



## CLASIFICACIÓN EN BASE AL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DE LAS ROCAS EN LA PERFORACIÓN DE SONDAJES DIAMANTINOS.

**Miguel Enrique Manuel Rivera Vega.**

**Profesor Guía:** Msc. Abraham Elías González Martínez.  
**Profesores Comisión:** Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra.  
Dr. Luis Arturo Héctor Quinzio Sinn.

### Resumen

El Macizo Rocoso posee comportamientos distintivos asociados a las características geológicas y geotécnicas que influyen en el desempeño durante la perforación de sondajes. Si se logra predecir con anticipación este comportamiento, es posible planificar el método y tipo de herramientas a utilizar antes de iniciar la perforación, lo cual impactará positivamente en el rendimiento de los equipos.

Para predecir el desempeño que tendrá el avance durante la operación, se realiza el ingreso de la información Geológica y Geotécnica a partir de protocolos de mapeo que tienen como fin unificar los mapeos realizados por cada geólogo y así poder proyectarlos en un modelo de bloques, guía en el proceso de explotación minera. Con la data obtenida, se hace un Análisis Exploratorio de Datos (AED) para cruzar toda la información capturada con la Velocidad de Avance de perforación, permitiendo establecer el rendimiento en los tramos de sondaje analizados, con el fin de determinar el factor de mayor influencia en el comportamiento de las rocas.

El AED determinó, a grandes rasgos, que el factor de mayor incidencia corresponde al Índice Geológico de Resistencia (GSI), debido a que incorpora en su análisis características geológicas y geotécnicas en la estimación del macizo rocoso.

**Palabras Claves:** Perforación, Geotecnia, Mapeo y Macizo Rocoso.

### 1. Introducción

La perforación de sondajes es utilizada para diversos fines en la Geología, ya sea para motivos exploratorios y/o productivos. Es posible definirla como el proceso de intervenir el subsuelo con el fin de descubrir y proyectar el conocimiento geológico que disponemos en profundidad, para determinar, expandir y/o descubrir un potencial prospecto, con el objetivo de efectuar una evaluación final y, posterior extracción de los recursos naturales.

Además, sirve como herramienta clave que permite ampliar la geometría de los depósitos, con sus respectivos datos estructurales, jugando un rol de guía para poder estimar los volúmenes de mineral presentes en el sistema para su futura extracción. El lograr determinar el o los factores de mayor influencia en el comportamiento que tendrán las distintas unidades litológicas durante la perforación de sondajes diamantinos, se traducirá en un beneficio de disminución de tiempo y mayor rendimiento de las herramientas a utilizar durante la operación.

El área de estudio, se sitúa en la Cordillera Domeyko, al sureste de la ciudad de Antofagasta, Región de Antofagasta, entre las coordenadas 24°

11' 15"-24° 12' 50" de latitud Sur y 69° 06' 30" -69° 08' 15" de Longitud Oeste (Figura 1.1).



Figura 1.1: Ubicación y accesos del área de estudio.

### 1.1. Objetivo General

El estudio se encuentra orientado a poder definir relaciones geológicas y geotécnicas que influyen en la perforación de sondajes diamantinos de producción.

### 1.2. Objetivos Específicos

- Establecer similitudes de variables geológicas-geotécnicas que aporten información de apoyo durante el proceso de perforación.
- Identificar un parámetro, mediante análisis exploratorio de datos, que sea predictivo sobre el comportamiento que tendrá la perforación, con el fin de optimizar los tiempos, mejorando, a su vez, las velocidades de avance y la elección de las herramientas a utilizar.
- Desarrollar una Matriz de Competencia predictiva del comportamiento que tendrá el macizo rocoso al proceso de perforación, en un

parámetro de fácil comprensión que sea entregado a modo de guía para los operadores durante la operación.

## 2. Marco Geológico

La zona de análisis se encuentra inserta en un ambiente predominantemente volcánico e ígneo y un dominio estructural controlado en gran parte por el Sistema de Fallas de Domeyko (SFD). Se reconocen unidades volcano-sedimentarias con edades que fluctúan entre el Paleozoico Superior a Cenozoico, correspondientes a las formaciones La Tabla y Augusta Victoria (García, 1967), El Profeta y Pampa de Mulas (Chong, 1973) y Santa Ana (Naranjo y Puig, 1984). En general, se conforman por lavas, brechas y aglomerados, de composición basáltica a riolítica y secuencias sedimentarias de lutitas y areniscas, calizas y margas, con abundantes fósiles en algunos horizontes y una gran cobertura de gravas. Las rocas intrusivas paleozoicas corresponden a granitoides y pórfidos de composición riolítica a dacítica asignados al Carbonífero-Pérmico, según dataciones radiométricas de K/Ar y U/Pb que arrojaron edades de 277 y 273 Ma (Marinovic y otros, 1995). Durante el lapso Triásico Superior-Cretácico Inferior se emplazaron plutones cuyas dataciones K/Ar revelaron edades entre 207 y 227 Ma, y Rb/Sr de 217±4 Ma y 227±8 Ma. Posteriormente, una deformación compresiva ocurrida en la parte baja del Cretácico Superior, dio origen al fuerte plegamiento que afecta las secuencias marinas y continentales del Triásico Superior al Cretácico Inferior; asociada con ésta se registra una significativa actividad magmática a lo largo de la vertiente occidental de la Cordillera Domeyko formando, el Arco Magmático del Cretácico Superior-Eoceno (Maksaev, 1990), el cual está compuesto por rocas plutónicas e hipabisales de características monzoníticas, monzodioríticas y monzogábricas. La zona de análisis es posible definirla como un depósito de tipo pórfido cuprífero enriquecido en molibdeno y oro, el cual se encuentra inserto en la franja metalogénica del Eoceno superior-Oligoceno inferior en Chile (Figura 2.1, fuera del texto).

