

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA E INGENIERÍA METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



“ESTUDIO GEOLÓGICO - GEOTÉCNICO DEL PROYECTO TÚNEL
DE DESVÍO RIO ASANA - QUELLAVECO - MOQUEGUA”

TESIS

PRESENTADO POR EL BACHILLER:

JAVIER RICARDO NINA BARRAZUETA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO GEÓLOGO

PUNO – PERÚ

2014

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA E INGENIERÍA METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

**“ESTUDIO GEOLÓGICO - GEOTÉCNICO DEL PROYECTO TÚNEL DE
DESVÍO RIO ASANA - QUELLAVECO - MOQUEGUA”**

TESIS

PRESENTADO POR BACHILLER:

JAVIER RICARDO NINA BARRAZUETA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO GEÓLOGO

APROBADO POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

Presidente de Jurado:

Ing. ROBERTO F. ZEGARRA PONCE

Primer miembro:

Ing. JUAN F. CALLA FERNANDEZ

Segundo miembro:

Ing. RONALD QUIZA VILCA

Asesor de tesis:

M. Sc. E. SAMUEL MACHACA HANCCO

PUNO - PERÚ

2014

AREA. Planificación y estrategias para el desarrollo regional

TEMA: Estudio geotécnico y geodinámicos

A Jehová Dios por permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida. Por los triunfos y los momentos difíciles que me han enseñado a valorarlo cada día más.

A mis queridos padres Juana y Ricardo; por brindarme su constante apoyo en cada momento de mi vida y por sus sabios consejos que me permitieron seguir este arduo camino para convertirme en un profesional.

A mis Hermanos Bily, Adrián, Verónica, Yovana, Karina y Marcial; quienes me alentaron y me apoyaron incondicionalmente en todo momento para continuar con mis propósitos.

A mis sobrinos Gary, Fabricio, Paloma, Emmanuel y Lenny para poderles dar el ejemplo y así puedan seguir un futuro de bien.



AGRADECIMIENTOS

A Anglo American Quellaveco S. A. e Ingeniería de Rocas LTDA. por darme la oportunidad para realizar este Proyecto de Tesis.

A la Universidad Nacional del Altiplano Puno, por ser mi alma mater y mentora en mi proceso de desarrollo personal y profesional.

A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica de la Universidad Nacional del Altiplano, por haberme transmitido sus conocimientos, consejos y experiencias para desenvolverme en la vida profesional.

A mi madre Juana y mi hermana Yovana, por su nobleza, comprensión y sus consejos que hicieron posible mis objetivos.

Al Ing. MSc. Ernesto Samuel Machaca Hanco, por aceptar ser asesor de mi tesis, y haberme brindado su apoyo a lo largo de mi carrera Universitaria.

Al Ing. Roberto F. Zegarra Ponce, por sus orientaciones, enseñanzas, sus amplios consejos, conocimientos y mostrarme el amor por la geología a lo largo de estos años.

Finalmente agradezco a todas las personas que me apoyaron incondicionalmente compañeros, amigos y familiares todos.

INDICE

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE CUADROS	
LISTA DE SIGLAS	
RESUMEN	
CAPITULO I	- 1 -
1. INTRODUCCION	- 1 -
1.1. PROBLEMA DE ESTUDIO	- 2 -
1.2. JUSTIFICACION	- 2 -
1.3. ANTECEDENTES	- 2 -
1.4. HIPOTESIS	- 4 -
1.4.1. HIPÓTESIS GENERAL	- 4 -
1.4.2. HIPOTESIS ESPECÍFICO	- 4 -
1.5. OBJETIVOS	- 5 -
1.5.1. OBJETIVO GENERAL	- 5 -
1.5.2. OBJETIVO ESPECIFICO	- 5 -
1.6. METODOLOGIA	- 5 -
1.6.1. RECOPIACIÓN, ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE ANTECEDENTES	- 5 -
1.6.2. INVESTIGACIÓN GEOLÓGICA – GEOTÉCNICA DEL ÁREA DE ESTUDIO	- 5 -
1.6.3. INFORME FINAL	- 6 -
CAPITULO II	- 7 -
2. MARCO TEORICO	- 7 -
2.1. GEOMORFOLOGIA	- 7 -
2.1.1. COLINAS ALTAS	- 7 -
2.1.2. COLINAS BAJAS	- 7 -
2.1.3. TERRAZAS FLUVIOGLACIARES	- 7 -
2.2. LITOESTRATIGRAFIA	- 8 -

2.2.1.	Volcánico Paralaque (Kti-Vpa)	- 8 -
2.2.2.	Volcánico Quellaveco	- 8 -
2.2.3.	Porfido Quellaveco (Kti-pq)	- 8 -
2.2.4.	Serie Alta (Ti-sa)	- 9 -
2.2.5.	Rolita Yarito (Ti-ra)	- 9 -
2.2.6.	Volcánico Huaylilla (Tq-vhu)	- 9 -
2.2.7.	Volcánico Barroso (Tq-vbai/vbas)	- 10 -
2.2.8.	Deposito Coluvial (Q-col)	- 10 -
2.2.9.	Deposito fluvial (Q-fl)	- 10 -
2.2.10.	Deposito aluvial (Q-al)	- 10 -
2.2.11.	ROCAS INTRUSIVAS:	- 11 -
2.3.	PERFORACIONES DIAMANTINAS	- 12 -
2.3.1.	TUBERIA INTERIOR	- 12 -
2.3.2.	TESTIGO DE PERFORACION	- 12 -
2.3.3.	MANIPULACIÓN DE TESTIGOS	- 13 -
2.3.4.	REGISTRO DE PERFORACIÓN	- 13 -
2.3.5.	RECUPERACION DE MUESTRA	- 14 -
2.3.6.	RQD (rock Quality Designation)	- 14 -
2.4.	ENSAYOS DE LUGEON	- 14 -
2.5.	DESCRIPCION PARA EL LEVANTAMIENTO DE CELDAS GEOTECNICAS. -	16 -
2.5.1.	DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS GEOTECNICOS	- 16 -
2.5.2.	MEDICIONES GEOTÉCNICAS ESTRUCTURALES	- 18 -
2.6.	DESCRIPCION DE SONDAJES GEOTECNICAS	- 22 -
2.6.1.	RQD (ROCK QUALITY DESIGNATION)	- 22 -
2.6.2.	CARACTERISTICAS DE LA PERFORACION	- 23 -
2.6.3.	DESCRIPCIÓN DE TECNICA DE MEDICION	- 24 -
2.7.	MARCO CONCEPTUAL	- 28 -
2.7.1.	MECANICA DE ROCAS.	- 28 -
2.7.2.	MACIZO ROCOSO	- 29 -
2.7.3.	CLASIFICACION GEOMECANICA DEL MACIZO ROCOSO	- 29 -
2.7.4.	SISTEMA DE CLASIFICACION RMR	- 30 -
2.7.5.	CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO “Q”	- 31 -



2.7.6.	INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA (GSI) (HOEK – BROWN)	32 -
2.7.7.	INDICE DE CALIDAD DE ROCA (RQD)	33 -
2.7.8.	PLANOS PRINCIPALES DE SISTEMA DE DISCONTINUIDADES	34 -
2.7.9.	JUNTAS	35 -
2.7.10.	ANGULO DE FRICCIÓN	35 -
CAPITULO III		36 -
3.	CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INVESTIGACIÓN	36 -
3.1.	UBICACIÓN	36 -
3.2.	ACCESIBILIDAD	37 -
3.3.	CLIMA Y METEOROLOGÍA	37 -
3.4.	GEOLOGIA DEL ÁREA DE ESTUDIO	38 -
3.4.1.	GEO MORFOLOGIA	38 -
3.4.2.	GEOLOGIA LOCAL	39 -
3.4.3.	GEOLOGIA ESTRUCTURAL	43 -
3.4.4.	CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS	48 -
3.5.	CLASIFICACION GEOMECANICA DEL MACIZO ROCOSO	51 -
3.5.1.	CLASIFICACION RMR	51 -
3.5.2.	SISTEMA DE CLASIFICACION Q	55 -
3.6.	PARAMETROS GEOMECANICO DE LA ROCA INTACTA	59 -
3.7.	PARAMETROS DISCONTINUIDADES GEOLOGICAS	61 -
CAPITULO IV		63 -
4.	ANÁLISIS Y EXPOSICIÓN DE RESULTADOS	63 -
4.1.	MAPEO GEOLOGICO - GEOTECNICO DE SUPERFICIE	63 -
4.2.	MAPEO GEOLOGICO - GEOTECNICO DE SONDAJES	65 -
4.3.	PORTAL DE ESTRADA	66 -
4.3.1.	Condiciones Geológicas	67 -
4.3.2.	Condiciones geomecánicas	67 -
4.3.3.	Medidas de sostenimiento	70 -
4.4.	PORTAL DE SALIDA	70 -
4.4.1.	Condiciones Geológicas	70 -



