fue de 21.5 MPa por lo que se descartarán los valores de UCS\* menores a este valor, correspondientes a 55 datos. La **Tabla 5.3.14** muestra la nueva media en los datos, además se incluye los valores de los ensayos UCS.

**Tabla: 5.3.13: Estadística Descriptiva de ensayos UCS y UCS\*.**

Valid cases	134
Std. Deviation	25,2
Minimum	21,5
Maximum	181,6
25th percentile	32
Median	39,6
75th percentile	56,5

## MODELAMIENTO DE LAS UNIDADES LITO-GEOTÉCNICAS

Ya identificados los factores que controlan los parámetros geotécnicos de la Diatrema, y reconocidos los sondajes y metrajes que marcan el límite entre ambos dominios, se carga el archivo csv en el programa Leapfrog.

La construcción de los sólidos se realiza de la misma forma que el modelamiento de las litologías del ejemplo anterior. La dirección preferencial de las variables que se entrega al programa para analizar el comportamiento espacial de los datos es paralelo a la Falla roja, por tratarse del factor con mayor influencia dentro de la Diatrema.

La **Imagen 5.22** muestra los “Volume Point” extraídos del .csv entregado con los dominios. Los puntos rojos corresponden a la Diatrema argilizada mientras que la Diatrema con turmalina en la matriz está representada por los puntos en color azul. Se realiza un zoom para mostrar cómo calcula el programa la distancia al contacto más cercano dentro del dominio entregado.

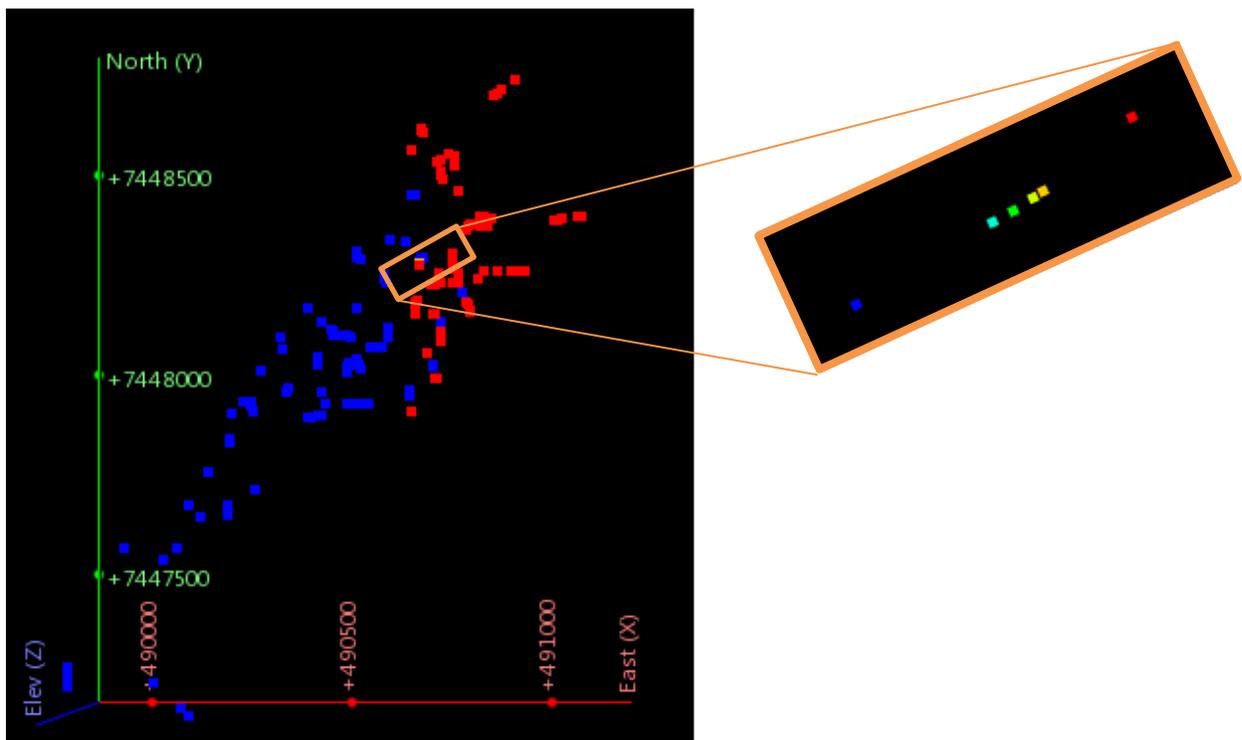
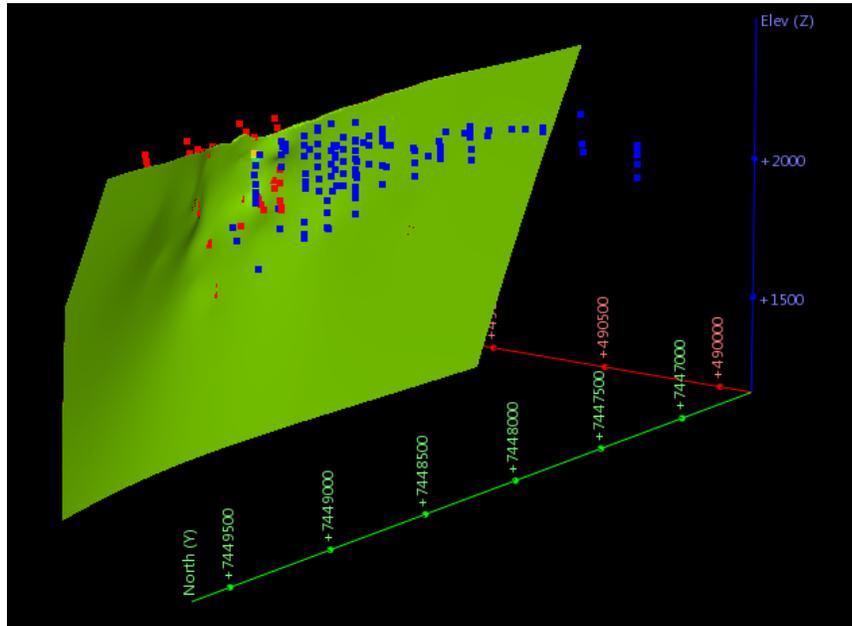


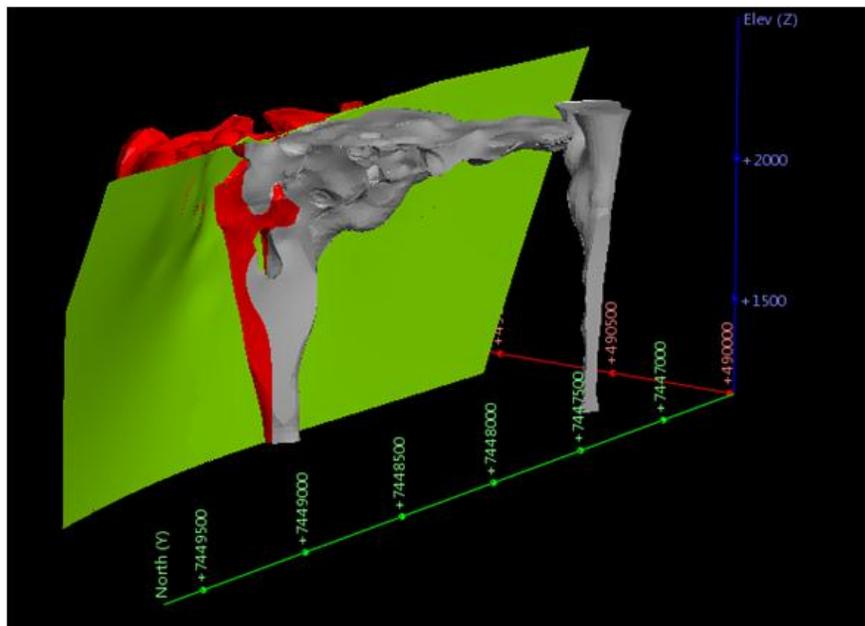
Imagen 5.22: Volume Point de las Unidades Lito-Geotécnicas de la Diatrema.

En la **Imagen 5.23** se observa la posición de la Falla roja respecto de los “Volumen Point”, se h cambiado el color de la Falla Roja de roja a verde para diferenciar la falla de los “Volumen Point”.



**Imagen 5.23:** Volume Point de las Unidades Lito-Geotécnicas de la Diatrema con la Falla Roja.

El programa realiza una interpolación de los datos, creando una superficie de distancia cero entre los puntos como limite entre ambos dominios. Como se mencionó en la sección 5.1, limitaciones del modelamiento, se respeta los sólidos entregados por AMSA, el resultado son dos sólidos diferenciados, respetando los datos asignados para cada control. (**Imagen 5.24**)



**Imagen 5.24:** Diatrema argilizada en rojo y Diatrema con turmalina en gris.

### 5.3.4 BRECHA DE TURMALINA (BX TUR)

La Brecha de Turmalina se ubica paralela a la Falla Contacto Noreste (Rosado **Figura 5.25**).

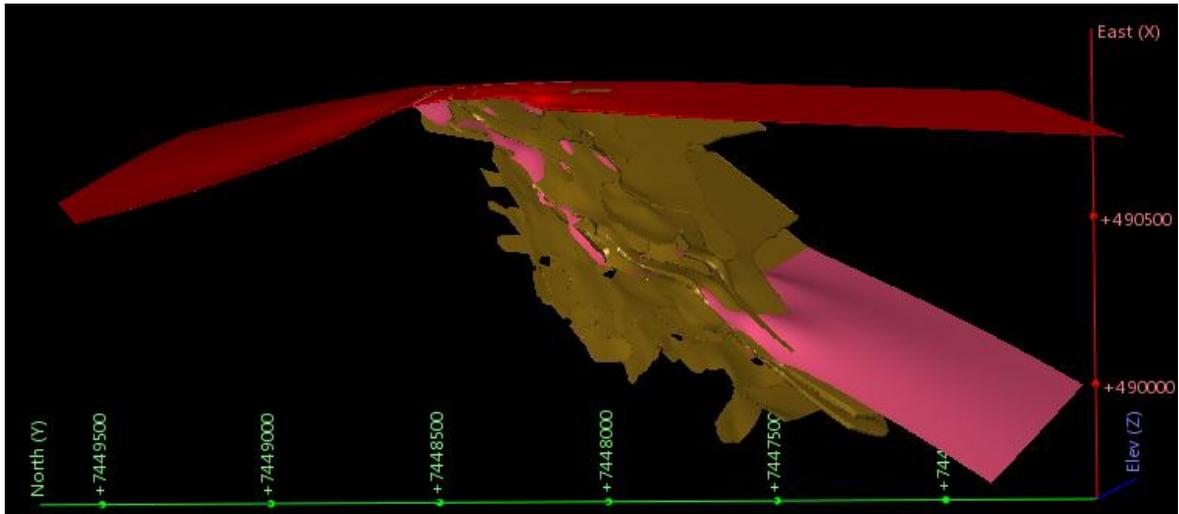


Imagen 5.25: Ubicación de la BX TUR con respecto a la Falla Roja y Contacto Noreste.

Se separan las zonas de material dañado, en los **Gráfico 5.17**, **Gráfico 5.18** y **Gráfico 5.19** se observa la diferencia entre ambas zonas en cuanto a su resistencia estimada por el método del martillo, el RQD y el RMR.

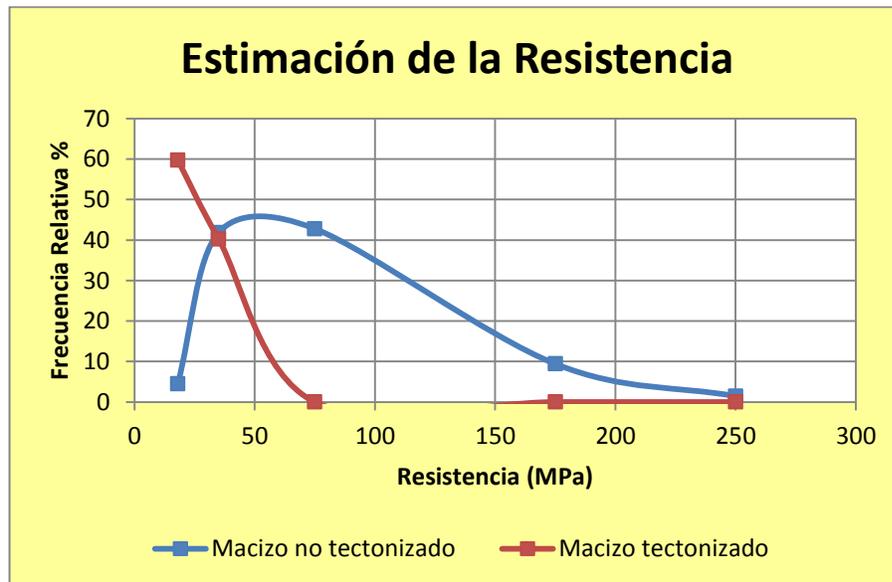


Gráfico 5.17: Histograma de frecuencia de la estimación de la Resistencia para la BX TUR.