Localmente se distinguen las siguientes unidades litológicas:

**Andesitas:** pertenecen a la Formación Augusta Victoria (García, 1967) de edad Cretácico Superior-Eoceno. Corresponden a lavas de composición andesítica entre las que se pueden distinguir andesitas afaníticas, microporfídicas, brechas volcánicas andesíticas y andesitas porfídicas.

**Pórfido Granodiorítico:** posee textura porfídica seriada de tres generaciones de cristales, compuesta por “ojos” de cuarzo subredondeados, fenocristales de plagioclasas subhedrales a euhedrales y “books” de biotitas; con una masa fundamental felsosídica y cuya edad aproximada es  $37,5 \pm 0,4$  Ma en base a dataciones U/Pb.

**Pórfido Granodiorítico de Anfíbol:** de composición granodiorítica a monzodiorítica con textura porfídica inequigranular; fenocristales de plagioclasa, feldespato potásico, biotita, pseudomorfos de hornblenda y cuarzo; en una masa fundamental felsosídica. Dataciones U/Pb establecen una edad de  $35,5 \pm 0,5$  Ma.

**Pórfido Riodacítico:** de textura porfídica seriada con fenocristales de plagioclasa y cristales de cuarzo cuyos tamaños alcanzan hasta los 3 mm, y masa fundamental felsosídica. Intruye al Pórfido Granodiorítico y está en contacto por intrusión y falla con las andesitas, además es cubierto en inconformidad con la Unidad de Gravas. La edad es de  $36,9 \pm 0,46$  Ma según dataciones U/Pb.

**Domo Riodacítico:** su textura es porfídica con fenocristales de plagioclasa fragmentados y embahados y abundantes fenocristales de cuarzo anhedral a euhedral. La masa fundamental es de composición felsosídica, cuya textura puede ser variable entre afanítica y fanerítica fina. Dataciones U/Pb establecen una edad entre los  $35,1 \pm 0,46$  Ma y 34,3 Ma.

Además, afloran algunas brechas tectónicas, hidrotermales e ígneas.

Las alteraciones se agrupan en cuatro etapas:

**Tardimagmática:** asociada con fases tempranas y de mayor temperatura del emplazamiento de los pórfidos, se genera en profundidad un núcleo potásico, el que hacia los bordes y superficie grada a un halo de propilitico. Este núcleo se encuentra

conformado por feldespato potásico, biotita, sericita y anhidrita. Producto de esta asociación, la alteración ha sido dividida en: Alteración Potásica, en base a la presencia de feldespato potásico y Alteración Biotítica, constituida sólo de biotita secundaria, además, se incluye la alteración Sericita Gris Verde la cual produce una fuerte hidrólisis en los arreglos mineralógicos generados más temprano en el sistema, principalmente sobre biotita y feldespato potásico secundario.

A medida que el sistema evoluciona la temperatura baja y éste comienza a interactuar con aguas meteóricas, formándose dos alteraciones principales que corresponden, en primer lugar, a la **etapa de Transición** que es desarrollada en zonas más profundas caracterizada por la asociación mineralógica de clorita-sericita-arcillas y, en segundo lugar, a medida que el sistema continua evolucionando, la **etapa Hidrotermal Principal**, constituida por cuarzo-sericita-arcillas en zonas más superficiales. Durante las últimas etapas de actividad, asociada a un sistema epitermal de alta sulfidación, se da paso a la **etapa Hidrotermal Tardía**, conformada por las alteraciones argílica avanzada y argílica supérgena que se superponen a las alteraciones anteriormente descritas.

Los procesos de lixiviación y enriquecimiento supérgeno (aproximada 14 Ma) generaron un típico perfil vertical de un yacimiento de pórfido cuprífero, en donde se pueden distinguir seis zonas mineralógicas: **zona lixiviada**, situada principalmente en las partes altas del yacimiento cuya mineralogía consiste en limonitas como hematita, jarosita y gohetita; **zona de óxidos de cobre**, constituida principalmente por brocantita-antlerita y, en forma subordinada, es posible encontrar crisocola, libetenita, atacamita, pseudomalaquita, malaquita, copper wad-pitch, arcillas de cobre, cuprita y cobre nativo; **zona de mixtos**, definida por la coexistencia de oxidados de cobre y hierro con sulfuros de cobre tanto primarios como secundarios de calcosina, covelina, calcopirita y piritita; **zona de lixiviación parcial**, determinada por óxidos de hierro (limonitas) mezclados con sulfuros de cobre y hierro oxidados parcialmente “*in situ*”; **zona de enriquecimiento secundario**, caracterizada por la presencia en

forma masiva de sulfuros de cobre como calcosina y covelina pudiendo estar acompañada de calcopirita en profundidad; y **zona primaria**, formada principalmente por pirita-calcopirita y cantidades variables de bornita, molibdenita y magnetita.

### 3. Metodología de Trabajo

El desarrollo del estudio comprende la captura de información desde sondajes y análisis estadísticos hasta la generación de Parámetros de Comportamiento, para ello se establecen dos etapas de trabajo.

#### 3.1. Captura de Información

En primera instancia, se debe ingresar toda la información disponible a partir del proceso de mapeo Geológico-Geotécnico de sondajes, mediante *software* Acquire. Para ello se seleccionaron diez sondajes diamantinos que abarcan un total de 4.354 m para cada parámetro de estudio.

#### 3.2 Procesamiento de Información

Con la información capturada a partir del mapeo de sondajes, en base a los protocolos de mapeo de infill, mediante A.E.D. (análisis exploratorios de datos) se procede a realizar el cruce de las variables geológicas, geotécnicas y de velocidades de perforación, con el fin de poder determinar el parámetro de mayor incidencia durante el avance de la operación.

Una vez identificado dicho parámetro, se procederá a generar una Matriz de Competencia, que logre resumir e inferir el comportamiento que tendrá la perforación ante las características que poseen las distintas unidades de roca y que, además, sea de fácil acceso y comprensión por parte del operador, con el fin de establecer un Dominio de Perforación.