4.4.2.	Características Geomecánicas.....	- 71 -
4.4.3.	Medidas de sostenimiento.....	- 74 -
4.5.	PORTAL VENTANA DE CONSTRUCCION.....	- 74 -
4.5.1.	Condiciones Geológicas.....	- 74 -
4.5.2.	Condiciones Geomecánicas.....	- 75 -
4.5.3.	Medidas de sostenimiento.....	- 78 -
4.6.	TUNEL VENTANA DE CONSTRUCCION.....	- 78 -
4.6.1.	Condiciones Geológicas.....	- 78 -
4.6.2.	Condiciones Geomecánicas.....	- 78 -
4.6.3.	Medidas de sostenimiento.....	- 81 -
4.7.	TUNEL DE DESVIO.....	- 81 -
4.7.1.	Condiciones Geológicas.....	- 81 -
4.7.2.	Condiciones Geotécnicas.....	- 82 -
4.7.3.	Medidas de sostenimiento.....	- 85 -
4.8.	ESTUDIO COMPARATIVO DEL PROYECTO TUNEL DE DESVIO RIO ASANA CON OTROS PROYECTOS SIMILARES.....	- 86 -
4.8.1.	DATOS GEOLÓGICOS.....	- 86 -
4.8.2.	DATOS GEOTÉCNICOS.....	- 88 -
4.8.3.	HIDROGEOLOGÍA.....	- 89 -
4.8.4.	DISEÑO DE LOS TÚNELES.....	- 89 -
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	- 91 -
	CONCLUSIONES.....	- 91 -
	RECOMENDACIONES.....	- 92 -
	BIBLIOGRAFÍAS CONSULTADAS.....	- 93 -
	ANEXOS.....	- 96 -
	ANEXO N° 01: PLANOS Y PERFILES	
	ANEXO N° 02: MAPEO DE CELDAS GEOTECNICAS	
	ANEXO N° 03: REGISTRO GEOLOGICO – GEOTECNICO DE SONDAJES	
	ANEXO N° 04: RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO	
	ANEXO N° 05: PARAMETROS DEL MACIZO ROCOSO	
	ANEXO N° 06: RESULTADOS DE CALIDADES GEOTECNICAS DE LOS DIFERENTES SONDAJES	

LISTA DE FIGURAS

- Figura N° 1,** Montaje Ensayo Lugeon.
- Figura N° 2,** Grado de meteorización en tramos de sondajes de diamantina.
- Figura N° 3,** Criterio para estimar la rugosidad a escala mayor (ISRM, 1981).
- Figura N° 4,** cálculo del RQD propuesta por Deere, D. (1964).
- Figura N° 5,** Metodología de registro geotécnico.
- Figura N° 6,** Determinación del largo de los testigos y el ángulo con respecto al eje del sondaje.
- Figura N° 7,** Estimación del Índice Geológico de Resistencia. GSI.
- Figura N° 8,** cálculo del RQD propuesta por Deere, D. (1964).
- Figura N° 9,** Ubicación específica del Proyecto Túnel de Desvío Río Asana.
- Figura N° 10,** Vista satelital del Proyecto Túnel de Desvío Río Asana.
- Figura N° 11,** Geología del área de estudio del Proyecto túnel de Desvío Río Asana.
- Figura N° 12,** Vista de los macizos rocosos de la unidad Volcánico Paralaque en el entorno del portal de salida del túnel de desvío, sector de Tala.
- Figura N° 13,** Fotografía de la granodiorita de anfibola-biotita del cuerpo intrusivo denominado Granodiorita en el sector de la Quebrada Sarallenque.
- Figura N° 14,** Pórfido Cuarzo Monzonítico intruyendo a la Granodiorita en el sector de la quebrada Millune.
- Figura N° 15,** Fotografía de una caja de testigos del Sondaje MQG-0407 mostrando brechas y diques ubicado en el trazado del túnel de desvío al NW de la ubicación del rajo.
- Figura N° 16,** Esquema de estructuras principales, destacando los sistemas NW, NE y EW.
- Figura N° 17,** Esquema mostrando los dominios estructurales principales.
- Figura N° 18,** Diagrama de concentración de polos y planos principales de estructuras Dominio I, Granodiorita.
- Figura N° 19,** Diagrama de concentración de polos y planos principales diaclasas Dominio II, Granodiorita brechada e intruida de porfido.
- Figura N° 20,** Diagrama de concentración de polos y planos principales estructuras Dominio III, Riolita Asana (Volcánico Paralaque y Pórfido Quellaveco).
- Figura N° 21,** Afloramiento de napa de agua en los contactos de distintas unidades litológica.
- Figura N° 22,** Correlación entre el RMR y el Sistema Q.
- Figura N° 23,** Correlación RMR (B) vs Q celdas geotécnicas Túnel de Desvío.
- Figura N° 24,** Correlación Q vs RMR para valores de calidades de sondajes.

Figura N° 25, Fotografías del Portal de Entrada al Túnel de Desvío río Asana y Pórfido Cuarzo Monzonítico.

Figura N° 26, Diagrama de densidad de polos y planos de las discontinuidades del macizo rocoso de los Portales de Entrada. Los cuadrados y planos rojos representan fallas y los triángulos y planos azules los sets de diaclasas.

Figura N° 27, Fotografías del sector del portal de salida, Túnel de Desvío Río Asana, donde se muestran bloques de roca (riolita) y discontinuidades de gran longitud

Figura N° 28, Diagrama de densidad de polos y planos de las discontinuidades del macizo rocoso del Portal de Salida.

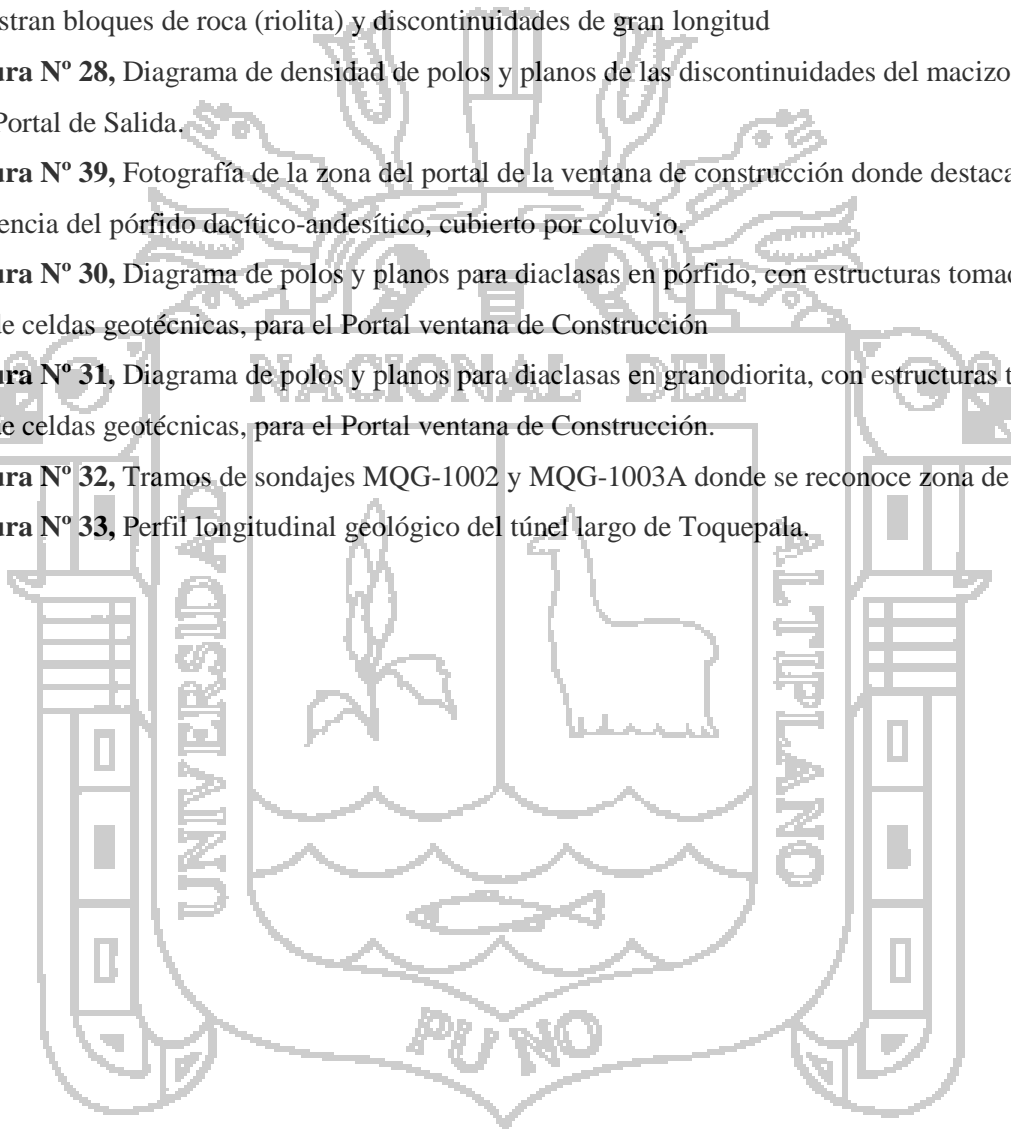
Figura N° 39, Fotografía de la zona del portal de la ventana de construcción donde destaca la presencia del pórfido dacítico-andesítico, cubierto por coluvio.