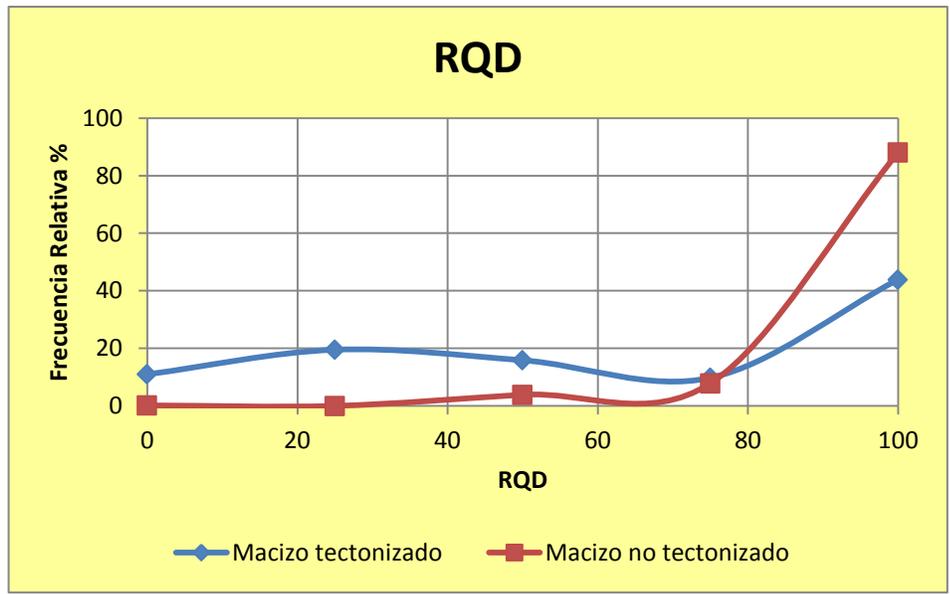


Gráfico 5.18: Histograma de frecuencia del parámetro RQD para la BX TUR.

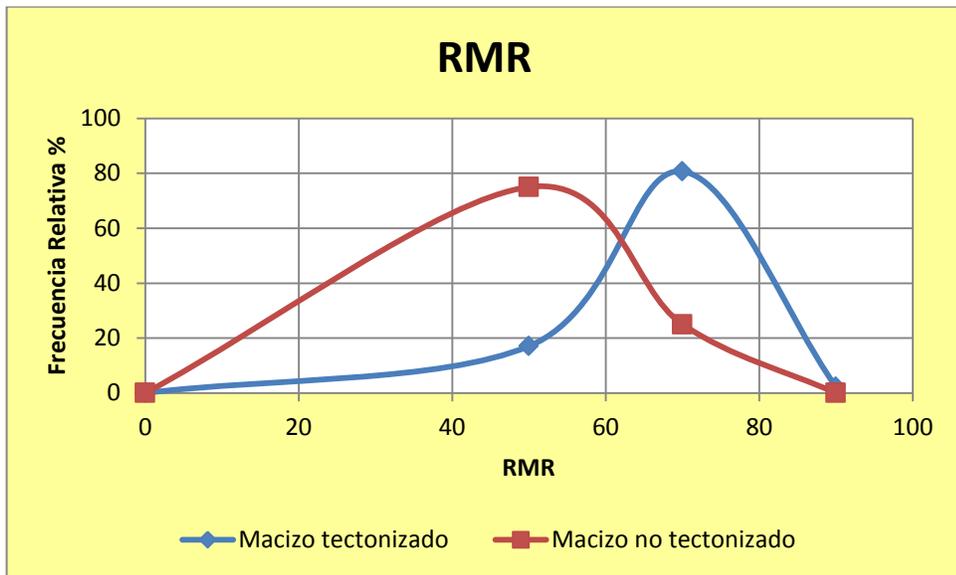
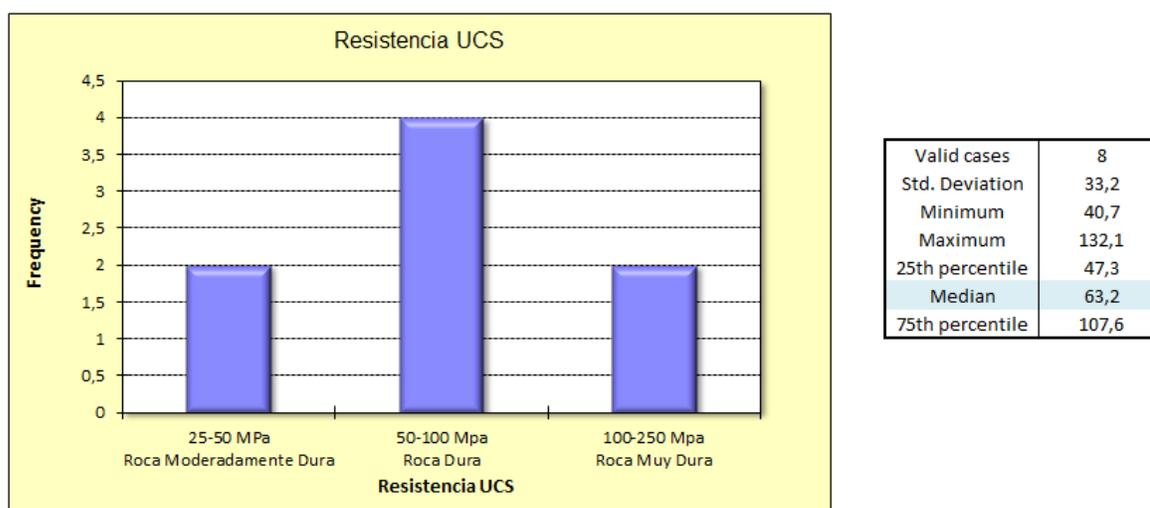


Gráfico 5.19: Histograma de frecuencia del parámetro RMR para la BX TUR.

Se cuentan con 8 datos de ensayos de laboratorio UCS (Ver **Tabla 5.3.14**)

**Tabla 5.3.14: Resultados ensayos UCS para la BX TUR.**

SONDAJE	DESDE	HASTA	DIAMETRO	RUPTURA	UCS
JVC-115A	794,8	795	HQ	Matriz	40,77
SGTF-01	249,40	249,54	HQ	Matriz	44,65
GMC-10	227,62	227,81	PQ	Matriz	55,21
JVC-273	179,37	179,51	HQ	Matriz	60,12
JVC-237	272,3	272,445	HQ	Matriz	66,3
JVC-228	161,66	161,8	HQ	Matriz	90,11
JVC-250	214,5	214,643	HQ	Matriz	113,51
GMC-10	428,05	428,24	PQ	Matriz	132,05



**Grafico 5.3.20: Histograma de frecuencias para los resultados de ensayos UCS BX TUR.**

La estadística de los datos da una mediana de 63.2 MPa para la brecha (**Grafico 5.3.20**), la varianza entre los datos se debe a las cercanías con las Fallas circundantes (Falla Roja, Caracoles y Contacto Noreste).

El ensayo UCS con menor valor de todos (JVC-115 con 40.77 MPa) (**Foto 5.3.12**) se encuentra ubicado cercano a la Falla Caracoles, la que puede influir en esta baja en la resistencia, aunque la roca se ve bastante fresca. Su bajo valor se puede deber entonces a que la ruptura no fue realmente por matriz si no que por estructura. No así el segundo valor más bajo (SGTF-01 con 44,65 MPa) (**Foto 5.3.13**) el cual se encuentra más alterado, pero se ubica lejos de las fallas interpretadas, su alteración se puede deber a una falla menor no interpretada.

La Brecha de Turmalina tiene la misma dirección que la Falla Caracoles y Falla Contacto Noreste y está limitada por la Falla Roja. A pesar de lo anterior la brecha se presenta bastante competente en su mayoría.



Foto 5.3.12: Sondaje JVC-115.



Foto 5.3.13: Sondaje SGTF-01.

Con la revisión fotográfica y la resistencia estimada se identifica una zona más alterada, donde no se diferencia con claridad los clastos angulosos como en el resto de los sondajes. La **Foto 5.3.14** muestra la diferencia entre el sondaje JVC-285A (roca más alterada) y el sondaje JVC-288.



Foto 5.14: Izq: Sondaje JVC-285A alrededor de los 540 m de profundidad, Der: JVC-288 alrededor de los 274 m de profundidad.

La **Imagen 5.26** muestra la ubicación de la información en tres clasificaciones: Brecha tectonizada, sana y muy alterada (rojo, azul y amarillo respectivamente)

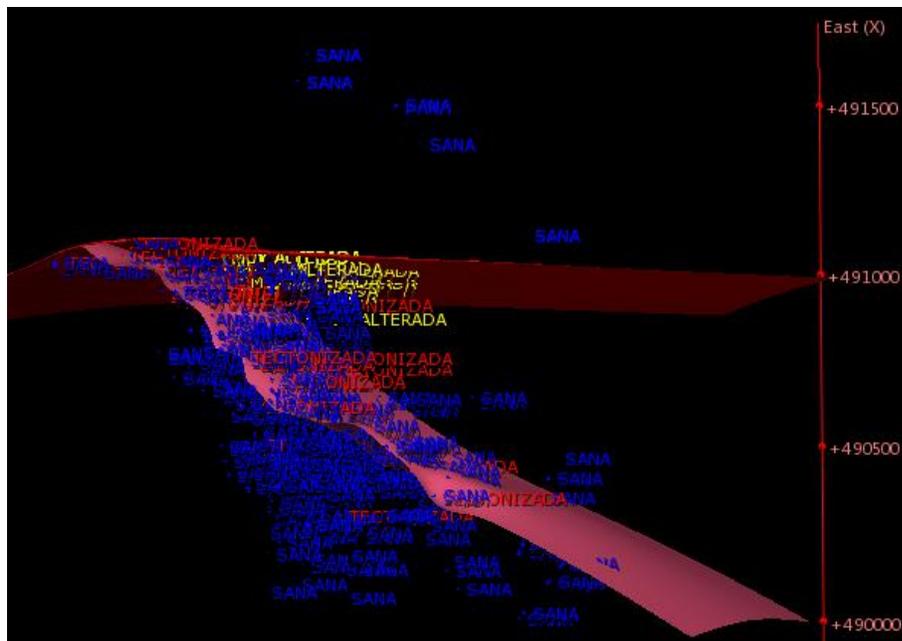


Imagen 5.26: BX TUR sana en azul, Tectonizada en rojo y alterada en amarillo.

Se observa que la roca alterada se concentra entre la Falla Roja y Falla Contacto Noreste, pero no se encuentra un control para este aumento de alteración ya que más cercana a la cuña entre ambas fallas la brecha no se encuentra tan dañada.

El tema es discutido con los geólogos de AMSA en una de las visitas a campo, se concluye que es un error de mapeo litológico ya que corresponde a Diatrema, por lo tanto los datos son descartados del estudio de la Brecha de Turmalina.

La brecha presenta una alteración sericítica homogénea en todo el cuerpo, no es afectada por distintas zonas minerales que cambien las características geomecánicas de la roca, por lo que no se separará en Unidades Lito-Geotécnicas.

### 5.3.5 PORFIDO DACITICO (PORDAC)

El Pórfido Dacítico (blanco en **Imagen 5.27**) es cortado por la Falla Caracoles (café) y Falla Contacto Noreste (rosado).

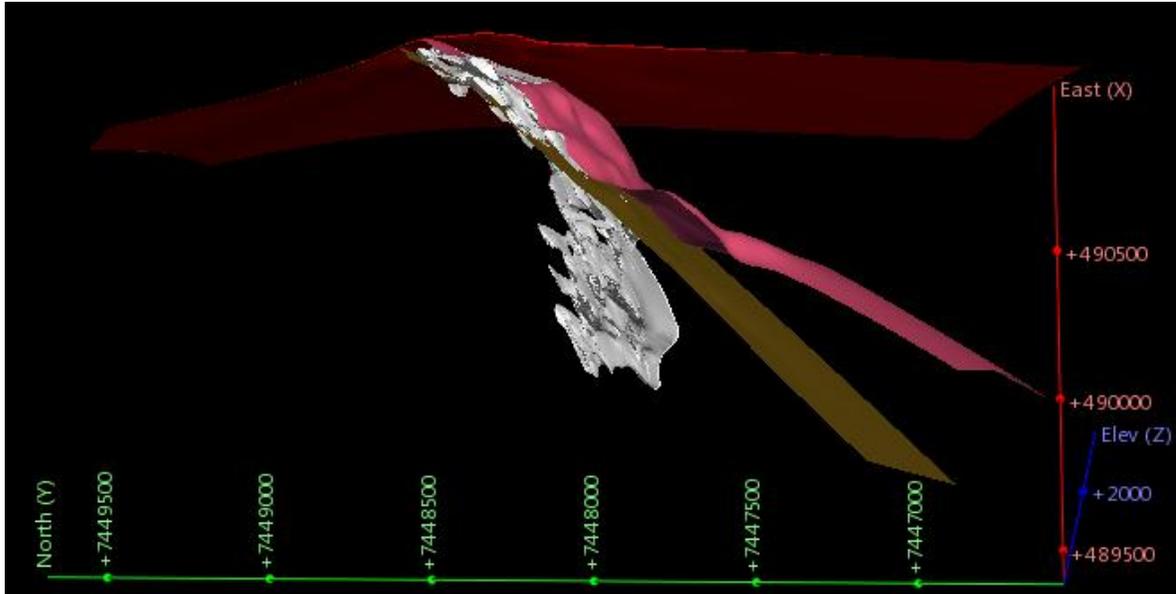


Imagen 5.27: PORDAC blanco, Falla Caracoles en café y Falla Contacto Noreste en rosado.