### 4. Resultados

Al realizar el procesamiento de la información obtenida, a partir del cruce de la información Geológica-Geotécnica vs Velocidad de Perforación, obtenida a partir de los metros perforados y tiempos efectivos de perforación registrados en el *software* Acquire, permite establecer el

rendimiento en los distintos tramos de sondajes analizados, con el fin de lograr determinar el factores que tenga mayor incidencia en el comportamiento del macizo rocoso durante el proceso de perforación de sondajes diamantinos.

A través del análisis exploratorio de datos (A.E.D.) es posible obtener dichas relaciones, además, cabe destacar que solo se incluirán en el estudio aquellas correlaciones que permitieron establecer una interpretación rápida y fácil de enlazar y comprender para las distintas variables analizadas, las cuales se muestran a continuación.

#### 4.1. Litología

Al observar el gráfico proyectado (Figura 4.1), es posible identificar una tendencia negativa en las velocidades de avance, donde, las unidades de mayor velocidad de perforación corresponden a Gravas y Brechas, principalmente tectónicas e hidrotermales, las cuales pueden ser agrupadas en base a un comportamiento blando.

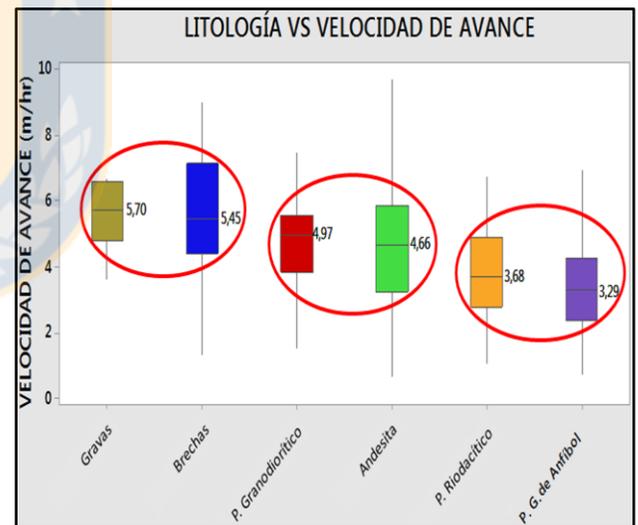


Figura 4.1: Gráfico de Litología vs Velocidad de Avance.

Las litologías correspondientes a Andesita y Pórfido Granodiorítico pueden ser consideradas como otra asociación de unidades, debido a que tienen velocidades similares con una tendencia media de avance; mientras que el último grupo está caracterizado por las litologías más resistentes al proceso de perforación, conformadas por la asociación de Pórfido Riodacítico y Pórfido Granodiorítico de Anfíbol, que corresponden a rocas tardías de mayor dureza.

## 4.2 Alteración

La gráfica generada para esta variable (Figura 4.2), permite visualizar cuales son las alteraciones que producen mayor y menor resistencia durante el proceso de perforación. Las Gravas inalteradas presentan las velocidades más altas, mientras que las alteraciones clorítica, filica y potásica tienen un rango intermedio siendo casi homogéneo en sus velocidades, permitiendo agruparlas en un solo conjunto. Por otro lado, el gráfico permite inferir que la alteración sericita gris verde tiene mayor resistencia durante la perforación que aquellas anteriormente nombradas.

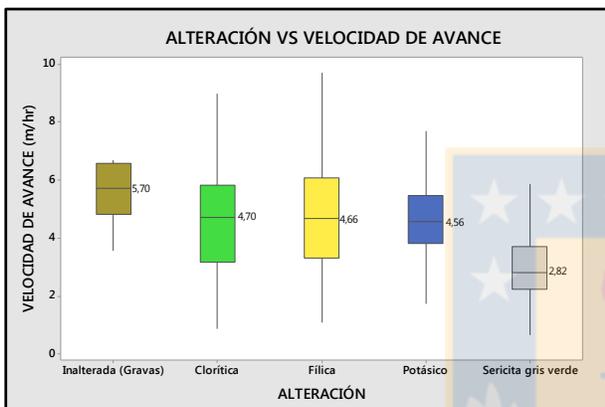


Figura 4.2: Gráfico de Alteración vs Velocidad de Avance.

## 4.3. Mineralización

Es posible identificar una disminución en las velocidades de avance, donde la secuencia Sin Mineralización-Oxidados. de Cu-Mixtos (Mezcla de oxidados de cobre+sulfuros)-Lixiviado puede ser considerada como un solo grupo, ya que mantiene un comportamiento similar en sus velocidades, caracterizándose por ser menos resistente durante la perforación.

El segundo grupo, se establece para las zonas con mineralización de Alto Enriquecido-Bajo Enriquecido, cuyas velocidades de avance pueden ser consideradas intermedias. Para finalizar, la mineralización Primaria correspondería al último grupo, caracterizado por tener mayor resistencia.

Respecto a lo anterior, existe una relación directa con la profundización de los sondajes, comenzando con una zona de mineralización oxidada afectada por procesos supérgenos, hasta alcanzar la presencia de sulfuros, bajo el nivel freático,

asociados a zonas de mayor dureza, más resistentes al avance de la perforación (Figura 4.3).

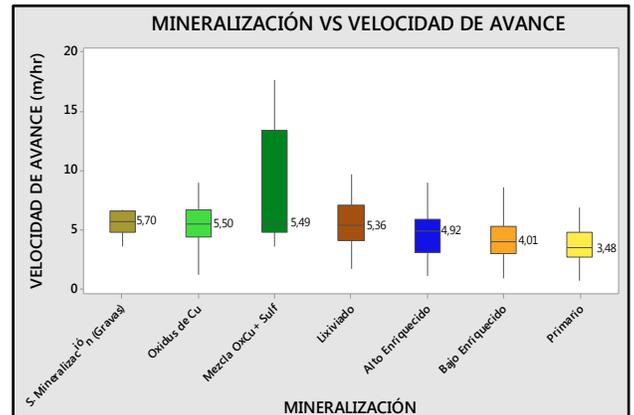


Figura 4.3: Gráfico de Mineralización vs Velocidad de Avance.