Figura N° 30, Diagrama de polos y planos para diaclasas en pórfido, con estructuras tomadas desde celdas geotécnicas, para el Portal ventana de Construcción

Figura N° 31, Diagrama de polos y planos para diaclasas en granodiorita, con estructuras tomadas desde celdas geotécnicas, para el Portal ventana de Construcción.

Figura N° 32, Tramos de sondajes MQG-1002 y MQG-1003A donde se reconoce zona de fallas.

Figura N° 33, Perfil longitudinal geológico del túnel largo de Toquepala.



LISTA DE TABLAS

- Tabla N° 1.** Índice de calidad de roca.
- Tabla N° 2,** Criterios para la Estimación de la Resistencia del Material.
- Tabla N° 3,** Grado de Meteorización.
- Tabla N° 4,** Criterios para determinar el grado de alteración de las paredes.
- Tabla N° 5,** Criterios para la Estimación de la Resistencia del Material.
- Tabla N° 6,** Celda de Mapeo Geotécnico.
- Tabla N°7,** Índice de calidad de roca.
- Tabla N°8,** Formato de Mapeo Geotécnico Básico.
- Tabla N° 9,** Categorización de estructuras según su ángulo con respecto al eje del testigo.
- Tabla N° 10.** Clasificación del Tipo de Molido
- Tabla N° 11,** Grado de Meteorización ISRM (1981).
- Tabla N° 12,** Formato de Mapeo por Tramos Geotécnicos.
- Tabla N° 13,** clasificación del macizo rocoso (RMR).
- Tabla N° 14,** Índice de calidad de roca.
- Tabla N° 15,** coordenadas del Proyecto Túnel de Desvío Rio Asana.
- Tabla N° 16,** Valores de Permeabilidad unidades litológicas.
- Tabla N° 17,** Resumen Ensayos de Lugeon de sondajes en túnel de desvío.
- Tabla N° 18,** Determinación del Rock Mass Rating (RMR).
- Tabla N° 19,** Determinación específica del Rock Mass Rating (RMR).
- Tabla N° 20,** Ajuste por orientación de discontinuidades.
- Tabla N° 21,** clasificación de roca según el total de valoración.
- Tabla N° 22,** Características geotécnicas.
- Tabla N° 23,** orientaciones de las discontinuidades en el túnel.
- Tabla N° 24,** calculo y clasificación del sistema RMR.
- Tabla N° 25,** Determinación del valor del “Sistema Q”.
- Tabla N° 26,** Determinación de clase de roca en función de su rango de Q.
- Tabla N° 27,** Parámetros individuales de R.Q.D.
- Tabla N° 28,** Parámetro: Índice de diaclasado J_n .
- Tabla N° 29,** Parámetro: Índice de rugosidad J_r .
- Tabla N° 30,** Parámetro: Índice de alteración de las discontinuidades J_a .
- Tabla N° 31,** Parámetro: Coeficiente reductor por la presencia de agua J_w .
- Tabla N° 32,** Parámetro: Condiciones tensionales S.R.F.
- Tabla N° 33,** Parámetros Unidad Pórfido Cuarzo Monzonítico. Túnel a 50mde profundidad.

- Tabla N° 34**, Parámetros Unidad Granodiorita Regional. Túnel a 100m de profundidad.
- Tabla N° 35**, Parámetros Unidad Granodiorita Regional. Túnel a 250m de profundidad.
- Tabla N° 36**, Parámetros Unidad Granodiorita Regional. Túnel a 350m de profundidad.
- Tabla N° 37**, Parámetros Unidad Granodiorita Regional. Túnel a 500m de profundidad.
- Tabla N° 38**, Parámetros Unidad Volcánico Paralaque, Túnel a 50m de profundidad.
- Tabla N° 39**, Parámetros Unidad Volcánico Paralaque. Túnel a 300m de profundidad.
- Tabla N° 40**, Peso específico y permeabilidades para cada unidad geológica.
- Tabla N° 41**, Valores de ángulo de fricción y cohesión para las distintas unidades en profundidad.
- Tabla N° 42**, Valores de ángulo de fricción y cohesión para las distintas unidades en superficie.
- Tabla N° 43**, Ubicación y características de las celdas geotécnicas.
- Tabla N° 44**, Ubicación de sondajes utilizados en este estudio.
- Tabla N° 45**, Calidad Geotécnica del macizo rocoso en portales de entrada, del Túnel de Desvío Río.
- Tabla N° 46**, Medidas de sostenimiento recomendada.
- Tabla N° 47**, Calidad Geotécnica macizo rocoso estimada para el portal de salida.
- Tabla N° 48**, Medidas de sostenimiento recomendadas en Portal de Salida.
- Tabla N° 49**, Calidad Geotécnica estimada para el macizo rocoso del portal ventana de construcción
- Tabla N° 50**, Medidas de sostenimiento del Portal Ventana de Construcción.
- Tabla N° 51**, Resumen calidades RMR (Bieniawski) ajustado y Q modificado por tramos de Ventana de Construcción.
- Tabla N° 52**, Porcentajes esperados por tramos geológicos-geotécnicos de ventana de Construcción.
- Tabla N° 53**, Medidas de sostenimiento para el Túnel Ventana de Construcción.
- Tabla N° 54**, Resumen de calidades de Túnel de Desvío Río Asana.
- Tabla N° 55**, Porcentajes esperados de cada clase de roca para túnel de desvío.
- Tabla N° 56**, Medidas de sostenimiento recomendada para el Túnel de Desvío Río Asana.
- Tabla N° 57**, Propiedades geomecánicas del macizo rocoso.
- Tabla N° 58**, Secciones tipo de sostenimiento.

LISTA DE SIGLAS

AAQSA	: Anglo American Quellaveco S.A.
GMI	: Ingenieros Consultores
RQD	: Índice de calidad de roca
RMR	: Rock Mass Rating
Q	: Calidad de roca de Barton
GSI	: Índice Geológico de Resistencia
ISRM	: Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas
INGEROC	: Ingeniería de Rocas Ltda.
Jn	: Número de familias de juntas
Jr	: Rugosidad de las juntas
Ja	: Meteorización de las juntas
Jw	: Agua en las juntas
SRF	: Stress Reduction Factor
UTM	: Universal Transversal de Mercator
MQG	: Moquegua
N.A.S	: Nivel de aguas subterráneas
NGI	: Instituto Geotécnico Noruego

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo desarrollar las condiciones geológicas y el comportamiento geomecánico del macizo rocoso frente a la excavación del túnel, dentro del cual emplaza el Túnel de Desvío Rio Asana. Los objetivos parciales que se fueron cumpliendo dentro del marco de trabajo de la investigación, fueron la ejecución de una cartografía superficial geológico – geotécnico, la recolección de datos de todas las formaciones geológicas que será atravesado por el túnel y la posterior ejecución de ensayos geológicos y geomecánicos, compilación e interpretación de toda la información, elaborando así un modelo geológico – geotécnico del sector; y finalmente el análisis de las condiciones geológicas del túnel, con elaboración de perfiles geológicos y una caracterización geotécnica del macizo rocoso. Donde el túnel de desvío rio Asana tiene una pendiente de ($i=4.490\%$)

Litológicamente el área de estudio, se encuentra constituida por rocas más antiguas de edad cretácea – terciario correspondiente a las tobas riódacíticas, riolitas porfíricas de la Unidad Volcánica Paralaque y los intrusivos granodioríticos de la unidad denominada pórfido Quellaveco, para efectos de este trabajo, ambas unidades se agrupan y toman la denominación de Riolita Asana. También se encuentra la granodiorita de la unidad denominada Granodiorita Regional, la Formación Huaylillas (Mioceno-Plioceno) las que corresponden a tobas andesíticas y las andesitas y finalmente culmina con los materiales recientes de los depósitos semiconsolidados a no consolidados morrenicos y, fluvioglaciares y los depósitos coluviales.