Presenta alteración Potásica Feldespática en todo el cuerpo. Se diferencia dentro del pórfido una zona de enriquecimiento primario y secundario. En los gráficos siguientes (**Gráfico 5.3.21** y **Gráfico 5.3.22**) se muestra la diferencia en la estimación de la resistencia por el método del martillo y el RQD.



Gráfico 5.3.21: Histograma de frecuencias para la estimación de la Resistencia en el PORDAC.

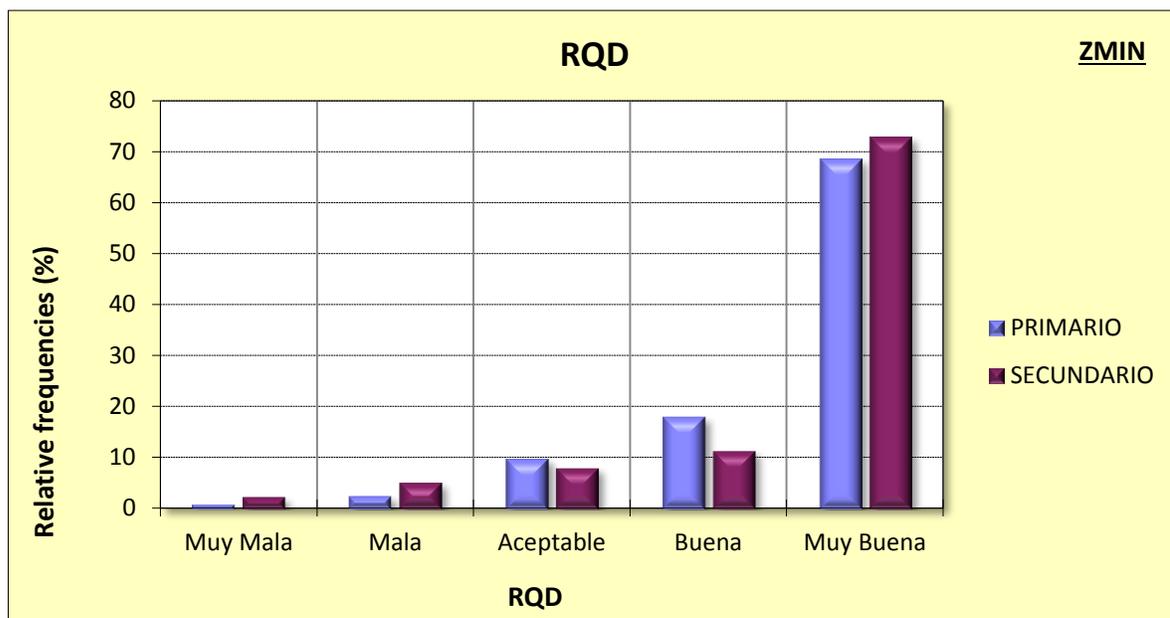


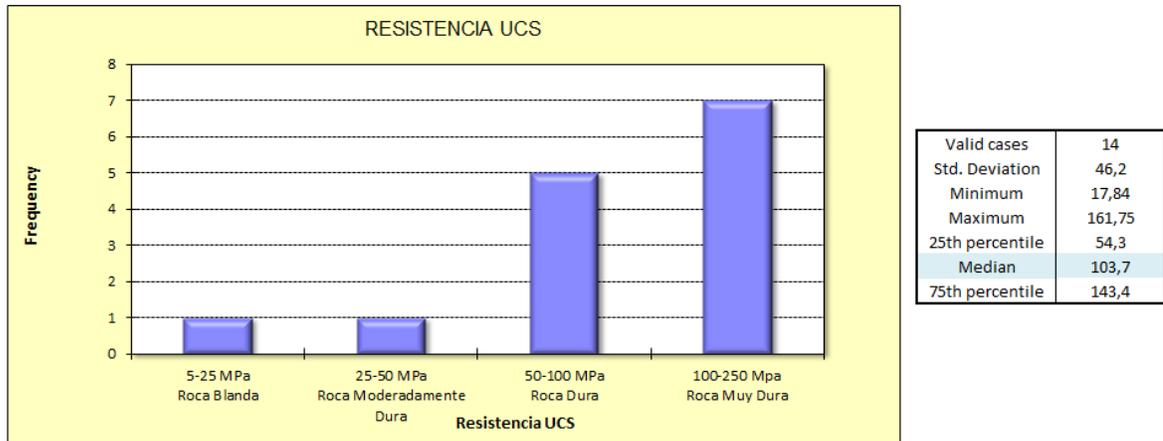
Grafico 5.3.22: Histograma de frecuencias para el parámetro RQD en el PORDAC.

Se cuenta con 14 datos de ensayos de laboratorio UCS (Ver **Tabla 5.3.15**).

**Tabla 5.3.15: Resultados ensayos UCS para el PORDAC.**

SONDAJE	DESDE	HASTA	DIAMETRO	RUPTURA	UCS
JVC-257	270,6	270,743	HQ	Matriz	17,84
JVC-249	655,37	655,52	HQ	Matriz	32,71
JVC-175	648,52	648,72	HQ	Matriz	52,12
JVC-252	216,67	216,81	HQ	Matriz	55,06
SG-1A	763,5	763,7	HQ	Matriz	89,06
SG-1A	764,29	764,44	HQ	Matriz	90,14
JVC-175	620,21	620,41	HQ	Matriz	99,74
JVC-152	662,6	662,8	HQ	Matriz	107,62
JVC-152	569,05	569,25	HQ	Matriz	118,73
JVC-210	917,6	917,8	NQ	Matriz	119,58
JVC-152	692,2	692,4	HQ	Matriz	141,54
JVC-175	695,35	695,54	HQ	Matriz	149,07
JVC-203	812,46	812,66	HQ	Matriz	156,62
JVC-152	717,73	717,93	HQ	Matriz	161,75

La estadística de los ensayos de laboratorio UCS para el Pórfido Dacítico muestra una concentración de datos en “Roca Dura” a “Roca Muy Dura”, con máximo de 161.75 MPa. (**Grafico 5.3.23**).



**Grafico 5.3.23:** Histograma de frecuencias para los resultados de ensayos UCS PORDAC.

El valor más bajo de UCS lo presenta una parte del pórfido más alterado que el resto del cuerpo (**Foto 5.3.15**), este ensayo está ubicado en la zona de óxidos.



**Foto 5.3.15:** Sondaje JVC- 257 metraje 270.6, UCS de 17.84 MPa.

Otro ensayo perteneciente a la zona de óxidos es la probeta ubicada en el sondaje JVC-252 a los 216.67 metros de profundidad, el valor UCS es de 55.06 MPa. Valores cercanos a este pertenecen también a zona de enriquecimiento primario, a 600 metros de profundidad aproximadamente, esto afirma el hecho que no se observa una diferencia clara entre ambos ambientes de mineralización.

Otros valores bajos como lo es el sondaje JVC-249 a los 655.37 metros, la **Foto 5.3.16** muestra que se encuentra muy cercano a uno de los contactos con la Toba Andesítica, pero esto no representa un control claro, ya que el valor más alto de UCS (161.75 MPa) también se encuentra cercano a este tipo de contacto (**Foto 5.3.17**).



Foto 5.3.16: Sondaje JVC- 249 metraje 655.32, UCS de 32.71 MPa.



Foto 5.3.17: Sondaje JVC-152, metraje 717.73, UCS 161.75 MPa.

La **Tabla 5.3.16** muestra la estadística descriptiva del pórfido sin daño tectónico para los parámetros RQD, RMR y Resistencia UCS.

**Tabla 5.3.16: Resultados ensayos UCS para el PORDAC.**

	RQD	RMR	UCS
Valid cases	2079	1796	14
Std. Deviation	10,4	8,2	46,2
Minimum	45	42	17,84
Maximum	100	83	161,75
25th percentile	92	65	54,3
Median	98	69	103,7
75th percentile	100	71	143,4

El Pórfido Dacítico no se separará en Unidades Lito-Geotécnicas ya que no se encuentra un control en cuanto a su alteración, zona mineral o un control espacial.

### 5.3.6 PORFIDO GRANODIORITICO (PGRND)

El Pórfido Granodiorítico se encuentra intruyendo a la Diatrema, en la **Imagen 5.28** se observa en color celeste el pórfido y en rojo y gris la Diatrema con sus dos Unidades Lito-Geotécnicas a distintas profundidades, además se encuentra limitado por las Fallas Roja y Contacto Noreste (en rojo y rosado respectivamente).

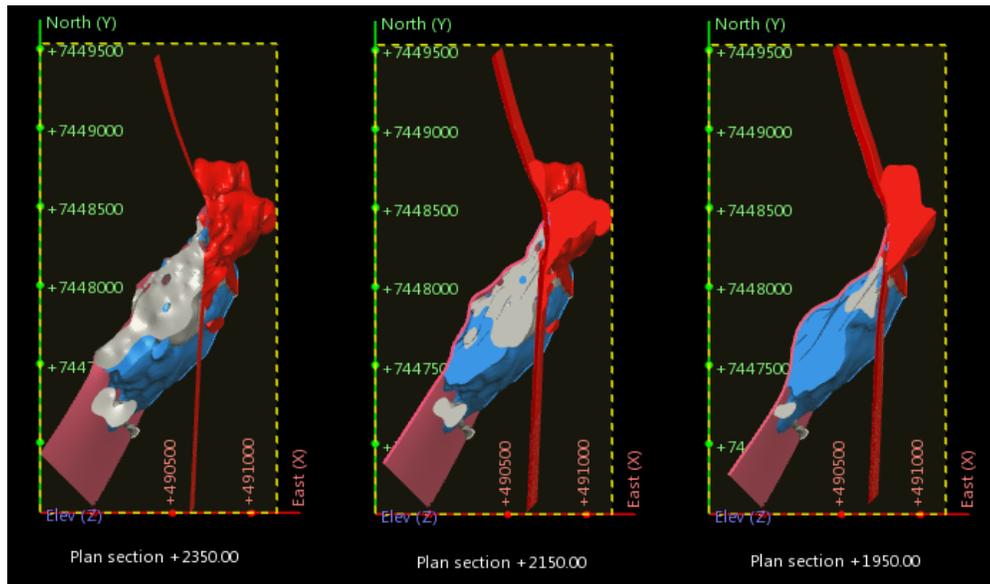


Imagen 5.28: PGRND en celeste, DIA en gris y rojo.

El pórfido tiene una alteración clorita sericita homogénea y se encuentra totalmente en zona mineral primaria.

Nuevamente mediante filtro en la base de datos y fotografías de sondajes se reconocen zonas con material fracturado, molido o cizallado correspondiente a zonas de falla o de intenso fracturamiento. Los siguientes gráficos muestra la distribución de ambos macizos en cuanto a su resistencia, RQD y RMR.

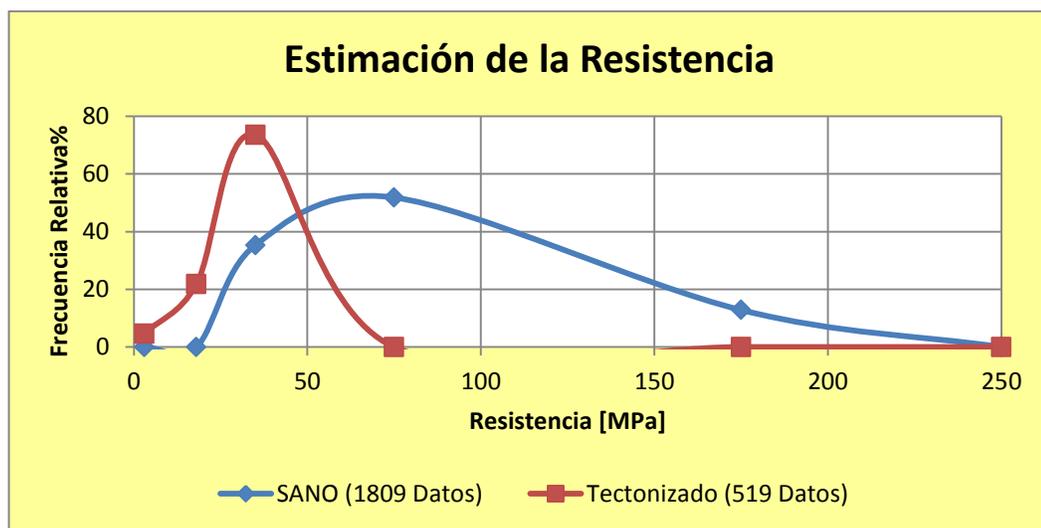


Gráfico 5.3.24: Histograma de frecuencia de la estimación de la Resistencia para el PGRND.