## 4.4. Litología-Alteración

El gráfico obtenido para esta asociación permite identificar una tendencia de perforación más marcada, el cual permite establecer la asociación tres grupos (Figura 4.4).

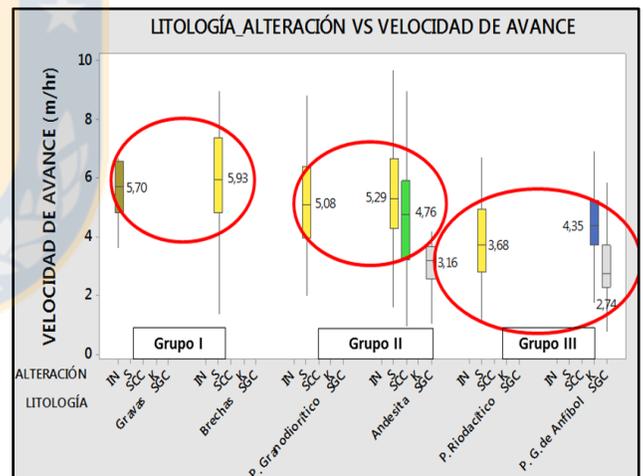


Figura 4.4: Gráfico de Litología-Alteración vs V de Avance.

Las rocas afectadas por la alteración filica son perforadas con mayor facilidad, debido a que generan distintas intensidades de degradación, sobre todo cuando se encuentran acompañadas de arcillas, que afecta la textura y composición original de las distintas unidades litológicas, esto hace que disminuya la dureza de ellas; mientras que las unidades con alteración clorítica son más resistentes al avance de la perforación dado que no generan un cambio significativo en la competencia de las rocas.

Las litologías con mayor resistencia a la velocidad de avance son aquellas afectadas por las alteraciones sericita gris verde y potásica, porque su desarrollo se produce a mayor profundidad y altas temperaturas, provocando que las unidades conserven su alta dureza y, por ende, sean más resistentes al proceso de perforación.

#### 4.5. GSI-Velocidad de Avance

A partir de la clasificación del Índice Geológico de Resistencia, se utiliza la abreviación para cada tipo de comportamiento Geotécnico de los macizos rocosos definidos, con el fin de simplificar la terminología al momento de proyectar la data total en los distintos gráficos a analizar (Figura 4.5). Los datos considerados para el análisis corresponden solo a aquellas variables con suficiente información registrada, cuya cantidad sea representativa del universo de datos en estudio.

CRITERIO MODIFICADO HOEK & BROWN		CONDICIÓN DE LA SUPERFICIE DE FRACTURAS				
$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + 1 \right)^2$ <p> <math>\sigma_1</math> = Tensión efectiva principal mayor  <math>\sigma_3</math> = Tensión efectiva principal menor  <math>\sigma_c</math> = Resistencia compresiva uniaxial de trozos de roca intactos  <math>m_b</math>, <math>a</math> y <math>b</math> son constantes que dependen de las condiciones de composición, estructura y superficies del macizo rocoso         </p>		MUY BUENA Superficie muy rugosa, sin meteorización	BUENA Superficie rugosa, escasamente meteorizada, con palmas de ondulados de hierro	MODERADA Superficie suave, moderadamente meteorizada o alisada	MALA Superficie muy lisa, fuertemente meteorizada, con revestimiento compacto o relleno que contiene fragmentos de roca angulosos	MUY MALA Superficie muy lisa, fuertemente meteorizada, con revestimiento o relleno de arcilla blanda fragmentos de roca angulosos
ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO		B/MG	B/G	B/F	B/P	
	FRACTURAMIENTO EN BLOQUES (BLOCKY) - El macizo rocoso muy bien entrelazado, no disociado, constituido de bloques cúbicos, formados por tres sets de discontinuidades ortogonales.			5,46		
	FUERTE FRACTURAMIENTO EN BLOQUES (VERY BLOCKY) - El macizo rocoso entrelazado, parcialmente disociado, con bloques angulosos formados por cuatro o más sets de discontinuidades.	VB/MG	VB/G	4,15	VB/P	
	FRACTURAMIENTO EN BLOQUES CON FALLAMIENTO (BLOCKY / SEMI) - El macizo rocoso deformado y fallado con muchas intersecciones que forman bloques angulosos		BS/G	3,94	BS/P	
	TRITURADO (CRUSHED) - El macizo rocoso escasamente entrelazado, fuertemente quebrado, con una mezcla de bloques angulosos y redondeados.		C/G	C/F	C/P	

Figura 4.5: Nomenclatura en base al índice del GSI incluye V. de Avance (m/hr) para la intersección de los macizos.

Al observar el gráfico generado, permite identificar de forma rápida una tendencia marcada en el incremento de la velocidad de avance a medida que aumenta la calidad del macizo. Es posible determinar la formación de tres grupos de GSI a partir de los distintos quiebres producidos por las asociaciones de las variaciones de velocidades para cada grupo de macizo rocoso (Figura 4.6)

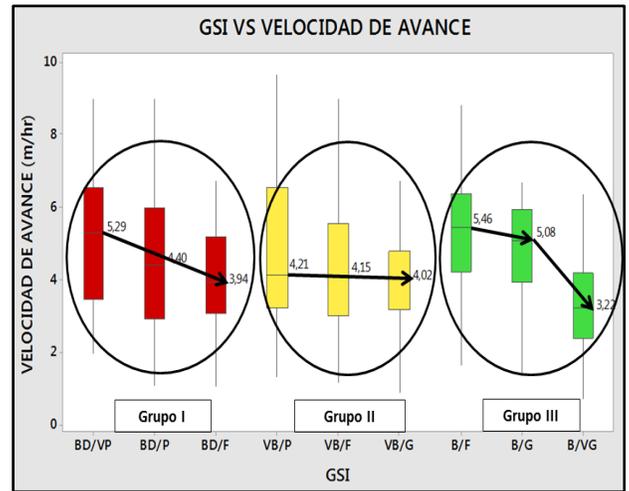


Figura 4.6: Gráfico GSI vs Velocidad de Avance.