El proyecto Túnel de desvío Rio Asana consta de los siguientes estudios geológicos geotécnicos del portal de entrada, portal de salida, portal ventana de construcción, túnel ventana de construcción y finalmente la caracterización del túnel principal de desvío que consta de una distancia de 7.7 km. Donde se hicieron los estudios in situ de caracterización geomecánica del macizo rocoso con la clasificación RMR de Bieniawsky 1989 de muy mala a buena con valores 20 – 72 del tipo de roca V - II, la clasificación geomecánica de Barton (Sistema Q) son de extremadamente mala a buena con valores (0.07 – 11.8) y con la obtención del Índice de Resistencia Geológica GSI de (Hoek y Brown) con valores 15 – 65.

Las calidades geotécnicas RMR Bieniawski obtenidas para las celdas geotécnicas, en general, varían de regulares a buena. En particular, para las rocas intrusivas se tiene un 52% de rocas de buena calidad geotécnica, un 43% de rocas de calidad regular y un 5% de rocas de mala calidad geotécnica. Para las rocas volcánicas, existe un 82% de rocas de buena calidad y un 18% de rocas de calidad geotécnica regular según índice RMR.

Los resultados de calidades para los diferentes sondajes se presentan las calidades geotecnicas que tiene un 30% de roca buena, un 40% de roca regular, un 20% de roca mala y 10 % de roca muy mala. Los resultados de la calidad por tramos en sondajes muestran que el macizo rocoso varía su calidad geotécnica de mala a buena, según RMR (Bieniawski, 1989).

El Rio Asana que recorre de este a oeste y el caudal medio anual en este punto del túnel de desvío es del orden de los 1.100 l/seg. Los meses con más caudal son febrero y marzo, con caudales medios del orden de 2.100 l/seg. Los meses con menos caudal son octubre y noviembre, con caudales medios cercanos a 700 l/seg.



CAPITULO I

1. INTRODUCCION

El estudio Geológico – Geotécnico del Proyecto Túnel de Desvío Río Asana, tiene como propósito las investigaciones de las condiciones geológicas y la caracterización del macizo rocoso de la zona donde se emplazara el proyecto túnel Asana, con el fin de obtener resultados favorables para la construcción de dicha obra de gran envergadura para el proyecto Quellaveco.

El Proyecto de desvío del río Asana está compuesto básicamente por el túnel que tendrá 7,7 km de longitud. Adicionalmente se construirá una barrera de desvío de río con una altura de 40.00 de altura. Esta obra está destinada a asegurar la continuidad del flujo de los caudales utilizados en riego aguas abajo de la futura mina Quellaveco, además de permitir en periodos secos, la extracción de sedimentos que se depositen en la barrera durante las crecidas. La operación de la barrera será la mayor parte de tiempo seca, con periodos de embalse temporales durante las crecidas del río.

Otras obras asociadas a la construcción y operación del sistema son una ventana de construcción de 1 km de longitud.

La caracterización del macizo rocoso y las condiciones geológicas del proyecto están especificadas con sus resultados correspondientes en los anexos correspondientes que consta de la siguiente manera: Planos y Perfiles en el Anexo N° 01; Mapeo de Celdas Geotécnicas en el Anexo N° 02; Registro geológico – geotécnico de sondajes en el Anexo N° 03; resumen de ensayos de laboratorio en el Anexo N° 04; Parámetros del macizo rocoso en el Anexo N° 05 y finalmente los resultados de calidades geotécnicas para los diferentes sondajes en el anexo N° 06.

En la actualidad, las nuevas tecnologías abren inmensas posibilidades a la construcción de túneles y obras subterráneas. Esta realidad ya en nuestros días se proyecta hacia el futuro como una tendencia que apunta hacia mejoras en los rendimientos y en la seguridad de los trabajos. Las obras subterráneas tienen un inmenso futuro, que ya es realidad en muchos lugares del mundo.

En nuestro país la industria minera constituye una de las principales ramas de la economía, estimula el desarrollo de la industria, asegura el abastecimiento de las principales materias primas e influye directamente en el desarrollo económico y social del país, la construcción de obras subterráneas, tanto civiles (trasvases, almacenes, etcétera), como para obras protectoras de diversos usos, ha aumentado en los últimos años.

1.1. PROBLEMA DE ESTUDIO

Los afloramientos del macizo rocoso donde se emplazan el túnel de desvío río Asana, está compuesto por rocas volcánicas Paralaque, volcánicas Huaylillas y plutónico granodiorita. El macizo rocoso es sujeto a diferentes procesos de deformación que afectaran el proceso constructivo y durante la operación del túnel, por ello que es necesario investigar el comportamiento geomecánico del macizo rocoso indicado anteriormente.

Mediante las cuales serán determinados el comportamiento del macizo rocoso; para la excavación del túnel de desvío; utilizando el mapeo de discontinuidades dominantes y el logueo de testigos de perforación programados en el proyecto.

Para este fin se llegó a formular la siguiente interrogante.

¿Cuáles son las condiciones Geológicas del Proyecto Túnel de Desvío Río Asana?

¿Cuál es el comportamiento del macizo rocoso frente a la excavación del túnel?

1.2. JUSTIFICACION

Debido al tipo de macizo rocoso que se obtuvo en el Proyecto Túnel de Desvío río Asana, de Buena a muy mala calidad según la clasificación RMR y la clasificación de Q de Barton; las evaluaciones geomecánicas, va hacer controlada por el comportamiento de los parámetros geomecánicos de la matriz rocosa de la granodiorita y las rocas de riolitas, dacitas, andesitas. La calidad del macizo rocoso evaluada determinara las medidas de sostenimiento, que serán necesarios utilizarlos, durante el proceso de construcción del túnel, que conducirá las aguas del río Asana hacia el túnel de 7.7 km. de longitud. Donde el túnel consta de base 4x4 esta obra permitirá asegurar la continuidad del flujo de los caudales utilizados en riego aguas abajo de la futura mina Quellaveco.

1.3. ANTECEDENTES

Para el desarrollo del presente informe se han desarrollado cinco campañas de terreno en las cuales se realizó el registro geológico-geotécnico de los testigos de sondajes desarrollados en las campañas de exploración, registro de algunos de los sondajes de las etapas previas de prospección, además de registros de superficie en el entorno del túnel de desvío.

A continuación se detallan la totalidad de los antecedentes considerados en el desarrollo del presente estudio.