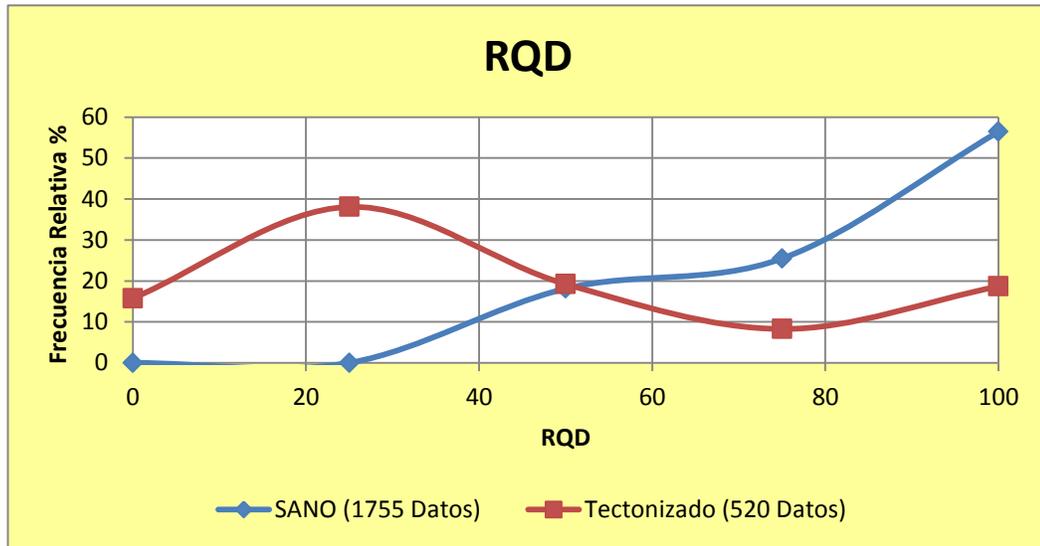


Grafico 5.3.25: Histograma de frecuencia del parámetro RQD para el PGRND.

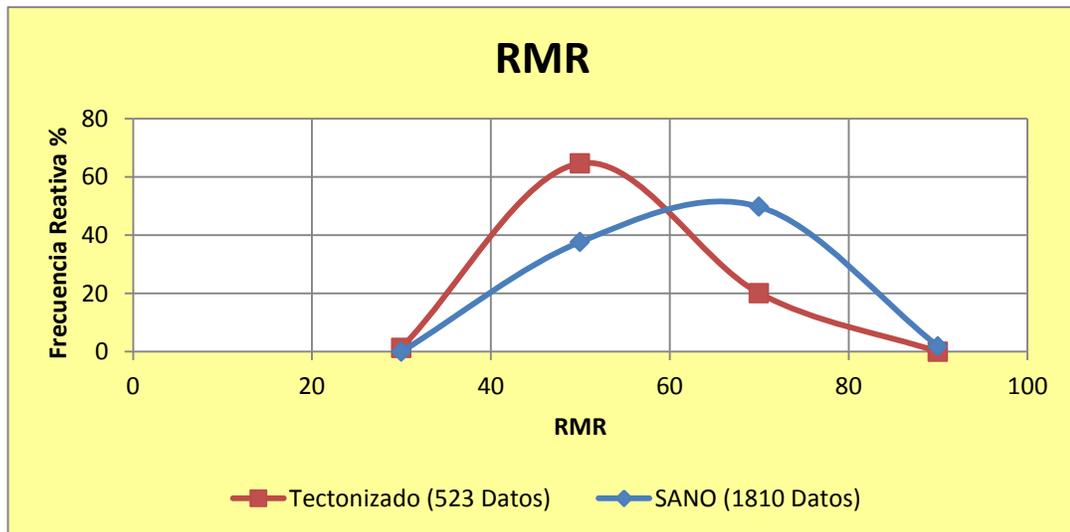


Grafico 5.3.26: Histograma de frecuencia del parámetro RMR para el PGRND.

Los ensayos UCS realizados al PGRND se reparten en 5 sondajes, con un total de 13 probetas que tienen una variación de 100 MPa entre el valor mínimo y el valor máximo (Ver **Tabla 5.3.17**).

Tabla 5.3.17: Resultados ensayos UCS para el PGRND.

SONDAJE	DESDE	HASTA	DIAMETRO	RUPTURA	UCS
JVC-237	240,85	240,993	HQ	Matriz	58,46
JVC-210	417,35	417,55	HQ	Matriz	59,36
SGTF-10	201,71	201,85	HQ	Matriz	65,01
JVC-203	388,38	388,58	HQ	Matriz	70,88
JVC-202	479,7	479,9	HQ	Matriz	71,14
JVC-203	402,2	402,38	HQ	Matriz	92,83
JVC-250	305,45	305,593	HQ	Matriz	95,84
JVC-202	517,33	517,53	HQ	Matriz	124,37
JVC-202	430,14	430,33	HQ	Matriz	126,6
JVC-202	462,5	462,7	HQ	Matriz	127,41
JVC-250	274,2	274,343	HQ	Matriz	128,23
JVC-202	367,31	367,49	HQ	Matriz	148,49
JVC-202	345,3	345,5	HQ	Matriz	158,74

La estadística de los resultados de las probetas de laboratorio se distribuye en dos categorías de resistencia; “Roca Dura” y “Roca Muy Dura” (Grafico 5.3.27).

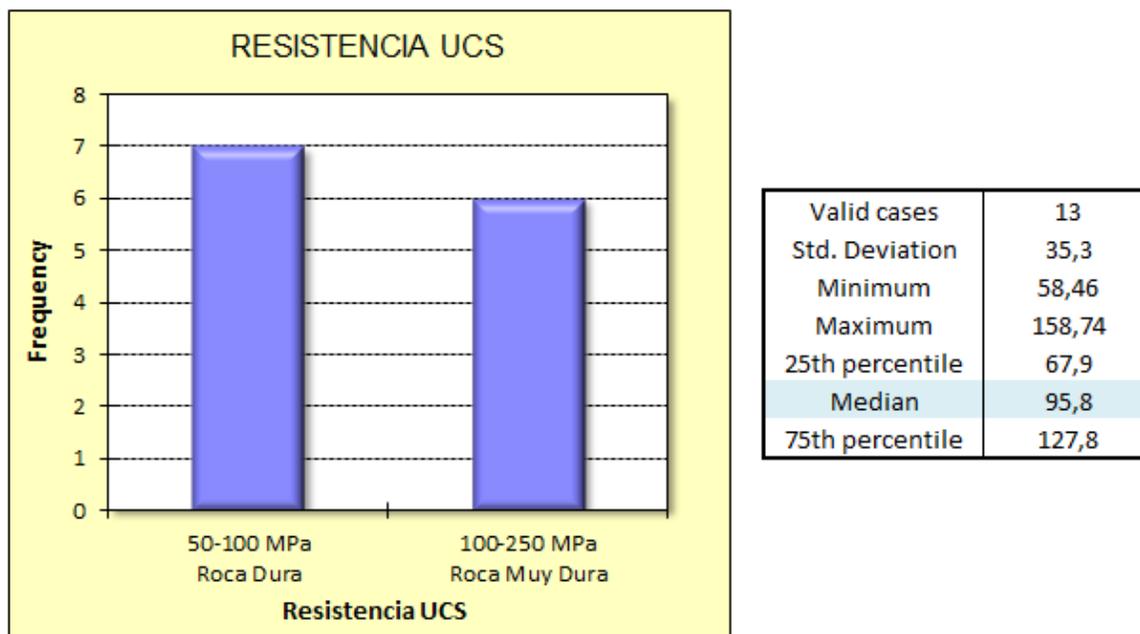


Grafico 5.3.27: Histograma de frecuencias para los resultados de ensayos UCS PGRND.

Los menores valores se encuentran distribuidos cerca de zonas de contacto con la Brecha de Turmalina para los sondajes JVC-237 Y JVC-210 (**Foto 5.3.18**). Para la probeta ubicada en el sondaje SGTF-10, el contacto es con la Secuencia Volcano Clástica.



**Foto 5.3.18:** Sondaje JVC-237 y JVC-210 con UCS de 58.46 MPa y 59.36 MPa respectivamente.

Los mayores valores UCS, pertenecen al sondaje JVC-202, estos están ubicados lejos de los contactos como lo muestra la **Tabla 5.3.18**.

**Tabla 5.3.18:** Litología del sondaje JVC-202.

SONDAJE	DESDE	HASTA	LITOLOGIA	MUESTRAS
JVC-202	260	264	PGRND	
JVC-202	264	268	DIA	
JVC-202	268	538,5	PGRND	345m, 367m
JVC-202	538,5	546,7	BXTUR1	
JVC-202	546,7	842,8	TUFAN	

Se cuenta con un bajo número de probetas UCS considerando el gran volumen del pórfido, las zonas de contacto presentan una menor resistencia, pero sólo se observa en 3 casos. La estimación de la resistencia con el método del martillo muestra esta correlación en los 3 casos mencionados, pero no en todas las zonas de contacto. Con esta cantidad de datos no se puede realizar una correcta división de la litología, es decir, no se identifica que en todas las zonas de contacto ocurra este comportamiento, además los datos de RQD y RMR no muestran diferencias entre distintos sectores del pórfido que no sean zonas de macizo dañado por la presencia de fallas o de zonas de alto fracturamiento.

### 5.3.7 PORFIDO RIODACÍTICO (PRD, DOMO)

El pórfido Riodacítico (Imagen 5.29 azul) se encuentra en contacto con la Diatrema, la Secuencia Volcano Clástica, la Falla Roja por el oeste y la Falla Domo por el sureste.

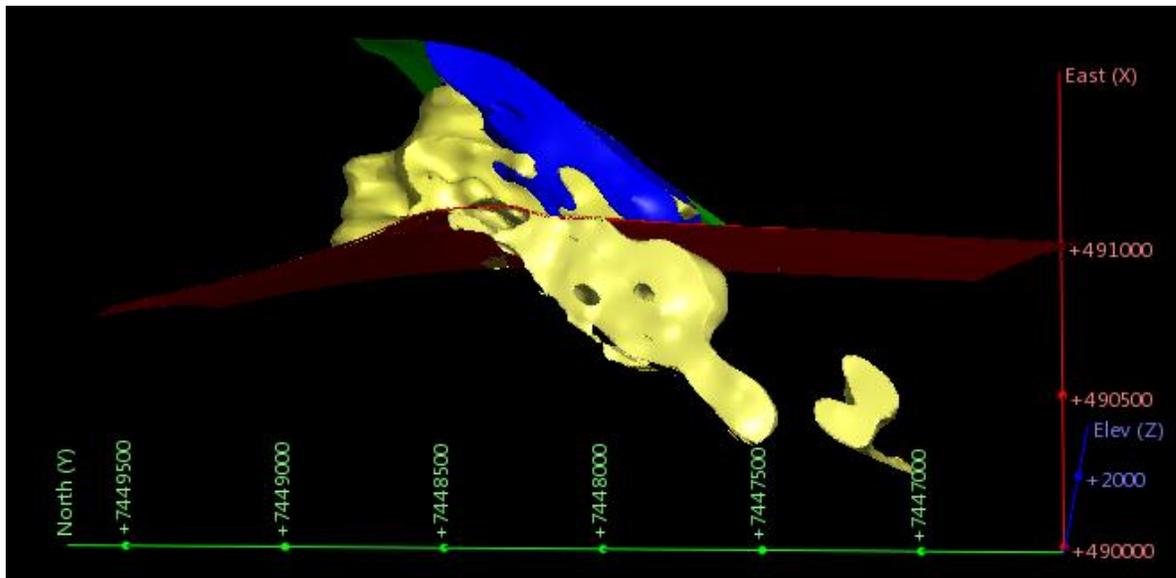


Imagen 5.29: Referencia espacial del PRD (azul), Falla Roja (rojo), Falla Domo Sur (verde) y Diatrema (amarillo).

El Gráfico 5.3.28, Gráfico 5.3.29 y Gráfico 5.3.30 muestra la estimación a la resistencia, RQD y RMR del Domo separando las zonas de daño.