## 5. Discusión

Los gráficos analizados permiten establecer relaciones y tendencias respecto al comportamiento durante la perforación; cada variable analizada de forma individual no representa a cabalidad el universo de datos, por ejemplo, la velocidad de avance para una andesita con alteración fílica, será distinta a la obtenida para un pórfido granodiorítico con la misma alteración. Esto se debe a que la resistencia de esta última será mayor por ser una roca de composición intermedia. Por otro lado, la gráfica obtenida de alteración refleja que para una alteración fílica, la velocidad de avance es menor que para una alteración clorítica, a pesar de generar mayor daño en las distintas unidades, sobre todo en aquellas con más contenido de máficos, como es el caso de la Andesita, sin embargo, la gráfica se ve sesgada, ya que incorpora a la unidad correspondiente a pórfido riocácítico que es de composición más ácida y, en consecuencia, de mayor resistencia al proceso de perforación, disminuyendo, de esta forma, la velocidad para este tipo de alteración. Por esta razón, se realizaron combinaciones entre los distintos parámetros descritos, con el fin de poder realizar un trabajo más detallado que permita eliminar el sesgo anteriormente descrito.

A partir del gráfico de Litología-Alteración vs Velocidad de Avance (Figura 4.4) y en base a la similitud de velocidades identificadas para las variables de Litología-Alteración, se establecen tres grupos:

**Grupo I:** corresponde a la zona blanda de mayor velocidad de perforación. Se encuentra constituida por Gravas y Brechas, principalmente hidrotermales y tectónicas. Si bien las gravas se presentan inalteradas, generalmente se observan poco compactas con alta intensidad de degradación y fracturamiento, a su vez, las brechas se encuentran en su mayoría afectadas por zonas de debilidad que favorecen la alteración fílica con contenidos de arcillas, impactando de manera positiva en el avance de la perforación.

**Grupo II:** el Pórfido Granodiorítico, por tener composición intermedia con contenidos variables de cuarzo y feldespato, permite que la estabilidad de los minerales sea más propensa a resistir las distintas alteraciones que puedan afectar la competencia de la roca, por ende, genera una velocidad de avance intermedia al momento de perforar. El caso contrario se encuentra representado por Andesitas con alteración clorítica que tienen menor velocidad de perforación que el Pórfido Granodiorítico, debido a que las andesitas poseen altos contenidos de máficos, por lo que son más susceptibles a disminuir su dureza al ser afectadas por alteraciones del tipo sericítico, con o sin arcillas, comportándose, respecto a la dureza, de manera más favorable cuando son afectadas por la alteración fílica que el Pórfido Granodiorítico durante la perforación. Este grupo conforma la zona compacta blanda de perforación moderada.

**Grupo III:** la menor velocidad de avance se produce en el Pórfido Granodiorítico de Anfíbol y Andesitas afectadas por las alteraciones sericita gris verde y potásica, las cuales se generan en profundidad, a altas temperaturas, con bajo grado de fracturamiento y cuya competencia-dureza es significativamente alta, lo que se traduce en una disminución considerable de la velocidad al momento de perforar. Por otro lado, el Pórfido Riodacítico también es parte de las unidades de menor velocidad de avance, debido a que es una roca de composición ácida con altos contenidos de cuarzo, lo que le otorga mayor resistencia durante el proceso de perforación. Corresponde a la zona compacta dura de menor velocidad de avance.

A partir de los grupos generados, en base a las relaciones determinadas por las velocidades de

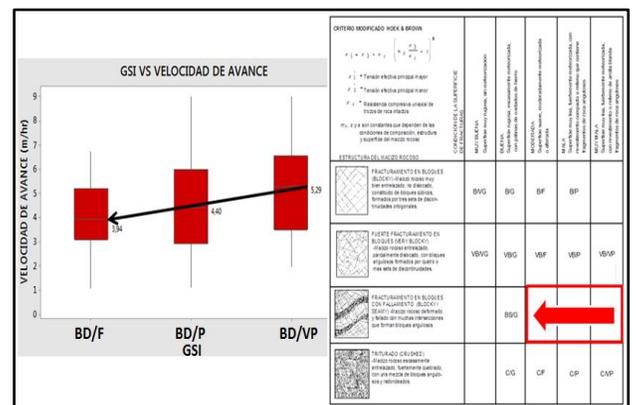
perforación, se genera una propuesta de Matriz de Competencia (Figura 5.1), la cual indica de manera simplificada las zonas de mayor y menor resistencia durante la perforación.



**Figura 5.1:** Matriz de Competencia para la asociación Litología-Alteración-Velocidad de Avance.

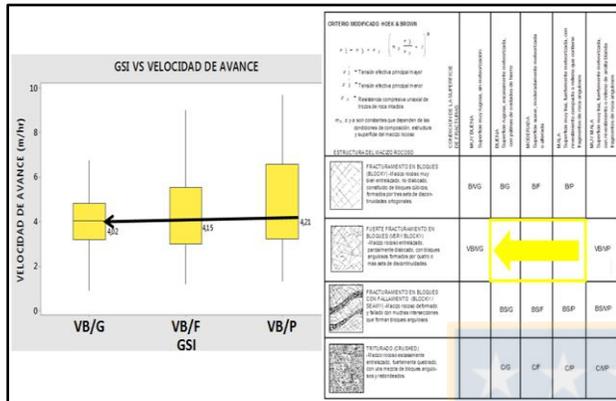
Por otro lado, para la variable geotécnica correspondiente a GSI, a partir del gráfico generado de GSI vs Velocidad de Avance (Figura 4.6), también es posible establecer tres grupos en base a los rangos y quiebres de ésta, los cuales se describen a continuación.