- **Informe técnico, 08229-03-01-iicg-ite-100 versión 0 , Informe Geológico Geotécnico Túnel de Desvío “Obras de Desvío Río Asana”** Informe desarrollado por Ingendesa Mayo 2009 desarrollado por M. Astrid Vorphal Soto y Miguel Ángel Jaramillo Bopp, se presenta en este estudio un resumen de los resultados de la exploración y un anexo con el informe detallado realizado por Ingeroc se anexan como resultados finales los Plano Geológico y el Perfil Geológico – Geotécnico en formato .dwg del Túnel de Desvío Río Asana respectivamente.
- **09215-10-80-IIAG-ITE-001-02, Anexo a, “Informe Geológico-Geotécnico para el Portal de Salida del Túnel de Desvío del Río Asana”,** Diciembre 2009.
- **Calicatas canal de desvío: MQ07-RE-0000-GO1501-RevB Asana.pdf,** Registros de 6 Calicatas desarrolladas para el proyecto enmarcado en el Estudio de optimización y factibilidad de Noviembre del 2009 por FLUOR-GMI-Anglo American. Se anexan ensayos de suelo para las 6 calicatas, estos incluyen Granulometría, Límites de Atterberg y Clasificación USCS, Proctor Modificado (Densidad/Humedad), Densidades, Peso Volumétrico, Humedad, Peso Volumétrico Parafinado, Peso Específico y absorción.
- **Permeabilidad Sondajes.** Se recibe el anexo completo de los ensayos de Permeabilidad del Sondaje MQG-0905 de los Lugeones realizados en abril 2010, estudio realizado por GMI para Anglo American.
- **Sondajes Barrera 2008: Informe Sondajes Barrera mas Lugeones_Volumen 13-MQ07-RE-0000-GO1520-Anx12-Rev0-2008.(Informe Compilado GMI).pdf, Volumen 13.** Registro desarrollado por GMI en Noviembre del año 2009, con el resultado de los ensayos de Lugeon y registros geológicos, Mapeos Geotécnicos y registro Fotográfico completo de los 7 sondajes desarrollados en la Obra de Barrera, estos son los sondajes MQG- 801 al MQG-807. Se anexa además en este registro los mapeos geotécnicos de los 7 sondajes desarrollado para el Proyecto Quellaveco en su Etapa IV denominada Optimización Estudio de Factibilidad Noviembre 2009.
- **Sondajes Túnel, Informe Final Del Proyecto MQ07-Re-0000-Go1520-3 Campaña 2009.Pdf.** Informe desarrollado por GMI con el resultado de los registros geológicos-geotécnicos (RQD y %Recuperación y grado de fracturamiento estimativo). Se anexa en este informe el registro fotográfico completo de los sondajes 903 y 904. Se anexan las descripciones y el resultado de 6 calicatas desarrolladas en la obra del túnel en noviembre del 2009, se incluye como anexo los registros geológicos de las calicatas en los que se incluyen estudios de granulometría, límites de Atterberg y clasificación USCS, ensayos de proctor

modificado (densidad/humedad), densidades, peso volumétrico, humedad, peso volumétrico parafinado, peso específico y absorción.

- **Geotecnia Sondajes Túnel, Volumen 04 - MQ07-RE-0000-GO1520-Anx 3- Rev0.pdf y Informe 0903-04_con ensayos _ volumen 04 - MQ07-RE-0000- GO1520-Anx 3-Rev0.pdf.** Se anexan los resultados de los ensayos geomecánicos efectuados entre los que se incluyen ensayos de Densidad, Porosidad, Absorción, Compresión simple (sin medición de módulo) y ensayos de carga puntual efectuados en el sondaje 903. Se acompaña con este informe archivos Excel independientes con el registro geológico y calidad geotécnica (RQD) de los sondajes 107, 407, 903, 904 y 905.
- Se anexa en estos archivos un **Plano1_Plano+Geológico con SONDAJES.dwg** con la ubicación de los sondajes, obras del Túnel Asana.
- Anexamente se complemento esta información con los últimos antecedentes y resultados del sondaje 905, entre los que se incluyen ensayos de permeabilidad Lugeon de abril del 2010 realizados por GMI.
- **P-IDR-067-10-10-1-2, Informe Final “Actualización Antecedentes Geológicos y Geotécnicos Proyecto Túnel de Desvío Río Asana y Presa Asana, proyecto Quellaveco, Moquegua, Perú”** desarrollado por Ingeniería de Rocas Ltda. En base a los nuevos informes disponibles, no incluye visita a terreno.
- **P-IDR-067-10-11-3-P Informe Final “Caracterización Geológica-Geotécnica a nivel de ingeniería de detalle, Barrera de Desvío Río Asana, Proyecto Quellaveco, Moquegua, Perú”**, desarrollado por Ingeniería de Rocas Ltda. En base a los nuevos antecedentes disponibles.
- **Ensayos de Permeabilidad de Agua (Ensayos de Lugeon) de Sondajes MQG- 1002 y MQG-1003A**, realizados por Geotecnia Peruana SRL, Octubre- Noviembre 2010.

1.4. HIPOTESIS

1.4.1. HIPÓTESIS GENERAL

Las características geológicas y geomecánicas del macizo rocoso serán favorables para realizar excavaciones del túnel.

1.4.2. HIPOTESIS ESPECÍFICO.

- Las condiciones geológicas estará determinado de acuerdo a los estudios superficiales y perforaciones diamantinas.
- El comportamiento del macizo rocoso estará determinado de acuerdo al comportamiento de los parámetros geomecánicos frente a la excavación del túnel.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar las características geológicas y geomecánicas del macizo rocoso del proyecto túnel de desvío río Asana.

1.5.2. OBJETIVO ESPECIFICO

- Determinar las condiciones geológicas del Proyecto Túnel de Desvío Río Asana.
- Determinar el comportamiento del macizo rocoso frente a la excavación del túnel.

1.6. METODOLOGIA

Trabajo de investigación que se realiza mediante un análisis cuantitativo del grado de fracturamiento del macizo rocoso y descriptivo de los parámetros geomecánicos, que comprometen la estabilidad del macizo rocoso en las que consideran las siguientes métodos.

1.6.1. RECOPIACIÓN, ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE ANTECEDENTES

Se recopiló información bibliográfica necesaria antes y durante el estudio, estos antecedentes fueron analizados y evaluados, para luego ser incorporados a la presente investigación.

1.6.2. INVESTIGACIÓN GEOLÓGICA – GEOTÉCNICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

La investigación geológica - geotécnica en campo se desarrolló de la siguiente manera:

- i. Caracterización de la roca intacta: para lo cual se ha realizado exploraciones geotécnicas (perforaciones diamantinas), ensayos in-situ, donde se tomaron muestras representativas las cuales fueron llevadas a laboratorios especializados en mecánica de rocas, y así adquirir los parámetros físicos y mecánicos de la roca intacta.
- ii. Caracterización del macizo: para la evaluación del macizo rocoso se clasificó utilizando tres sistemas reconocidos como RMR (Bieniawski, 1989), Q (Barton, 1974) y GSI (Hoek y Brown 1995), los cuales son utilizados en proyectos de tunelería y se adaptan perfectamente a los alcances del estudio.
- iii. En la presente investigación se realizaron estaciones geotécnicas, donde se registraron las estructuras principales y discontinuidades del macizo. El objetivo de la caracterización geomecánica es cuantificar los parámetros geotécnicos que gobiernan el comportamiento del macizo rocoso en una excavación subterránea.

- iv. Zonificación de la calidad del macizo rocoso: se realizó una zonificación de los dominios estructurales en base a la clasificación geomecánica, de acuerdo a las características litológicas, patrones geoestructurales y resultados de las pruebas de laboratorio, dando como resultado un tipo de macizo.

1.6.3. INFORME FINAL

Se desarrolló el informe final dividido en cuatro capítulos: Introducción, Marco Teórico, Caracterización del Área de Estudio, Exposición y análisis de resultados, finalmente Conclusiones y Recomendaciones, debidamente sustentado en los anexos correspondientes.



CAPITULO II

2. MARCO TEORICO

2.1. GEOMORFOLOGIA

2.1.1. COLINAS ALTAS

Esta unidad abarca desde la diferencia de altitudes de la Cordillera Occidental, con una altitud variable entre 3500 – 4300 m.s.n.m. se caracteriza por ser un paisaje típico de mesetas altas separadas por suaves colinas y algunos casos por cerros agrestes. Con pendientes promedios de 25° - 40°. INGEROC, 2011.

2.1.2. COLINAS BAJAS

Cerros medianos o colinas que varían entre 3,500 – 4,000 de altitud, de superficies abruptas, bastante intemperizadas por los agentes geológicos; entre ellos tenemos cerros Asana, Sarallenque, Millune, limitados por quebradas que drenan en la dirección de las cuencas adyacentes, una hacia el campamento minero Quellaveco. Con pendientes promedio de 10° - 25°. INGEROC, 2011.

2.1.3. TERRAZAS FLUVIOGLACIARES

Las terrazas formadas por la acción fluvial se encuentran en la base de los valles formados por la acción fluvioglacial, originados en el terciario y el cuaternario. Formando superficies casi horizontales, están compuestas por el volcánico Asana. Esta se da en los dos lados del río Asana. INGEROC, 2011.

2.2. LITIOESTRATIGRAFIA

2.2.1. Volcánico Paralaque (Kti-Vpa)

El nombre de esta formación deriva de la hacienda Paralaque, ubicada en las laderas del río Quele, a unos 5 Km. al NO de Torata.

Esta unidad aflora al oeste de la zona mineralizada en el sector de Tala, aflora una secuencia de rocas volcánicas, compuesta mayormente por derrames de dacita, riolita y andesitas, de colores marrón y rosado claro con intercalaciones de piroclásticos y lentes de conglomerados en el tercio superior. Los derrames volcánicos tienen rumbo general NO con buzamientos que varían desde pocos grados hasta 30° o 35° al N y EN. INGEMMET, 2011.