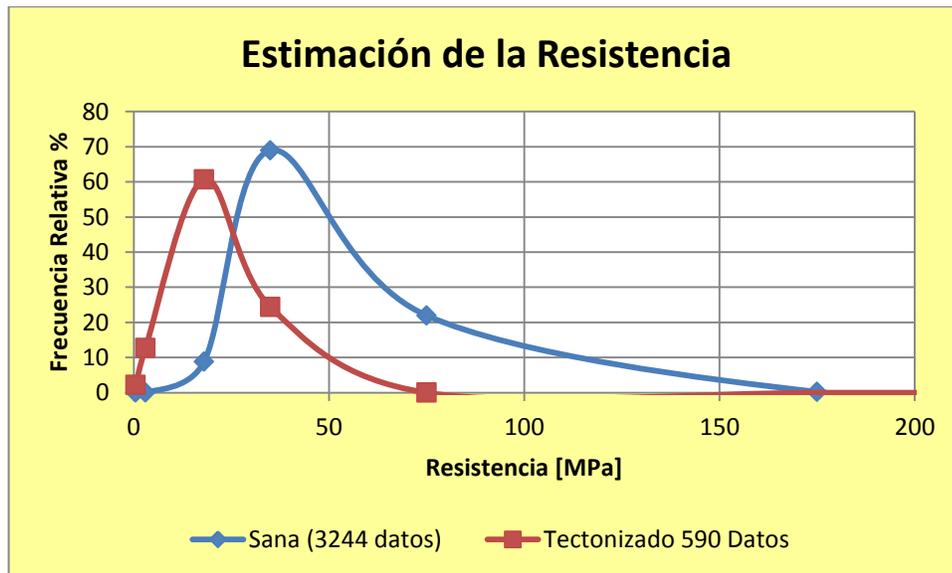


Gráfico 5.3.28: Histograma de frecuencias para la estimación de la resistencia del PRD.

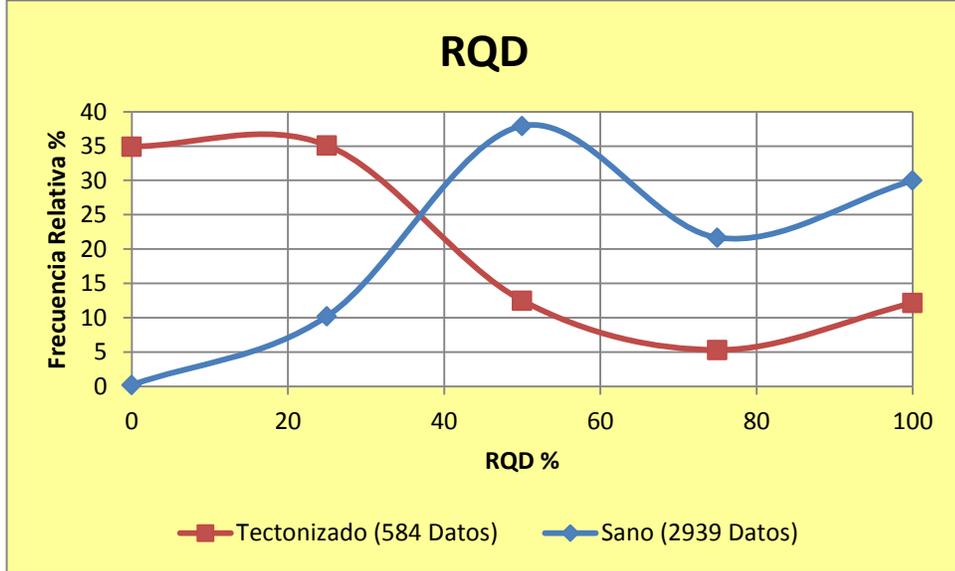


Grafico 5.3.29: Histograma de frecuencias para el parámetro RQD para el PRD.

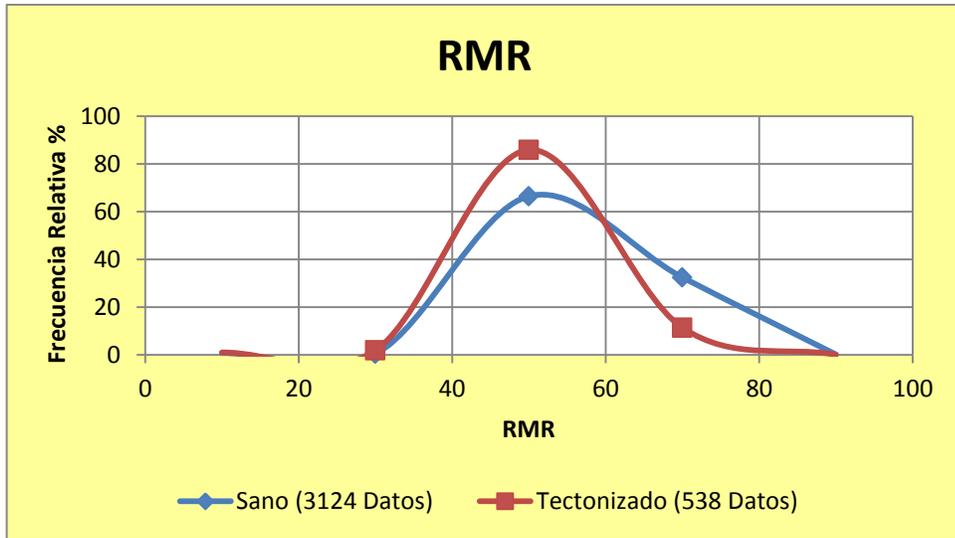


Grafico 5.3.30: Histograma de frecuencias para el parámetro RMR para el PRD.

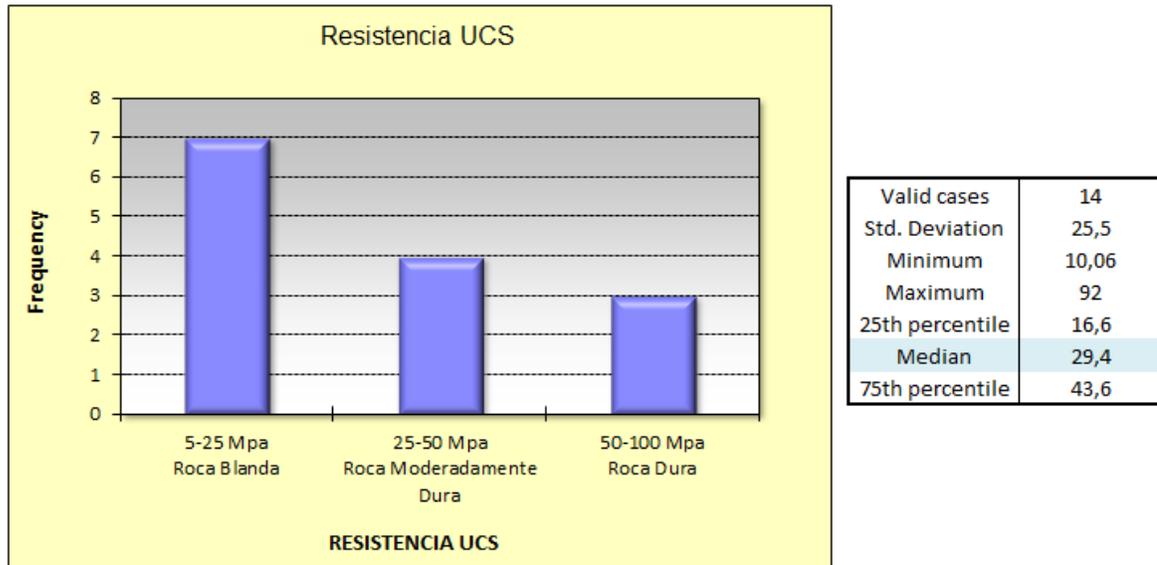
La diferencia de resistencias entre el macizo con material dañado y el macizo sin este material no es tan extensa como las otras litologías. La media del RMR es muy similar, ya que ambas pertenecen a la Clase Regular.

Para el domo, hay 14 datos de ensayos de laboratorio (Ver **Tabla 5.3.19**).

**Tabla 5.3.19: Resultados ensayos UCS para el PRD.**

SONDAJE	DESDE	HASTA	DIAMETRO	RUPTURA	UCS
SG-5A	315,81	315,98	HQ	Matriz	10,06
SG-5A	493,3	493,5	HQ	Matriz	11,04
SG-5A	311,82	311,98	HQ	Matriz	15,74
SG-5A	500,6	500,8	HQ	Matriz	16,92
SGTF-12	480,81	480,95	HQ	Matriz	18,24
SGTF-16	257,49	257,63	HQ	Matriz	19,61
SGTF-16	337,85	337,99	HQ	Matriz	24,16
SGTF-13	325,00	325,14	HQ	Matriz	34,64
SG-5A	464,5	464,7	HQ	Matriz	34,97
SGTF-13	154,35	154,49	HQ	Matriz	35,84
SGTF-07A	167,73	167,87	HQ	Matriz	36,70
SGTF-12	404,79	404,93	HQ	Matriz	64,38
SGTF-13	271,01	271,15	HQ	Matriz	77,36
SG-5A	570,25	570,45	HQ	Matriz	92

El histograma de frecuencias muestra una mayor concentración de datos en la clasificación de resistencia de “Roca Blanda” (**Grafico 5.3.31**).



**Grafico 5.3.31: Histograma de frecuencias para los resultados de ensayos UCS PRD.**

La **Imagen 5.30** muestra cómo se distribuyen las probetas dentro del pórfido, la Falla Domo Sur se ha puesto como referencia (en verde). No se observa un control en cuando a la profundidad, ya que el ensayo con mayor resistencia (92 MPa) se encuentra muy cercano a una de las probetas con menor valor de resistencia (11 MPa).

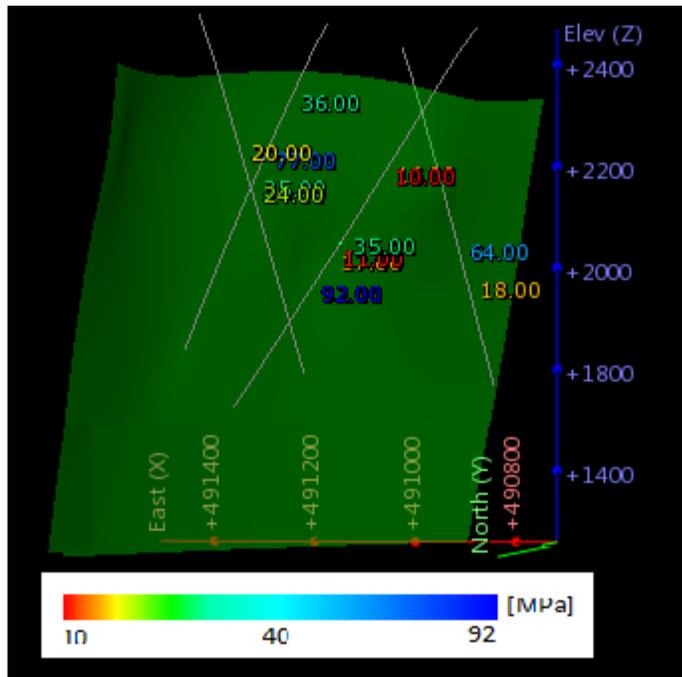


Imagen 5.30: Ubicación de las probetas UCS ensayadas para el PRD.

Como se mencionó en la sección 5.2, la parte Este del proyecto concentra los menores valores de resistencia UCS y el Domo se encuentra ubicado al Este de la Falla Roja. La **Foto 5.3.19** pertenece al sondaje SG-05A, se muestra la roca intensamente argilizada alrededor de los 316 metros de profundidad, con una resistencia de 10.6 MPa. En el mismo sondaje, a más profundidad (570 m) se observa la roca menos alterada con una mayor resistencia UCS de 92 MPa (**Foto 5.3.20**).



Foto 5.3.19: Fotografía del sondaje SG-05A a los 315,81 metros.



**Foto 5.3.20 Fotografía del sondaje SG-05A a los 570,25 metros.**

En el caso del Domo, la resistencia está relacionada con la intensidad de alteración argílica presente, y esta intensidad está ligada a la presencia de la Falla Roja, pero hay sectores alejados de la Falla Roja que se encuentran muy argilizados. Por medio de la revisión fotográfica se interpreta que al este de la Falla Roja hay presencia de fallas con el mismo comportamiento que la Falla Roja, es decir, argiliza la roca y presenta un RQD alto pero altera la roca con menor intensidad.

Esta familia de fallas serían las que causan que el domo presente resistencias tan irregulares.

### 5.3.8 SECUENCIA VOLCANO CLASTICA (SVC)

Se extiende en el sector Este del proyecto (naranja **Imagen 5.31**), en la parte norte está limitada lateralmente por la Falla Roja, al sur se encuentra tanto al este como al oeste de esta. En contacto con el Domo (azul), Pórfido Granodiorítico (gris) y la Diatrema (amarillo).