**Grupo GSI (I):** incluye a los macizos rocosos correspondientes a Fracturamiento en bloques con Fallamiento muy malo, malo y moderado. Se caracterizan principalmente por ser macizos deformados y fallados con muchas intersecciones que forman bloques angulosos, además, las fracturas se encuentran desde moderada a fuertemente meteorizadas con superficies lisas y rellenos blandos y/o compactos (Figura 5.2).



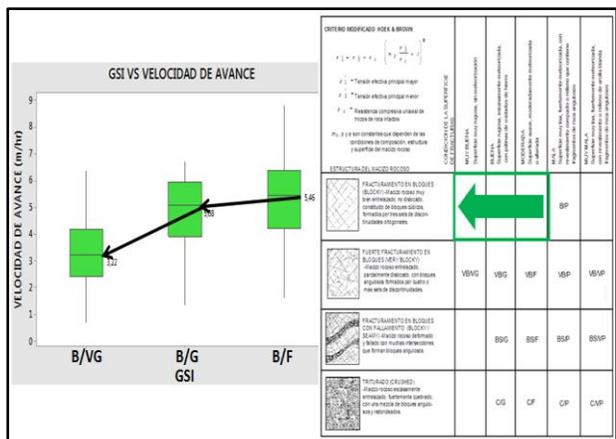
**Figura 5.2:** Grupo GSI "I". Permite visualizar la asociación para el macizo con Fracturamiento en bloques con Fallamiento.

**Grupo GSI (II):** corresponde al Macizo rocoso clasificado como Fracturamiento Fuerte en bloques malo, moderado y bueno, los cuales se observan entrelazados, parcialmente dislocados, con bloques angulosos, formados por cuatro o más sets de discontinuidades, cuyas fracturas tienen grados de meteorización variable, con patinas de oxidados de hierro y rellenos compactos, que pueden contener fragmentos de rocas (Figura 5.3).



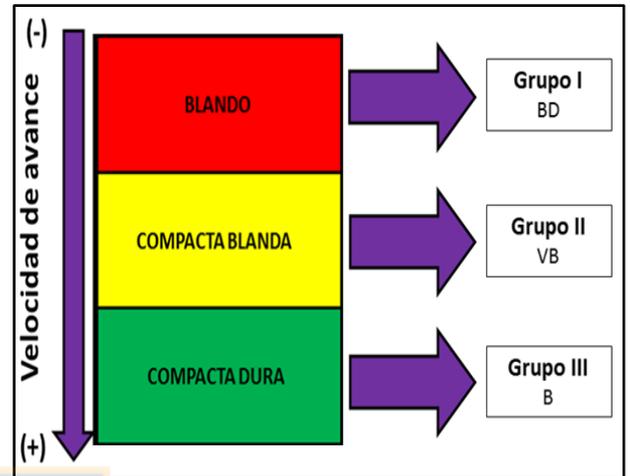
**Figura 5.3:** Grupo GSI "II". Muestra la agrupación generada para el macizo con Fracturamiento Fuerte en bloques.

**Grupo GSI (III):** conformado por el macizo rocoso definido como Fracturamiento en bloques moderado, bueno y muy bueno. Corresponden a macizos rocosos muy bien entrelazados, no dislocados, constituidos de bloques cúbicos, generados por tres sets de discontinuidades ortogonales. Se caracterizan por tener superficies principalmente rugosas a suaves, con alteración moderada a inalteradas (Figura 5.4).



**Figura 5.4:** Grupo GSI "III". Permite identificar la asociación para el macizo con Fracturamiento en bloques.

A partir de los grupos descritos, se establece una propuesta de Matriz de Competencia (Figura 5.5) obtenida en base a los gráficos generados, con el fin de simplificar las zonas de mayor y menor resistencia a la perforación.



**Figura 5.5:** Matriz de Competencia para la asociación GSI – V. de Avance. Indica el desglose de las unidades que forman las zonas de perforación.

**Grupo I:** la baja calidad del macizo asociado a una alta meteorización y rellenos arcillosos, principalmente blandos, dificultan el avance de la perforación debido a que son rocas blandas, con muy baja compactación y alto grado de fracturamiento, además, los porcentajes de recuperación disminuyen por la mala calidad y baja estabilidad de la roca. Constituye el grupo de menor velocidad de avance.

**Grupo II:** se produce un quiebre asociado a un aumento en el avance de la perforación, ya que, la sonda se encuentra perforando mezclas de rocas, cuya compactación es principalmente moderada a dura, con algunas zonas de estructuras blandas, lo cual aumenta la competencia y estabilidad del macizo en relación al Grupo I, favoreciendo de esta forma la velocidad durante la operación. Conformando el grupo de avance medio de perforación.

**Grupo III:** se observa un quiebre abrupto relacionado con la disminución en la velocidad de perforación en la transición del macizo Fracturamiento en Bloques moderado y bueno al macizo Fracturamiento en bloques muy bueno, debido a la alta competencia y bajo fracturamiento de la roca, además, está constituido por más de un

90% de Pórfido Granodiorítico de Anfíbol con alteración Sericita Gris Verde, lo cual se traduce en una mayor dureza y resistencia al avance en comparación a las altas velocidades de los macizos del mismo grupo. Constituye el grupo de mayor velocidad de avance.

También es posible analizar de forma “individual” el comportamiento dentro de cada grupo de macizo en base a las velocidades de rotación (Figura 5.6).