2.2.2. Volcánico Quellaveco

Bajo esta denominación se reúne a un conjunto de rocas volcánicas de la parte superior del grupo Toquepala, las cuales afloran en la porción nororiental del cuadrángulo a lo largo de una faja de rumbo NO-SE. En la parte central de este afloramiento se encuentra el depósito cuprífero de Quellaveco, de donde deriva el nombre de la formación. Los yacimientos Cuajone y Toquepala se hallan dentro de la misma formación al NO y SE de Quellaveco respectivamente. RICHARD and COURT RIGHT (1956), describen las rocas volcánicas del área de Quellaveco -Toquepala con la denominación Porfido cuarífero de Quellaveco.

2.2.3. Porfido Quellaveco (Kti-pq)

Es el miembro más bajo de la formación y aflora en la ladera sur, de la quebrada Asana, en el lugar del yacimiento Quellaveco, de donde viene su nombre. Allí consiste en derrames macizos de Riolitas, de color blanco en superficie fresca y gris blanquesino a blanco amarillo cuando está alterado.

La roca está compuesta por granos de cuarzo de forma redondeados hasta de 2mm. De sección y de ortosa blanca, englobado en una matriz fina, silicia de aspecto lechoso. El contacto inferior es con un Stock de monzonita cuarífera que la intruye, en cambio su techo se hunde discordantemente debajo de potentes derrames de andesitas y Riolitas de la Serie Alta, en el lado izquierdo del valle, y debajo de los tufos Huaylillas en el lado derecho. Su grosor ha sido determinado en 300m. INGEMMET, 2002.

2.2.4. Serie Alta (Ti-sa)

Este miembro de volcánico Quellaveco es el mas extenso y aflora en las minas Cuajone, Quellaveco y Toquepala. Litológicamente consiste de derrames y piroclasticos gruesos. Buenas secciones de la Seria Alta se exponen en las paredes de la quebrada Quele, Torata, Cocotea, Asana, Capillune y Micalaco: en la mayor parte de las secciones predominan las rocas andesiticas. Las rocas andeciticas son las mas desarrolladas y aparecen bien expuestas en las diferentes quebradas. Así en la ladera izquierda de la quebrada Asana forma el cerro Samanape; asimismo se le observa en su estribación suroeste. En la empinada ladera del lado norte del paraje de Tala se encuentra encima del pórfido Quellaveco y debajo de la Formación Huaylillas. INGEMMET, 2002.

2.2.5. Rolita Yarito (Ti-ra)

Las rocas en superficie fresca es de color gris a gris claro, a veces algo rosada o violeta, al intemperizar se torna amarillenta, crema a blanquecina y pardo rojiza, de textura porfirítica con fenocristales de feldespato muy caolinizados e irregularmente distribuidos y que conjuntamente con algunos granos de hornblenda alterados, se hallan en una pasta microgranular a afanítica de color gris crema, en parte, vidriosa.

La roca es dura, en su superficie se notan numerosas oquedades pequeñas que probablemente se han originado por la disolución de algunos de sus constituyentes. INGEMMET, 2002.

2.2.6. Volcánico Huaylilla (Tq-vhu)

Esta unidad estratigráfica fue descrita por WILSON y GARCÍA (1962) como una secuencia volcánica compuesta principalmente por tufos y subsidiariamente por derrames lávicos ácidos de colores blanco y rosado, que cubren extensas áreas de los cuadrángulos de Pachía y Huaylillas.

En la hoja de Moquegua el Volcánico de Huaylillas se presenta mayormente en el sector norte del cuadrángulo, donde sus afloramientos se hallan distribuidos a manera de pequeños parches irregulares o en forma de lenguas que cubren las superficies que quedan entre quebradas adyacentes. La solución de continuidad de dichos afloramientos indica intensa remoción de estas rocas de naturaleza relativamente blanda.

El Volcánico Huaylillas del área de Moquegua, fundamentalmente consiste de tufos dacíticos y riolíticos de colores blanco grisáceo, gris blanquecino y rosado. Estas rocas superficialmente intemperizan a pardo rojizo o pardo amarillento y destacan notablemente en el paisaje por su color y por sus farallones verticales que se forman por erosión en el contorno de sus afloramientos.

2.2.7. Volcánico Barroso (Tq-vbai/vbas)

WILSON y GARCÍA (1962) describen con esta denominación una serie de rocas volcánicas de composición predominantemente andesítica, traquítica y tranquiandesítica, que conforman la Cordillera del Barroso, en la hoja de Palca. La cadena volcánica mencionada, con sus conos típicos, se prolongan hacia el Noroeste por los cuadrángulos de Maure y Tarata y pasa por la esquina Noreste de la hoja de Moquegua, donde está representada por los volcanes Arundane (5.247m.) y Chuquimanta (5.428m.) de rocas andesíticas cuyas cimas quedan en los cuadrángulos de Omate y Tarata, respectivamente.

Las rocas de la formación consisten en derrames intercalados con brechas de flujo y piroclásticos, son de color gris claro, gris pardo hasta gris oscuro.

Los derrames son mayormente de andesitas basálticas, tienen textura porfirítica, con fenocristales de feldespatos de 1 a 2 mm. de longitud que muestran cierta orientación, distribuidos en una pasta fina gris parda.

2.2.8. Deposito Coluvial (Q-col)

Los depósitos coluviales son muy pequeños y no tienen mayor significación geológica en el área. La acumulación mas importante de esta clase de depósitos se encuentra en las laderas del rio Asana, los fragmentos de bloques de tufos y materiales volcánicos, han cubierto una gran parte de dicha ladera. INGEMMET, 2002.

2.2.9. Deposito fluvial (Q-fl)

A esta clase de depósitos corresponden las gravas, arenas y arcillas que están en proceso de transporte y deposición por los ríos actuales; consiste en toda clase de materiales clásticos sueltos, desde bloques gruesos hasta arcillas con predominio de conglomerados y arena; en forma de bancos de grava o pequeñas playas de arena a lo largo del lecho de los ríos; los depósitos aluviales inmediatos a sus márgenes, ligeramente mas altos, son utilizados como terreno de cultivo. Durante la avenida, parte de estos terrenos, que corresponden al piso del valle, son a veces parcialmente inundados por el rio renovándose el transporte y la sedimentación. INGEMMET, 2002.

2.2.10. Deposito aluvial (Q-al)

Son acumulaciones de clastos que se encuentran constituidos por arcillas, arenas, gravas, cantos y bloques de variada naturaleza en diferentes proporciones, debido a que han sido depositados bajo condiciones variables en cuanto a volumen y velocidad de flujo.

Estos depósitos han sido transportados por el río, dando origen a la llanura fluvio-aluvial.

INGEMMET, 2002.

2.2.11. ROCAS INTRUSIVAS:

- **Diorita – Granodiorita**

Los mayores cuerpos intrusivos del área consisten de rocas cuya composiciones varia gradacionalmente de diorita a Granodiorita. A este grupo pertenece el Stock de Calumbraya-Micalaco; los intrusivos de la parte central norte que se asocian constituyendo un afloramiento casi anular; el macizo del cerro Huanaco, en la esquina noroeste; los afloramientos del rio Otorá, aguas abajo del depósito Cuajone; el pequeño Stock que aparece en la cabecera de la quebrada Charaque, ubicado entre Cuajone y Quellaveco, etc.

Superficialmente, por el intemperismo tiene una coloración marron rojiza débil; en algunas localidades como el cerro Piruncho, alrededores de Tala, partes altas de Micalaco, etc, tienen disminución esferoidal; en otras áreas especialmente en las laderas de la quebrada, se muestran con disminución tabular, unas veces bien marcadas y otras en forma bastante grosera. INGEMMET, 2002.

- **Monzonitas y Dacitas**

El afloramiento de monzonita tiene topografía suave: la roca ofrece disyunción tabular e irregular y coloración de intemperismo pardo amarillento. En superficie fresca la roca es maciza, con textura granular porfirítica y de color rosado débil; en la masa de la roca se observa en forma dispersa numerosos granos y manchitas verdosas. A simple vista se reconocen granos de feldespatos y minerales de color negro muy finos no reconocibles ni con lupa.