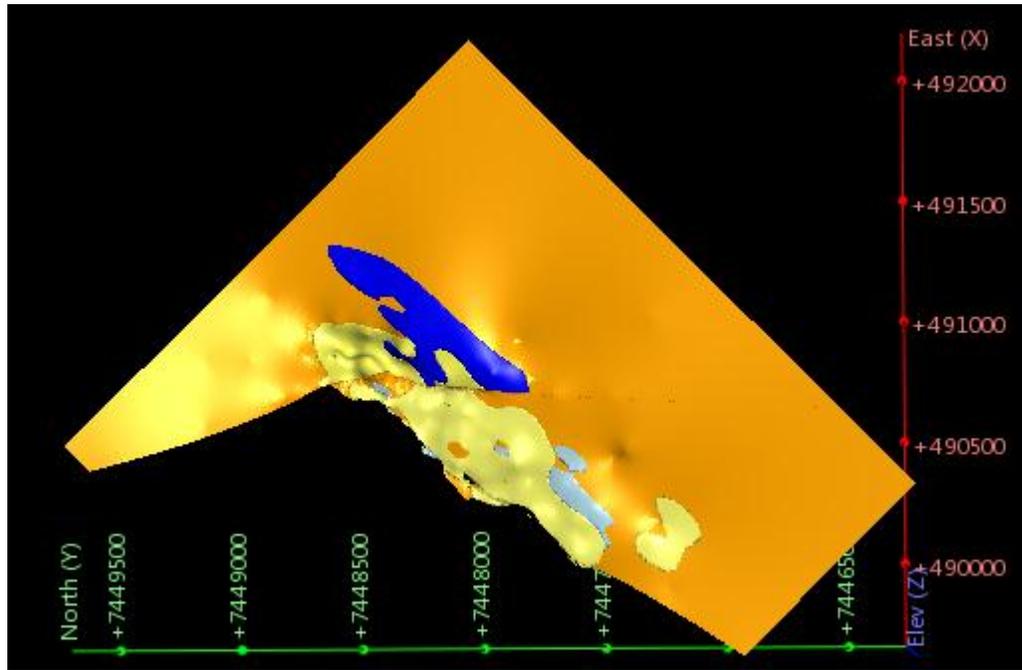


Imagen 5.31: Referencia espacial del SVC con litologías y estructuras adyacentes (Vista en planta al este).

Tiene un gran volumen dentro del proyecto, pero sólo hay 24 sondajes con información geotécnica.

Se divide en zonas con mayor daño tectónico. Éstas están asociadas a fallas no interpretadas y a la Falla Roja.

- La roca con material dañado va desde R1 hasta R3, RQD varía desde Muy Malo a Muy Bueno (presencia de Falla Roja)
- La roca sin material dañado va desde R2 a R4, RQD de Aceptable a Muy Bueno.

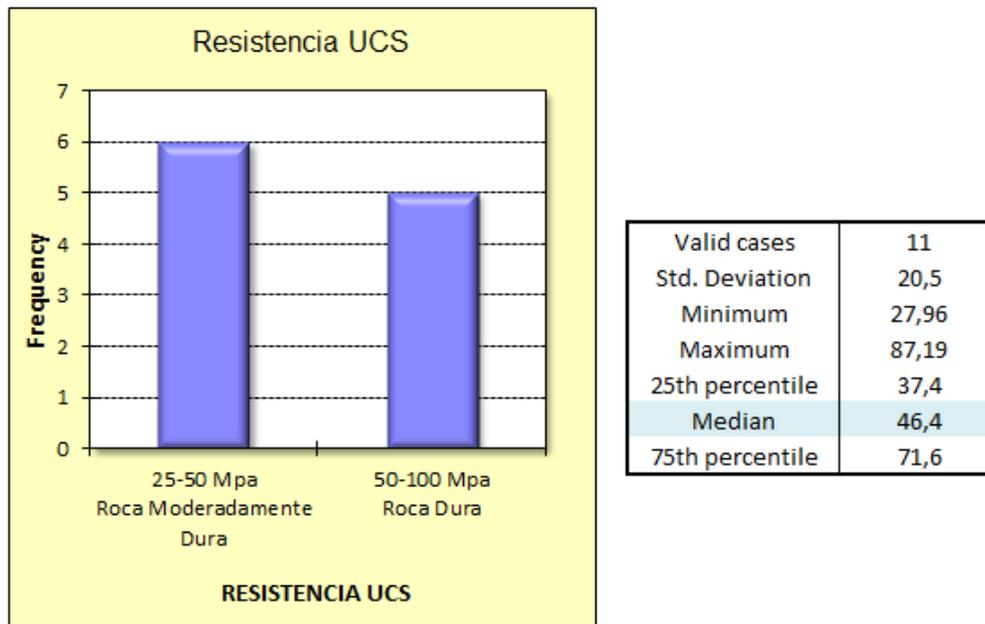
Del mapeo Geotécnico, no tiene alteraciones asociadas, sí zonas minerales pero no se observa diferencias en los parámetros geotécnicos entre ellas.

Se cuenta con 11 datos de probetas de laboratorio UCS (Ver **Tabla 5.3.20**), repartidos en los sondajes: SG-3, SGTF-01 y SGTF-10.

**Tabla 5.3.20: Resultados ensayos UCS para la SVC.**

SONDAJE	DESDE	HASTA	DIAMETRO	RUPTURA	UCS
SGTF-10	238,30	238,44	HQ	Matriz	27,96
SGTF-10	378,47	378,61	HQ	Matriz	28,31
SG-3	473,1	473,3	HQ	Matriz	37,41
SGTF-10	149,47	149,61	HQ	Matriz	37,63
SGTF-10	121,39	121,53	HQ	Matriz	42,68
SGTF-10	446,69	446,83	HQ	Matriz	46,4
SGTF-10	453,78	453,92	HQ	Matriz	50,31
SG-3	512,4	512,6	HQ	Matriz	51,71
SGTF-10	409,75	409,88	HQ	Matriz	71,58
SGTF-01	206,85	206,99	HQ	Matriz	82,12
SGTF-01	150,55	150,69	HQ	Matriz	87,19

Los histogramas de frecuencias muestran que los datos se concentran en dos rangos de resistencia, de Roca Moderadamente Dura a Roca Dura (**Grafico 5.3.32**), con una mediana de 46.4 MPa. El número de ensayos es muy pequeño para el gran volumen de SVC.



**Grafico 5.3.32: Histograma de frecuencias para los resultados de ensayos UCS para la SVC.**

Como se trata de una litología que engloba otras más (como brechas volcánicas) es muy difícil definir un número o un rango acotado para la resistencia (y los parámetros RQD y RMR) ya que la roca varía dependiendo de su ubicación con respecto a fallas, contacto como también cuán profunda o compactada esté.

Las fotografías de los tramos de donde se seleccionaron las probetas con los valores extremos de UCS demuestran lo anterior, por un lado se tiene una roca con clastos volcánicos angulosos muy diferentes a la matriz en cuanto a color y resistencia (**Foto 5.3.21**) y por el otro una roca en que la resistencia de la matriz y los clastos son similares (**Foto 5.3.22**).



Foto 5.3.21: Sondaje SGTF-10 con UCS de 27.96 MPa.



Foto 5.3.22: Sondaje SGTF-01 con UCS de 87.19 MPa.

## 6 RESULTADOS

Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 6.1**. Para cada unidad lito-geotécnica se muestra el valor medio, mínimo y el máximo obtenido de la Resistencia UCS, RQD y RMR. Para el caso del Pórfido Diorítico en ambiente secundario, no se cuenta con información de ensayos UCS, por lo que se ha tomado el valor de la Resistencia Estimada por el método del martillo.

**Tabla: 6.1: Ensayos PLT del sondaje JVC-266.**

LITOLOGIA	ALTERACION	ZONA MINERAL	RESISTENCIA (MPa)			
			MPa		Min	Max
TOBA ANDESITICA	CS-SER	SECUNDARIO	36,6	Moderadamente Dura	9,3	79,7
	SER-CS-POT	PRIMARIO	93,2	Dura	32,8	212,3
PORF DIOITICO	KCL	SECUNDARIO	R3*	Moderadamente Dura	R2*	R4*
		PRIMARIO (PY)	89,7	Dura	54,1	112
PORF GRANODIORITICO	CS-SER	PRIMARIO (PY)	95,8	Dura	58,4	158,7
PORF DACITICO	KF	PRIMARIO	103,7	Muy Dura	17,8	161,7
PORF RIODACITICO	ARGILICA	ESTERIL	29,4	Moderadamente Dura	10	92
DIATREMA	ARGILICA	LIX-PRPY	14	Blanda	7,1	38,7
	SERICITICA		39,6	Moderadamente Dura	21,5	181,6
BRECHA DE TURMALINA	SERICITICA	LIX-PRPY	63,2	Dura	40,7	132
SVC	CS-CL-ARG	PRIMARIO	42,7	Moderadamente Dura	9,4	87,2

LITOLOGIA	ALTERACION	ZONA MINERAL	RQD			
			RQD %		MIN	MAX
TOBA ANDESITICA	CS-SER	SECUNDARIO	98	Muy Buena	27	100
	SER-CS-POT	PRIMARIO	100	Muy Buena	32	100
PORF DIOITICO	KCL	SECUNDARIO	90	Muy Buena	54	100
		PRIMARIO (PY)	100	Muy Buena	60	100
PORF GRANODIORITICO	CS-SER	PRIMARIO (PY)	93	Muy Buena	50	100
PORF DACITICO	KF	PRIMARIO	98	Muy Buena	45	100
PORF RIODACITICO	ARGILICA	ESTERIL	77	Buena	15	100
DIATREMA	ARGILICA	LIX-PRPY	99	Muy Buena	18	100
	SERICITICA		100	Muy Buena	26	100
BRECHA DE TURMALINA	SERICITICA	LIX-PRPY	100	Muy Buena	27	100
SVC	CS-CL-ARG	PRIMARIO	97	Muy Buena	51	100

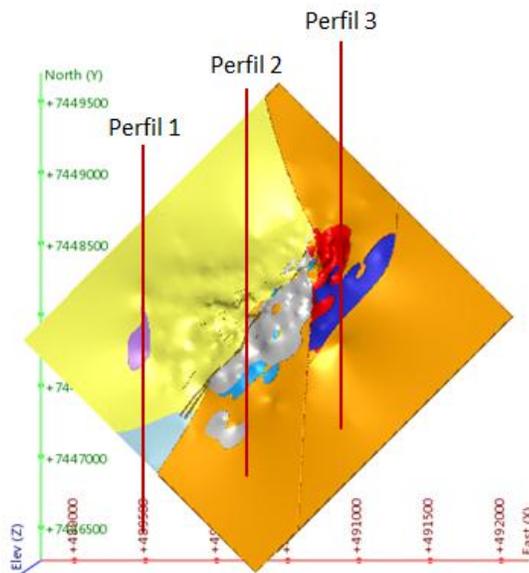
LITOLOGIA	ALTERACION	ZONA MINERAL	RMR			
			RMR		MIN	MAX
TOBA ANDESITICA	CS-SER	SECUNDARIO	66	Buena	40	85
	SER-CS-POT	PRIMARIO	69	Buena	40	87
PORF DIOITICO	KCL	SECUNDARIO	57	Regular	40	74
		PRIMARIO (PY)	69	Buena	44	83
PORF GRANODIORITICO	CS-SER	PRIMARIO (PY)	63	Buena	40	88
PORF DACITICO	KF	PRIMARIO	69	Buena	42	83
PORF RIODACITICO	ARGILICA	ESTERIL	55	Regular	37	80
DIATREMA	ARGILICA	LIX-PRPY	63	Buena	38	80
	SERICITICA		70	Buena	38	87
BRECHA DE TURMALINA	SERICITICA	LIX-PRPY	69	Buena	44	85
SVC	CS-CL-ARG	PRIMARIO	65	Buena	37	84

Los resultados obtenidos para la resistencia UCS se exponen en tres perfiles N-S. La ubicación de estos se muestra en la **Imagen 6.1**.

En el perfil 1 (**Imagen 6.2**) se muestra la litología de Toba Andesítica y Pórfido Diorítico, ambos diferenciados en los ambientes de enriquecimiento primario y secundario. Para cada Unidad Lito-Geotécnica, se señala la mediana de los datos obtenidos.

La **Imagen 6.3** correspondiente al perfil 2, se observa la mediana de los ensayos UCS del Pórfido Granodiorítico, Pórfido Dacítico, Brecha de Turmalina y la Diatrema con turmalina en la matriz. La resistencia UCS del PGRND es alta a pesar de encontrarse a poca profundidad (menos de 200 metros).

El perfil 3 (**Imagen 6.4**) está ubicado al este de la Falla Roja y muestra el grupo de valores más bajos de resistencia.