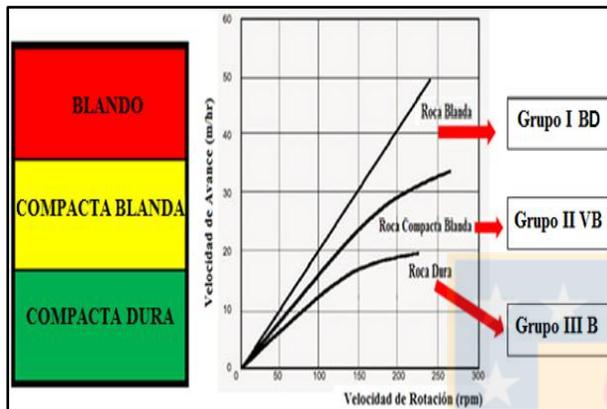


Figura 5.6: Gráfico de V. de Rotación vs. V. de Avance. Se observan las pendientes para cada grupo GSI (Tomado de I. Geológico y Minero de España).

Para rocas blandas la velocidad de avance es directamente proporcional a la velocidad de rotación, conformando una relación lineal entre ambas, la cual aumenta a mayores revoluciones por minuto, correlacionable con el grupo Grupo I. Esto es explicado debido al bajo porcentaje de recuperación del testigo al situarse en terrenos de baja calidad como las Gravas.

En rocas de carácter compacto blando la velocidad de avance también aumenta a mayores velocidades de rotación. Se observa una pendiente suave concordante al Grupo II, provocada por tener mayor competencia y dureza que el Grupo I.

Para rocas duras, la velocidad de perforación tiene un *peak* a partir del cual se mantiene constante, por lo tanto, no es favorable utilizar altas velocidades de rotación, ya que el avance tiende a disminuir considerablemente. Es por ello, que el operador debe lograr un equilibrio aprox. entre los 50-100 rpm al momento de perforar estos macizos.

## 6. Conclusiones

Al realizar el Análisis Exploratorio de Datos, cruzando las velocidades de avance con las distintas variables de estudio, permite establecer que la relación de GSI-Velocidad de Avance es más contundente al momento de generar un modelo guía básico para optimizar el rendimiento y, además, refleja las condiciones reales de terreno a las cuales se enfrenta el perforista al momento de abordar la perforación de sondajes diamantinos, ya que, establece una relación directa entre las características estructurales de las rocas junto con la información del estado geológico de éstas. Si bien, los factores geológicos por si solos permiten establecer modelos de optimización en el avance de la perforación, no reflejan a cabalidad las condiciones óptimas de terreno, sobre todo al situarse sobre terrenos mal consolidados (Gravas y Brechas tectónicas) que dificultan el avance de la perforación, ya que, posicionan estas unidades como las de mejor velocidad de avance. Mediante el análisis de GSI, se establece que el macizo con Fracturamiento en Bloques con Fallamiento es el menos favorable durante el avance de la perforación debido a estar asociado a altos grados de meteorización y fracturamiento, con rellenos arcillosos, generando bajos porcentajes de recuperación, menos retorno de fluidos y mayor entrapamiento de las sondas, además, la baja competencia de las rocas, especialmente en Gravas, provoca que las paredes del pozo sean más propensas a colapsar, por lo cual, es necesario mayor cantidad de tiempo en asegurar la estabilidad del sondaje, por lo tanto, se recomienda al operador utilizar series bajas de coronas impregnadas, iguales o inferiores a 6, al momento de perforar, o coronas Insertadas utilizadas generalmente en rocas blandas, no consolidadas, durante el inicio de pozos.

La velocidad de avance intermedia se produce en macizos Fuertemente Fracturados en Bloques, los cuales se encuentran compactos asociados con zonas de estructuras blandas subordinadas, aumentando la competencia y estabilidad, además, los set de fracturas que conforman el macizo facilitan el avance de la perforación a medida que disminuye su calidad, se recomienda emplear

durante el proceso serie de corona impregnada número 7.

La mayor velocidad de perforación se observa en aquellos macizos con Fracturamiento en Bloques situados principalmente en zonas de mayor profundidad con nula interacción de procesos supérgenos. Caracterizado por tener alta competencia y bajo fracturamiento, lo cual otorga una gran estabilidad al operador al momento de perforar, además, la velocidad aumenta a medida que disminuye la calidad de las fracturas asociadas. Es recomendable perforar este tipo de macizo con series altas de coronas impregnadas, idealmente 8 o superiores, con velocidades de rotación continua aproximadamente entre 50-100 rpm al momento de perforar estos macizos rocosos.

La velocidad para el macizo Fracturado/Perturbado moderado es relativamente menor que los macizos Fuertemente Fracturado en Bloques malo, moderado y bueno, esta diferencia de velocidades se produce debido a que el macizo Fracturado/Perturbado moderado posee aproximadamente el 20% de su data con la litología correspondiente a Pórfido Riodacítico afectada por zonas de daño provocadas por fallas, la cual, es una roca que por composición es más resistente al avance de la perforación, en cambio, los macizos Fuertemente Fracturado en Bloques malo, moderado y bueno, si bien desde el punto de vista geotécnico tienen mejor comportamiento, en su mayoría se encuentran constituidos por Andesita, Pórfido Granodiorítico y, en especial, Brechas cuyas resistencias al proceso de perforación son menores, lo que hace que la velocidad de perforación aumente (Figura 6.1).

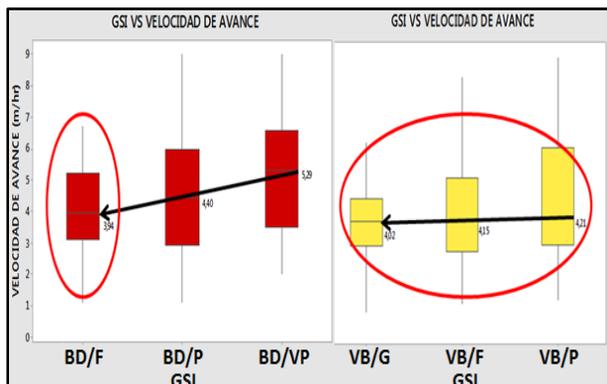


Figura 6.1: Velocidad de Avance en grupos GSI "1" (3,94; 4,40 y 5,29 m/hr), y GSI "2" (4,02; 4,15 y 4,21 m/hr).