En quellaveco la monzonita cuarcífera aflora en el fondo del rio Asana, donde destaca por su coloración blanco amarillento. En la ladera sur de este valle intruye al pórfido quellaveco, mientras en la parte norte esta cubierto por los tufos riolíticos del volcánico Huaylillas. INGEMMET, 2002.

- **Chimeneas de granodiorita brechizadas**

Los depósitos de cobre desiminados de Quellaveco y Cuajone están asociados con chimeneas de brechas, esto es, con estructuras tabulares de sección mas o menos circular, elíptica o irregulares, rellenas con rocas fragmentadas de los muros. En el caso de los depósitos de Toquepala y Quellaveco se refiere que las chimeneas de brechas controlaron la mineralización.

Las chimeneas se habrían originado según RICHARD y COURT RIGHT en zonas debilitadas por fallamiento o por fragmentación de las rocas mediante explosiones gaseosas que habrían abierto diatremas que se ensancharían por las repetidas explosiones, el material acarreado desde las partes

profundas así como los fragmentos arrancados y trasladados de los muros constituyen el material brechado del relleno.

2.3. PERFORACIONES DIAMANTINAS

La ejecución de perforaciones encamisadas mediante una máquina rotatoria es la manera más completa de obtener muestras continuas del perfil del suelo y a través de los análisis de laboratorio posteriores tener un conocimiento sin lugar a dudas del mismo. El hecho de tener que realizar las perforaciones desde una plataforma apoyada en el fondo, más los recursos humanos y materiales necesarios hace que el costo de realizar este tipo de investigación sea muy elevado. Por otra parte al tiempo que lleva realizar cada perforación debe agregársele el traslado entre los diferentes puntos de medición.

2.3.1. TUBERIA INTERIOR

Dentro de la tubería de perforación hay otro tubo interno, que tiene un mecanismo de cierre conectado a un cable de acero. Al final de cada serie de 10 pies, el cable se utiliza para izar el tubo que contiene el testigo de roca a la superficie donde se puede recuperar. El testigo se almacena en cajas especialmente diseñadas que contienen compartimentos para mantener secciones del testigo. Las cajas estándar son de 2,5 pies de largo (0,762 m) y contienen cuatro compartimentos, así que permiten almacenar tres metros de testigo en cada caja, pero también hay cajas de 3,3 pies de largo (1,02 m) con 3 compartimientos.

2.3.2. TESTIGO DE PERFORACION

El testigo de perforación primero se lava y se registra (“loguea”) por un geólogo calificado, y luego se divide por la mitad para obtener una muestras para los análisis geoquímicos.

Para obtener un testigo de sondaje se requiere gastar mucho tiempo, esfuerzo y dinero, por lo que su estudio y registro debe hacerse con mucho cuidado. Se utiliza un formulario de “logueo” (registro) normalizado para mapear el testigo.

El formulario tiene columnas para cada uno de los tipos de información que se registra, con marcas de graduación indicando el metraje. La información generalmente incluye el % de recuperación, litología, alteración, mineralización, los datos de calidad de la roca (RQD), y detalles estructurales.

A pesar que el rumbo y manto de estructuras planas, como estratos, foliación, fallas y vetas respecto al eje del sondaje no se conocen, el ángulo de estas estructuras con respecto al eje del sondaje se registra, ya que proporciona información valiosa acerca de la geometría de las estructuras en sub-superficie. A menudo, el sondaje también se fotografía para un registro gráfico.

El % de recuperación es el cociente entre la longitud del testigo real comparado con el intervalo de perforación indicado. Los huecos y zonas de fractura pueden causar una pobre recuperación. Por

ejemplo, si una perforación de 3 m obtiene 2,4 m de testigo, la recuperación es del 80%. Los logueos de sondajes se utilizan para construir las secciones de perforación (secciones que muestran los sondajes), las que ilustran la geometría del subsuelo del yacimiento. La tendencia actual es la creación de registros de perforación en formato digital o de hoja de cálculo, lo que facilita la construcción de tramos de perforación mediante computador.

2.3.3. MANIPULACIÓN DE TESTIGOS

Los testigos que se extraen de la perforación, son colocados en cajas porta testigos, convenientemente identificadas con el nombre del proyecto, número del sondeo, ubicación, intervalos de perforación de las muestras, fecha y otros. En el interior está dividido por canales limitados por tabiquería de madera, cuyos anchos corresponden al diámetro de la muestra a colocar. Las muestras de cada tramo perforado son separadas con tacos de madera en donde se anotan las profundidades correspondientes.

Es importante que las manipulaciones de las muestras, tanto al ser extraídas de los muestreadores y dispuestas en las cajas de madera, así como al ser trasladadas esta para su almacenamiento, tengan que ser tratadas con cuidado, procurando evitar la disturbancia de estas. El almacenamiento deberá hacerse en ambientes con un mínimo contenido de humedad.

Un archivo fotográfico de las cajas con las muestras dará una buena información de los testigos, sobre todo tiempo después, cuando las muestras ya se hayan deteriorado o cuando no se disponga en el momento las cajas con las muestras.

2.3.4. REGISTRO DE PERFORACIÓN

El registro de perforación es un formato adecuado para las anotaciones de las características de la perforación, informaciones obtenidas a partir de los testigos y los resultados de los ensayos ejecutados.

En la parte que corresponde al registro de perforación en sí, se anotan en función a la profundidad, los diámetros de perforación empleados, los revestimientos instalados, la profundidad del nivel freático, el porcentaje de retorno de agua de circulación, el tramo del que se obtenga muestras especiales o testigos de rocas retiradas de la caja de muestra para que sean analizadas en laboratorio.

2.3.5. RECUPERACION DE MUESTRA

La recuperación de muestra se representa gráficamente, siendo esta una relación porcentual entre la longitud de las muestras recuperada respecto a la longitud del tramo perforado.

$$\text{Recuperación de muestra (\%)} = \frac{\text{log. de muestra recuperada}}{\text{Long. de tramo perforado}} \times 100$$

2.3.6. RQD (rock Quality Designation)

El RQD (rock Quality Designation), es una medida del grado de fracturamiento del macizo rocoso, propuesta por Deere, D. (1964) que se expresa como una relación porcentual de la sumatoria de los testigos carentes de discontinuidades naturales mayores de 10cm. Y la longitud del tramo perforado; en el registro de perforación se representa también gráficamente, diferenciándolo de la recuperación de la muestra, con un achurado diferente.

$$\text{RQD (\%)} = \frac{\text{Long. de testigos sin discontinuidades > 10cm.}}{\text{Long. del tramo perforado}} \times 100$$

De acuerdo al RQD, un macizo rocoso es calificado de la siguiente manera, en función al grado de fracturamiento.

Tabla N° 1. Índice de calidad de roca.

RQD %	CÁLIDAD DE ROCA
<25%	Muy mala
25 – 50%	Mala
50 – 75%	Regular
75 – 90%	Buena
90 – 100%	Muy buena

Fuente: ISRM, 1978.

2.4. ENSAYOS DE LUGEON

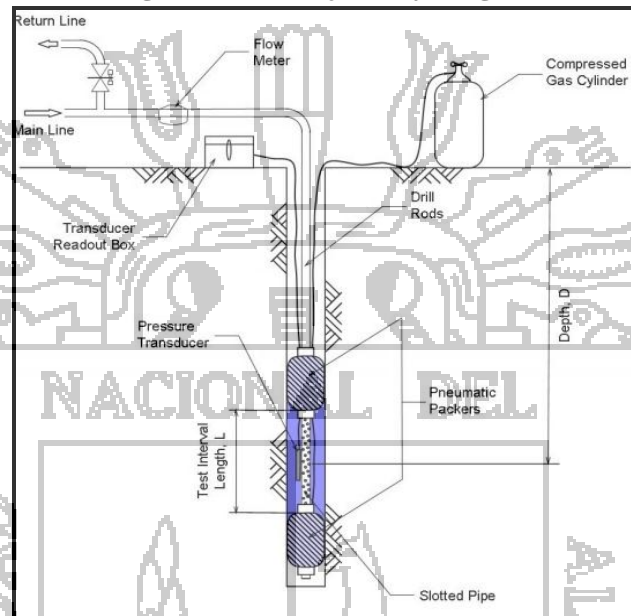
Es un ensayo en campo que se realiza con sondeos, únicamente en rocas consolidadas, para medir la permeabilidad. Consiste en medir el volumen de agua (V) que se inyecta durante un tiempo (t), es decir, el caudal $Q = V/t$ en un tramo de sondeo de longitud (L) a una presión (Ht).