**Imagen 6.1: Planta de Litologías y Estructuras con los 3 perfiles NS.**



**Imagen 6.2: Perfil 1.**

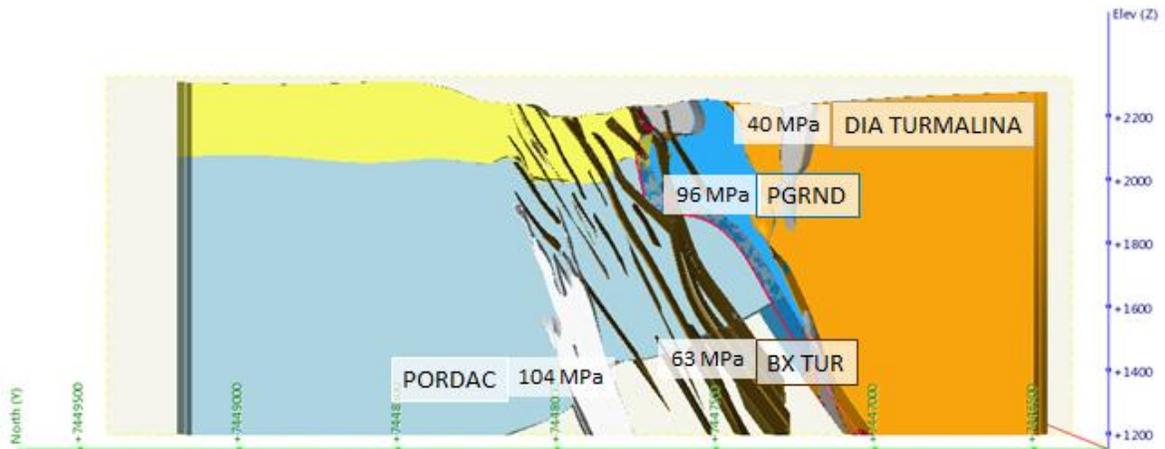


Imagen 6.3: Perfil 2.

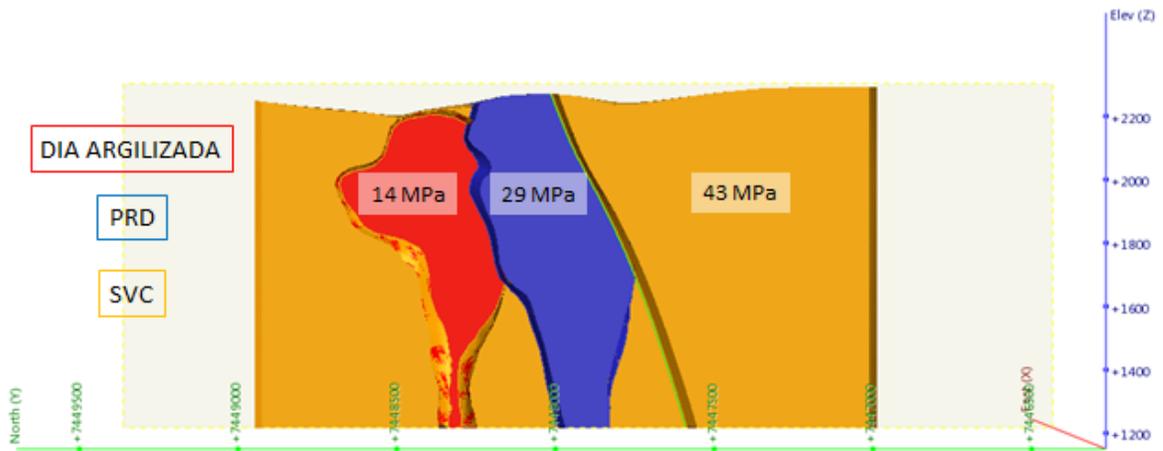


Imagen 6.4: Perfil 3.

Los bajos valores obtenidos en el perfil 3 (Imagen 6.4) están asociados a mayores intensidades de alteración argílica, la que se evidencia por el color rojizo de la roca. En la Diatrema y Pórfido Riodacítico, mediante inspección fotográfica, es posible observar estos sectores con alteración argílica más intensa, que a la vez está asociada a zonas con planos de foliación paralelos, semejante a lo observado en la zona de la Falla Roja. Se puede concluir entonces, que en esta zona, existe una familia de fallas de la misma naturaleza que la Falla Roja, es decir dirección NS e intensa argilización de la roca.

## 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el marco de ésta investigación, en la cual se realizó una caracterización geotécnica del macizo y posteriormente un modelamiento de unidades geotécnicas, fue necesaria una minuciosa revisión de la base de datos con el propósito de corregir las falencias resultantes de la comparación con los fundamentos teóricos sobre la materia.

El proceso descrito anteriormente es la antesala para el reconocimiento de zonas de daño tectónico, que, a su vez sirve de base para el desarrollo de un modelo estructural en detalle. Ésta metodología de trabajo fue necesaria para lograr un margen de error mínimo en el producto resultante de este estudio. En tanto, es preciso aclarar que para la caracterización geotécnica del macizo no fueron consideradas las zonas de daño tectónico.

Por otra parte, en relación a los resultados obtenidos, en lo que respecta a la resistencia UCS (véase **Tabla 6.1**), es posible reafirmar la tesis referida a que existen dos factores que controlan la resistencia del macizo rocoso: la Zona de Óxidos y la Falla Roja. Esto porque, como se observa en las Unidades Lito-Geotécnicas que se encuentran en la zona de óxidos (Toba Andesítica y Pórfido Diorítico) se pueden clasificar como una roca moderadamente dura, en contraste con la misma litología pero en ambiente primario que se clasifica como una roca dura. Del mismo modo, las litologías que se encuentran al este de la Falla Roja, como lo es la SVC, el Domo, y la Diatrema que van desde roca moderadamente dura a roca blanda.

Mientras que, durante el trabajo desarrollado, se interpretaron rasgos estructurales al este de la Falla Roja, los cuales presentan el mismo tipo de alteración que ésta. Esto se evidencia en una baja en la resistencia UCS en zonas con una mayor intensidad en la alteración argílica, según lo examinado en fotografías de sondajes.

En tanto, a partir de la revisión fotográfica realizada para la validación y análisis de la base de datos, fue posible interpretar otro rasgo estructural al Noroeste de la zona de estudio entre los ambientes de mineralización primario y secundario en la Toba Andesítica, él que en las fotografías de sondajes se muestra como pequeñas zonas de cizalle. Además, el modelo de zona mineral interpretado por AMSA muestra un desnivel de los óxidos en esta zona, el cual se prolonga en la misma dirección (NE-SW) e inclinación (manteando hacia el SW) que las fallas Caracoles y Contacto Noreste, interpretándose como una falla paralela a las anteriores.

En cuanto a la confianza espacial de las unidades modeladas, ésta depende de la cantidad de datos por litología que se dispone y de su volumen. En dos de las tres litologías que se pudo separar en Unidades de Lito-alteración (Toba Andesítica y Diatrema), se tenía una buena relación de cantidad de datos con volumen de la litología ya que no se observaban zonas sin información, lo que permitió identificar diferentes poblaciones de datos. En las litologías restantes, la cantidad de datos UCS es más reducida y, probablemente, debido a esto, no se observaron diferentes poblaciones de datos.

Con el objetivo de mejorar la calidad de la información, se sugiere la selección de probetas UCS para litologías con una baja cantidad de ensayos, como lo es el Pórfido Diorítico, donde no hay resultados UCS para el ambiente secundario.

Además, es necesaria la selección de probetas de carga puntual asociadas con una UCS, para realizar una óptima correlación entre PLT y UCS. Esto, debido a que sólo se pudo realizar ésta correlación para la Diatrema con turmalina en la matriz.

Entonces, para la realización de un modelo geotécnico final, se debe desarrollar previamente un modelo estructural para definir dominios e interpretar la continuidad de las zonas de material dañado. Asimismo, se necesita de un modelo hidrogeológico para no sobrestimar el valor de RMR calculado, ya que se usó el estado "Seco" para todo el pit, otorgándole el mejor puntaje para la condición de agua.

## 8 REFERENCIAS.

*ASTM Standards: D 2938 Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens.*

*ASTM Standards: D 5731 – 02, Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock.*

*ASTM Standards: D5873 - 00 Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method.*

**Barton, N. and Choubey, V. 1977.** The shear strength of rock joints in theory and practice.

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

**Blanco, N.; Tomlinson, A. 2000.** Estudio Estratigráfico y sedimentológico del Distrito Minero El Tesoro. Informe interno VPRM-AMSA.

**Deere, D.U., Hendron, A.J., Patton, F.D. and Cording, E.J. 1967.** Design of surface and near surface construction in rock. In Failure and breakage of rock, proc. 8th U.S. symp. rock mech., (ed. C. Fairhurst), 237-302.

**Charrier, R; Pinto, L.; Rodríguez, M.P. 2007.** Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. In The Geology of Chile (Moreno, T; Gibbons, W.; editors). The Geological Society of London: 21-114.

**González, G., 2010.** Informe de Avance de Estudio de Estructuras en Caracoles, Informe Inédito, Antofagasta Minerals S.A., 13 p.

*ISRM Standard: Suggested Methods for Determining Point Load Strength-1985.*

**Marinos, P, and Hoek, E. 2000.** A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion.

**Marinovic, N.; García, M. 1999.** Hoja Pampa Unión, Región de Antofagasta. Escala 1:100.000, Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos, 9, Santiago.

**Mpodozis, C., Cembrano, J., Mora, R. 2009.** Deformación Compresiva-Oblicua Polifásica y Pórfidos Cupríferos Eocenos en el Sistema de Fallas de Domeyko: la Región de Esperanza-Caracoles (Distrito de Sierra Gorda). XII Congreso Geológico Chileno, Santiago, Resúmenes.

**Mpodozis, C., Marinovic, N., Smoje, I., Cuitiño, L. 1993.** Estudio geológico-estructural de la Cordillera de Domeyko entre Sierra Limón Verde y Sierra Mariposa, Región de Antofagasta. Escala 1:100.000: Santiago, Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería Chile, Informe Registrado, IR-93-04, 282 p., Santiago.

**Swaneck, T.; Torres, L.; Cáceres, S., 2010,** Geología y Modelamiento Geológico del Pórfido Caracoles. Informe interno VPRM-AMSA.

## **9 ANEXOS.**

Anexo 1 (CD): “Base de Datos Geotecnia Caracoles”

Anexo 2: (CD): “Base de Datos Geología”

Anexo 3 (CD): “Caracterización Unidades Lito-Geotécnicas”

Anexo 4: Tabla 5.3.11: Conversión de resistencia a la carga puntual a resistencia a la compresión simple.

## Anexo 4:

**Tabla: 5.3.1: Conversión de Resistencia a la carga puntual a Resistencia a la compresión simple.**

BHID	FROM	TO	DIÁMETRO	ENSAYO	RUPTURA	Is(50)	UCS=Is(50)*K
JVC-284	471,02	471,08	HQ	PLT	Matriz	0,09	1,9746
JVC-284	478,41	478,47	HQ	PLT	Matriz	0,09	1,9746
JVC-264	123,75	123,80	HQ	PLT	Matriz	0,14	3,0716
JVC-264	132,20	132,25	HQ	PLT	Matriz	0,14	3,0716
JVC-284	462,56	462,62	HQ	PLT	Matriz	0,14	3,0716
CV-4	260,42	260,48	HQ	PLT	Matriz	0,15	3,291
JVC-262	189,06	189,11	HQ	PLT	Matriz	0,15	3,291
JVC-264	125,70	125,75	HQ	PLT	Matriz	0,15	3,291
JVC-266	338,60	338,66	HQ	PLT	Matriz	0,15	3,291
SGTF-01	278,67	278,73	HQ	PLT	Matriz	0,15	3,291
CV-4	143,04	143,10	HQ	PLT	Matriz	0,19	4,1686
CV-4	228,51	228,57	HQ	PLT	Matriz	0,21	4,6074
JVC-262	139,39	139,45	HQ	PLT	Matriz	0,24	5,2656
JVC-284	488,21	488,27	HQ	PLT	Matriz	0,25	5,485
SGTF-01	278,60	278,66	HQ	PLT	Matriz	0,25	5,485
JVC-262	140,39	140,44	HQ	PLT	Matriz	0,26	5,7044
CV-4	143,10	143,16	HQ	PLT	Matriz	0,28	6,1432
SGTF-01	310,72	310,78	HQ	PLT	Matriz	0,28	6,1432
JVC-262	146,63	146,68	HQ	PLT	Matriz	0,30	6,582
JVC-262	193,15	193,21	HQ	PLT	Matriz	0,32	7,0208
JVC-262	134,14	134,20	HQ	PLT	Matriz	0,34	7,4596
JVC-262	160,75	160,80	HQ	PLT	Matriz	0,34	7,4596
JVC-264	124,65	124,70	HQ	PLT	Matriz	0,34	7,4596
CV-4	164,08	164,14	HQ	PLT	Matriz	0,35	7,679
CV-4	189,22	189,28	HQ	PLT	Matriz	0,35	7,679
JVC-273	191,72	191,78	HQ	PLT	Matriz	0,39	8,5566
JVC-262	138,75	138,81	HQ	PLT	Matriz	0,40	8,776
JVC-262	135,66	135,71	HQ	PLT	Matriz	0,41	8,9954
CV-4	181,02	181,08	HQ	PLT	Matriz	0,43	9,4342
CV-4	268,10	268,16	HQ	PLT	Matriz	0,49	10,7506
JVC-266	335,30	335,36	HQ	PLT	Matriz	0,49	10,7506
JVC-264	134,20	134,25	HQ	PLT	Matriz	0,50	10,97
JVC-273	240,78	240,84	HQ	PLT	Matriz	0,53	11,6282
JVC-273	209,59	209,65	HQ	PLT	Matriz	0,54	11,8476
JVC-273	209,23	209,29	HQ	PLT	Matriz	0,56	12,2864
JVC-262	174,10	174,15	HQ	PLT	Matriz	0,58	12,7252
JVC-262	140,17	140,22	HQ	PLT	Matriz	0,59	12,9446
CV-4	189,16	189,22	HQ	PLT	Matriz	0,60	13,164
JVC-273	191,45	191,51	HQ	PLT	Matriz	0,60	13,164
JVC-264	132,85	132,90	HQ	PLT	Matriz	0,64	14,0416
JVC-266	172,63	172,69	HQ	PLT	Matriz	0,66	14,4804
JVC-264	131,25	131,30	HQ	PLT	Matriz	0,69	15,1386
JVC-262	207,60	207,65	HQ	PLT	Matriz	0,76	16,6744
JVC-262	175,77	175,82	HQ	PLT	Matriz	0,80	17,552
CV-4	302,10	302,16	HQ	PLT	Matriz	0,81	17,7714