Por último, se produce una variación abrupta al pasar a la calidad muy buena para el macizo rocoso con Fracturamiento en Bloques, lo cual es explicado debido a que la data registrada es mayor al 90% con la unidad litológica correspondiente a Pórfido Granodiorítico de Anfíbol con alteración Sericita Gris Verde, la cual presenta un comportamiento homogéneo con mayor resistencia a la velocidad de perforación que todas las unidades litológicas registradas y, además, se produce un exceso de velocidad de rotación (rpm) al perforar rocas con este tipo de características geotécnicas.

## 7. Referencias

- Chong, G. 1973.** Reconocimiento Geológico del área Catalina-Sierra de Varas y Estratigrafía del Jurásico del Profeta, Provincia de Antofagasta. Memoria para optar al Título de Geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 284 pp. Santiago.
- García, F. 1967.** Geología del Norte Grande de Chile. Sociedad Geológica de Chile. Symposium sobre el Geosinclinal Andino, 1962. N° 3: 138 pp. Santiago.
- López, C.; López E.; Ortiz, F. y Pernia, J. 2003.** Manual de Perforación y Voladura de Rocas. Instituto Geológico y Minero de España: 464 pp. Madrid.
- Marinovic, N.; Smoje. I.; Makshev. V.; Herve. M. y Mpodozis, C. 1995.** Hoja Aguas Blancas, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica N° 70: 150 pp. Santiago.
- Naranjo, J. y Puig, A. 1984.** Hojas Taltal y Chañaral, Regiones de Antofagasta y Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile N° 62-63: 140 pp. Santiago.
- Richards, J.; Noble, S. y Pringle, M. 1999.** A revised Late Eocene age for porphyry Cu magmatism in the Escondida area, Northern Chile. *Economic Geology*, Vol. **94**, (8): 1.231-1.247 pp., Antofagasta.

## Anexo

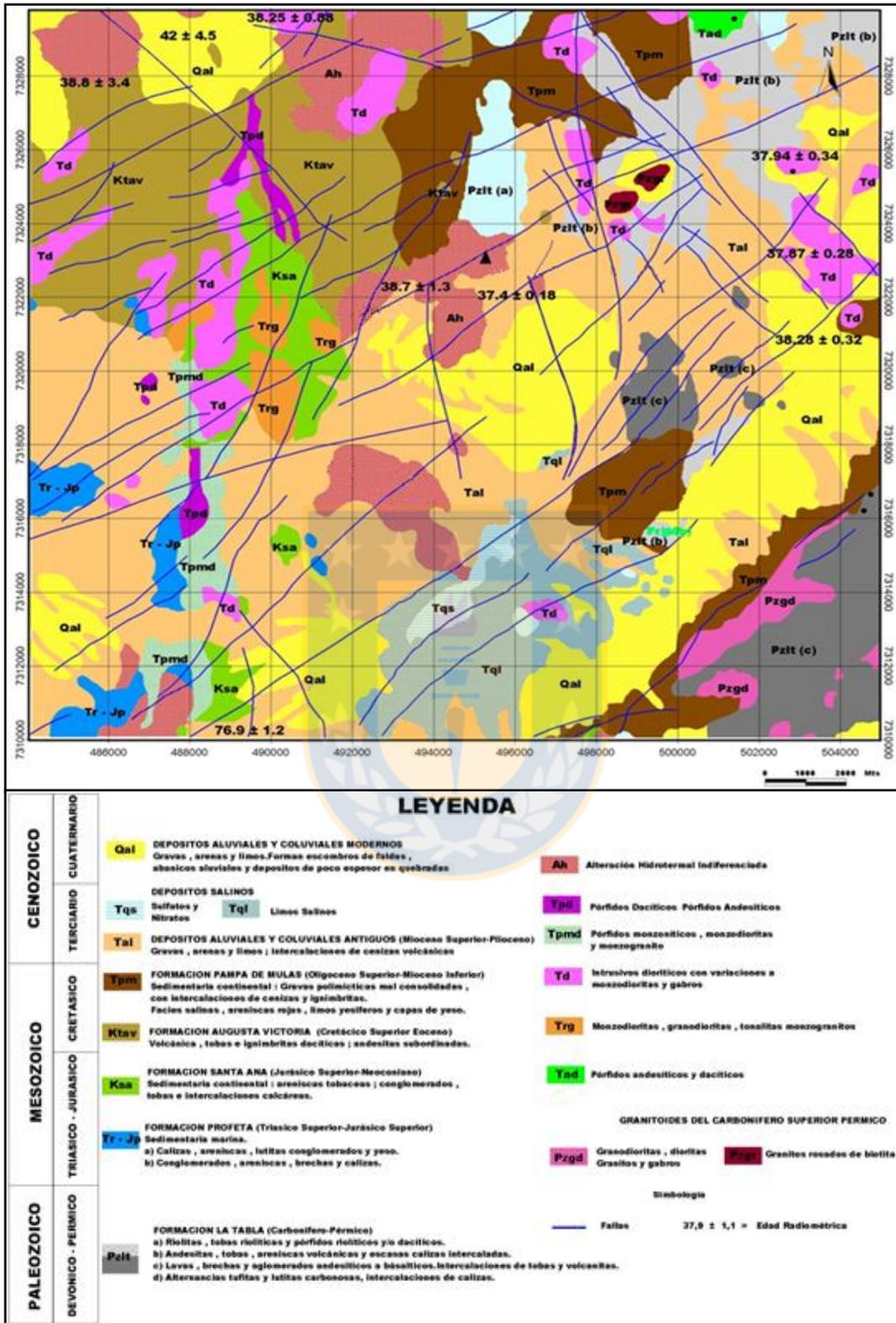


Figura 2.1: Marco Geológico Regional (modificado de Richards y otros, 1999).