**Tabla 5.3.11: Conversión de Resistencia a la carga puntual a Resistencia a la compresión simple. (Cont.)**

BHID	FROM	TO	DIÁMETRO	ENSAYO	RUPTURA	Is(50)	UCS=Is(50)*K
JVC-262	165,30	165,35	HQ	PLT	Matriz	0,87	19,0878
CV-4	293,23	293,29	HQ	PLT	Matriz	0,88	19,3072
JVC-273	166,99	167,05	HQ	PLT	Matriz	0,90	19,746
CV-4	164,28	164,34	HQ	PLT	Matriz	0,94	20,6236
JVC-262	225,65	225,70	HQ	PLT	Matriz	0,94	20,6236
JVC-266	339,20	339,26	HQ	PLT	Matriz	0,94	20,6236
CV-4	197,40	197,46	HQ	PLT	Matriz	0,95	20,843
JVC-262	223,80	223,85	HQ	PLT	Matriz	0,96	21,0624
JVC-274	269,50	269,56	HQ	PLT	Matriz	0,96	21,0624
CV-4	157,40	157,46	HQ	PLT	Matriz	0,97	21,2818
JVC-262	218,84	218,89	HQ	PLT	Matriz	0,98	21,5012
JVC-262	166,31	166,36	HQ	PLT	Matriz	1,03	22,5982
JVC-262	215,70	215,75	HQ	PLT	Matriz	1,07	23,4758
JVC-264	127,20	127,25	HQ	PLT	Matriz	1,09	23,9146
CV-4	135,39	135,45	HQ	PLT	Matriz	1,11	24,3534
JVC-273	240,39	240,45	HQ	PLT	Matriz	1,13	24,7922
CV-4	293,43	293,49	HQ	PLT	Matriz	1,17	25,6698
CV-4	302,04	302,10	HQ	PLT	Matriz	1,17	25,6698
JVC-262	227,50	227,56	HQ	PLT	Matriz	1,18	25,8892
JVC-264	138,25	138,30	HQ	PLT	Matriz	1,21	26,5474
CV-4	157,34	157,40	HQ	PLT	Matriz	1,22	26,7668
CV-4	277,24	277,30	HQ	PLT	Matriz	1,22	26,7668
JVC-262	209,70	209,75	HQ	PLT	Matriz	1,22	26,7668
JVC-262	192,20	192,25	HQ	PLT	Matriz	1,24	27,2056
JVC-262	202,25	202,30	HQ	PLT	Matriz	1,26	27,6444
JVC-262	206,15	206,20	HQ	PLT	Matriz	1,26	27,6444
JVC-262	213,20	213,25	HQ	PLT	Matriz	1,26	27,6444
JVC-262	170,45	170,50	HQ	PLT	Matriz	1,27	27,8638
JVC-262	151,40	151,45	HQ	PLT	Matriz	1,29	28,3026
JVC-264	127,85	127,90	HQ	PLT	Matriz	1,30	28,522
JVC-262	200,40	200,45	HQ	PLT	Matriz	1,32	28,9608
JVC-262	190,92	190,97	HQ	PLT	Matriz	1,34	29,3996
JVC-273	166,60	166,66	HQ	PLT	Matriz	1,35	29,619
JVC-262	236,12	236,17	HQ	PLT	Matriz	1,37	30,0578
JVC-262	176,35	176,40	HQ	PLT	Matriz	1,39	30,4966
JVC-262	220,70	220,75	HQ	PLT	Matriz	1,41	30,9354
JVC-262	205,33	205,38	HQ	PLT	Matriz	1,42	31,1548
JVC-262	208,20	208,25	HQ	PLT	Matriz	1,42	31,1548
JVC-262	169,84	169,89	HQ	PLT	Matriz	1,43	31,3742
JVC-262	159,00	159,05	HQ	PLT	Matriz	1,45	31,813
JVC-262	204,20	204,25	HQ	PLT	Matriz	1,46	32,0324
JVC-266	174,40	174,46	HQ	PLT	Matriz	1,46	32,0324
JVC-262	160,60	160,65	HQ	PLT	Matriz	1,48	32,4712
JVC-262	180,60	180,65	HQ	PLT	Matriz	1,48	32,4712
CV-4	205,21	205,27	HQ	PLT	Matriz	1,49	32,6906
CV-4	268,16	268,22	HQ	PLT	Matriz	1,49	32,6906
JVC-262	228,88	228,93	HQ	PLT	Matriz	1,49	32,6906
JVC-262	201,80	201,85	HQ	PLT	Matriz	1,51	33,1294
JVC-264	143,20	143,25	HQ	PLT	Matriz	1,51	33,1294

**Tabla 5.3.11: Conversión de Resistencia a la carga puntual a Resistencia a la compresión simple. (Cont.)**

BHID	FROM	TO	DIÁMETRO	ENSAYO	RUPTURA	Is(50)	UCS=Is(50)*K
CV-4	285,79	285,85	HQ	PLT	Matriz	1,53	33,5682
JVC-262	211,42	211,47	HQ	PLT	Matriz	1,53	33,5682
JVC-262	241,65	241,70	HQ	PLT	Matriz	1,53	33,5682
JVC-262	239,40	239,45	HQ	PLT	Matriz	1,58	34,6652
JVC-262	166,92	166,97	HQ	PLT	Matriz	1,59	34,8846
JVC-262	157,65	157,71	HQ	PLT	Matriz	1,60	35,104
CV-4	135,59	135,65	HQ	PLT	Matriz	1,61	35,3234
JVC-262	238,45	238,50	HQ	PLT	Matriz	1,61	35,3234
JVC-262	181,70	181,75	HQ	PLT	Matriz	1,62	35,5428
SGTF-01	296,50	296,56	HQ	PLT	Matriz	1,62	35,5428
JVC-262	199,55	199,60	HQ	PLT	Matriz	1,64	35,9816
JVC-262	210,25	210,30	HQ	PLT	Matriz	1,65	36,201
JVC-262	234,95	235,00	HQ	PLT	Matriz	1,67	36,6398
CV-4	236,06	236,12	HQ	PLT	Matriz	1,69	37,0786
JVC-262	165,00	165,05	HQ	PLT	Matriz	1,72	37,7368
JVC-262	214,40	214,45	HQ	PLT	Matriz	1,72	37,7368
CV-4	228,31	228,37	HQ	PLT	Matriz	1,73	37,9562
JVC-262	153,15	153,20	HQ	PLT	Matriz	1,76	38,6144
SGTF-01	232,41	232,47	HQ	PLT	Matriz	1,76	38,6144
CV-4	212,40	212,46	HQ	PLT	Matriz	1,79	39,2726
JVC-262	189,84	189,89	HQ	PLT	Matriz	1,80	39,492
CV-4	285,73	285,79	HQ	PLT	Matriz	1,81	39,7114
JVC-262	173,70	173,75	HQ	PLT	Matriz	1,81	39,7114
CV-4	205,15	205,21	HQ	PLT	Matriz	1,83	40,1502
JVC-262	186,90	186,95	HQ	PLT	Matriz	1,83	40,1502
JVC-262	218,15	218,20	HQ	PLT	Matriz	1,84	40,3696
JVC-281	206,66	206,72	HQ	PLT	Matriz	1,84	40,3696
SGTF-01	310,79	310,85	HQ	PLT	Matriz	1,84	40,3696
CV-4	197,60	197,66	HQ	PLT	Matriz	1,92	42,1248
CV-4	236,00	236,06	HQ	PLT	Matriz	1,92	42,1248
SGTF-01	296,57	296,63	HQ	PLT	Matriz	1,92	42,1248
JVC-262	195,80	195,85	HQ	PLT	Matriz	1,94	42,5636
JVC-262	182,40	182,45	HQ	PLT	Matriz	1,95	42,783
JVC-262	155,44	155,49	HQ	PLT	Matriz	1,97	43,2218
CV-4	220,09	220,15	HQ	PLT	Matriz	1,98	43,4412
JVC-262	169,07	169,12	HQ	PLT	Matriz	1,98	43,4412
JVC-262	212,40	212,45	HQ	PLT	Matriz	1,99	43,6606
JVC-266	155,20	155,26	HQ	PLT	Matriz	2,00	43,88
JVC-262	195,38	195,43	HQ	PLT	Matriz	2,01	44,0994
CV-4	181,22	181,28	HQ	PLT	Matriz	2,03	44,5382
JVC-274	265,34	265,40	HQ	PLT	Matriz	2,08	45,6352
JVC-262	163,80	163,85	HQ	PLT	Matriz	2,12	46,5128
JVC-264	122,25	122,30	HQ	PLT	Matriz	2,25	49,365
SGTF-01	232,48	232,54	HQ	PLT	Matriz	2,33	51,1202
JVC-264	140,43	140,48	HQ	PLT	Matriz	2,45	53,753
JVC-262	182,90	182,95	HQ	PLT	Matriz	2,51	55,0694
JVC-262	199,85	199,90	HQ	PLT	Matriz	2,52	55,2888
JVC-262	178,80	178,85	HQ	PLT	Matriz	2,53	55,5082
JVC-274	198,62	198,68	HQ	PLT	Matriz	2,53	55,5082
JVC-281	248,00	248,06	HQ	PLT	Matriz	2,54	55,7276
JVC-264	139,62	139,67	HQ	PLT	Matriz	2,78	60,9932

**Tabla 5.3.11: Conversión de Resistencia a la carga puntual a Resistencia a la compresión simple. (Cont.)**

BHID	FROM	TO	DIÁMETRO	ENSAYO	RUPTURA	Is(50)	UCS=Is(50)*K
JVC-266	152,19	152,25	HQ	PLT	Matriz	2,78	60,9932
JVC-264	141,83	141,88	HQ	PLT	Matriz	2,81	61,6514
JVC-262	163,00	163,05	HQ	PLT	Matriz	2,89	63,4066
JVC-266	157,04	157,10	HQ	PLT	Matriz	2,96	64,9424
JVC-264	142,45	142,50	HQ	PLT	Matriz	2,98	65,3812
JVC-266	147,17	147,23	HQ	PLT	Matriz	3,05	66,917
JVC-274	265,13	265,19	HQ	PLT	Matriz	3,21	70,4274
JVC-274	199,25	199,31	HQ	PLT	Matriz	3,26	71,5244
JVC-274	212,58	212,64	HQ	PLT	Matriz	3,35	73,499
JVC-273	149,39	149,45	HQ	PLT	Matriz	3,44	75,4736
JVC-266	150,41	150,47	HQ	PLT	Matriz	3,48	76,3512
CV-4	310,41	310,47	HQ	PLT	Matriz	3,58	78,5452
JVC-228	142,51	142,58	HQ	PLT	Matriz	3,69	80,9586
JVC-274	213,02	213,08	HQ	PLT	Matriz	3,76	82,4944
CV-4	310,61	310,67	HQ	PLT	Matriz	3,93	86,2242
JVC-228	138,85	138,91	HQ	PLT	Matriz	4,05	88,857
JVC-273	224,06	224,12	HQ	PLT	Matriz	4,09	89,7346
JVC-281	237,26	237,32	HQ	PLT	Matriz	4,15	91,051
JVC-266	148,70	148,76	HQ	PLT	Matriz	4,19	91,9286
JVC-228	138,60	138,66	HQ	PLT	Matriz	4,37	95,8778
JVC-281	237,48	237,54	HQ	PLT	Matriz	4,58	100,4852
JVC-274	168,45	168,51	HQ	PLT	Matriz	4,67	102,4598
JVC-273	148,38	148,44	HQ	PLT	Matriz	4,93	108,1642
JVC-274	168,66	168,72	HQ	PLT	Matriz	6,04	132,5176
JVC-266	209,23	209,28	HQ	PLT	Matriz	8,28	181,6632