Con este ensayo se busca tener una idea de la permeabilidad en grande, es decir, la debida a las fisuras de la roca o del material granular cementado en estudio.

Supongamos una perforación invadida hasta una cierta profundidad, a partir de esta se perforan unos 5 metros y luego se fija un obturador en la parte superior de este tramo virgen y se inyecta agua a presión con una bomba.

Un manómetro colocado en la boca del pozo, un contador de agua y una válvula de descarga, permiten medir los caudales inyectados a una presión dada.

Figura N 1. Montaje Ensayo Lugeon.



Fuente: <http://ussdams.com/proceedings>.

Para conocer la permeabilidad en el macizo rocoso, se tiene entonces la ecuación:

$$k = \frac{Q}{2\pi L H_t} \log_e \left(\frac{L}{r} \right)$$

Donde:

- k : permeabilidad.
- Q : velocidad constante del flujo en la perforación.
- L : longitud del tramo ensayado.
- H_t : presión de sobrecarga a la profundidad del ensayo/ peso específico del agua.
- r : radio de la perforación de prueba.

Es común para este ensayo expresar la permeabilidad del macizo rocoso en lugeons. Un Lugeon (Lg) es una unidad equivalente a 1 litro por minuto y metro, bajo una presión de 10 kg/cm²; esto es aproximadamente igual a 1×10^{-7} m/s. Es una unidad pequeña, y valores menores de un Lg indican en la práctica terrenos poco permeables.

2.5. DESCRIPCIÓN PARA EL LEVANTAMIENTO DE CELDAS GEOTECNICAS.

2.5.1. DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS GEOTECNICOS

A continuación se describen los parámetros básicos utilizados de acuerdo a la planilla adjunta.

- Litología

Describe la litología o unidad geológica del sector estudiado, incluyendo las características de alteración y mineralización.

- Resistencia

Se efectúa una estimación de la resistencia a la compresión simple, mediante el uso de cortaplumas y martillo de acuerdo a la Tabla 2, denominada “**Criterios para la Estimación de la Resistencia del Material**”.

Tabla N° 2, Criterios para la Estimación de la Resistencia del Material.

Grado	Descripción	Identificación de terreno	Rango aproximado de resistencia a la compresión uniaxial (Mpa)
S1	Arcilla Muy Blanda	Fácilmente penetrable varias pulgadas con el puño.	<0,025
S2	Arcilla Blanda	Fácilmente penetrable varias pulgadas con el puño.	0,025-
S3	Arcilla Firme	Puede ser penetrada varias pulgadas con el pulgar, con esfuerzo moderado.	0,05-0,10
S4	Arcilla Rígida	Fácilmente marcada por el pulgar, solamente puede ser penetrada con gran esfuerzo.	0,10-0,25
S5	Arcilla Muy Firme	Fácilmente marcada por la uña.	0,25-0,50
S6	Arcilla Dura	Marcada con dificultad por la uña.	>0,50
R0	Roca Extremadamente Débil	Marcada por la uña.	0,25-1,0
R1	Roca Muy Débil	Se disgrega por un golpe fuerte de la punta del martillo geológico, puede ser escarbada por el cortaplumas.	1,0-5,0
R2	Roca Débil	Puede ser escarbada por el cortaplumas con dificultad, se deforma o disgrega por un fuerte golpe de la punta del martillo.	5,0-25
R3	Roca Medianamente Firme	No puede ser escarbada o disgregada por una cortaplumas, la muestra se fractura con un solo golpe firme del martillo geológico.	25-50
R4	Roca Firme	La muestra requiere más de un golpe del martillo geológico para ser fracturada.	50-100
R5	Roca Muy Firme	La muestra requiere de muchos golpes del martillo geológico para ser fracturada.	100-250
R6	Roca Extremadamente Firme	La muestra solo puede ser astillada con el martillo geológico.	>250

Fuente: ISRM, 1981.

Meteorización

La meteorización corresponde al proceso destructivo, por el cual la roca cambia, al estar expuesta a los agentes atmosféricos en o cerca de la superficie de la tierra, y comprende una desintegración física y una descomposición química de la roca. La Tabla muestra los grados de meteorización desde una roca fresca a un suelo residual. Para el caso de yacimientos mineros, existe una alteración de la roca de origen hipógeno, que en algunos casos también degrada la roca, y donde también se puede cuantificar, mediante el grado de meteorización, el proceso destructivo que ha sufrido ésta.

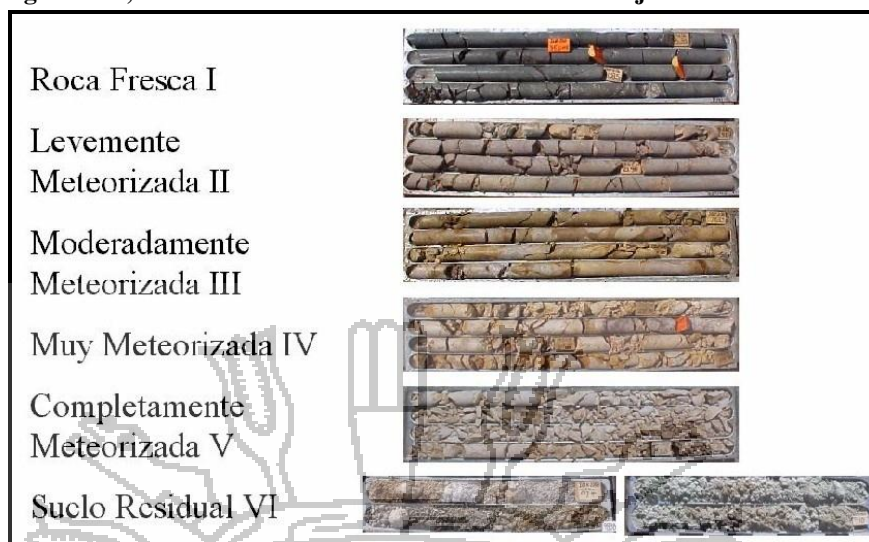
Tabla N° 3, Grado de Meteorización.

TERMINO	DESCRIPCIÓN	GRADO
Roca Fresca	No presenta signos visibles de meteorización en la roca: tal vez una leve decoloración en las superficies de las discontinuidades mayores.	I
Levemente Meteorizada	La decoloración indica meteorización de la roca y en las superficies de las discontinuidades. La roca en su totalidad puede estar decolorada por la meteorización y puede estar externamente algo más débil, que en su condición fresca.	II
Moderadamente Meteorizada	Menos de la mitad de la roca esta descompuesta y/o desintegrada como un suelo. La roca fresca o decolorada se puede presentar como colpas o testigos continuos.	III
Muy Meteorizada	Más de la mitad de la roca esta descompuesta y/o desintegrada como un suelo. La roca fresca o decolorada se puede presentar como colpas o testigos discontinuos.	IV
Completamente Meteorizada	Toda la roca esta descompuesta y/o desintegrada como un suelo. La estructura original del macizo aún se mantiene en gran parte intacta.	V
Suelo Residual	Toda la roca está convertida como suelo. La estructura del macizo y la fábrica del material están destruidas. Existe un gran cambio de volumen, sin embargo el suelo no ha sido transportado significativamente.	VI

Fuente: ISRM, 1981.

Este sistema de caracterización del grado de meteorización se puede aplicar tanto a cortes de taludes, afloramientos, y sondajes, la figura N° 2, muestra un ejemplo de los grados de meteorización definidos en cajas de sondajes de diamantina.

Figura N°2, Grado de meteorización en tramos de sondajes de diamantina.



Fuente: INGEROC, 2011.

Condición de Agua

Se describe la condición de agua presente en la pared rocosa de acuerdo a lo recomendado en el sistema de clasificación RMR Bieniawski 1989:

Completamente Seco

Húmedo

Mojado

Goteo

Flujo

2.5.2. MEDICIONES GEOTÉCNICAS ESTRUCTURALES

Al revisar estructuralmente el área caracterizada por la celda, se detectarán las estructuras a ser caracterizadas, que para el caso general, corresponden a todas aquellas estructuras, que formen bloques, caras o aristas. Las estructuras como algunos tipos de vetas sellados, se consideran como parte de la matriz de la roca.

Para cada estación geotécnica estructural identificado se determinará lo siguiente:

- Tipo

Indica con una sigla el tipo de estructura, la cual puede ser una vetilla, diaclasa, vetilla fallada, falla, estratificación, etc.

- Orientación

Se determina la orientación característica de las estaciones analizadas, mediante la medición de la Dirección del buzamiento y el buzamiento.

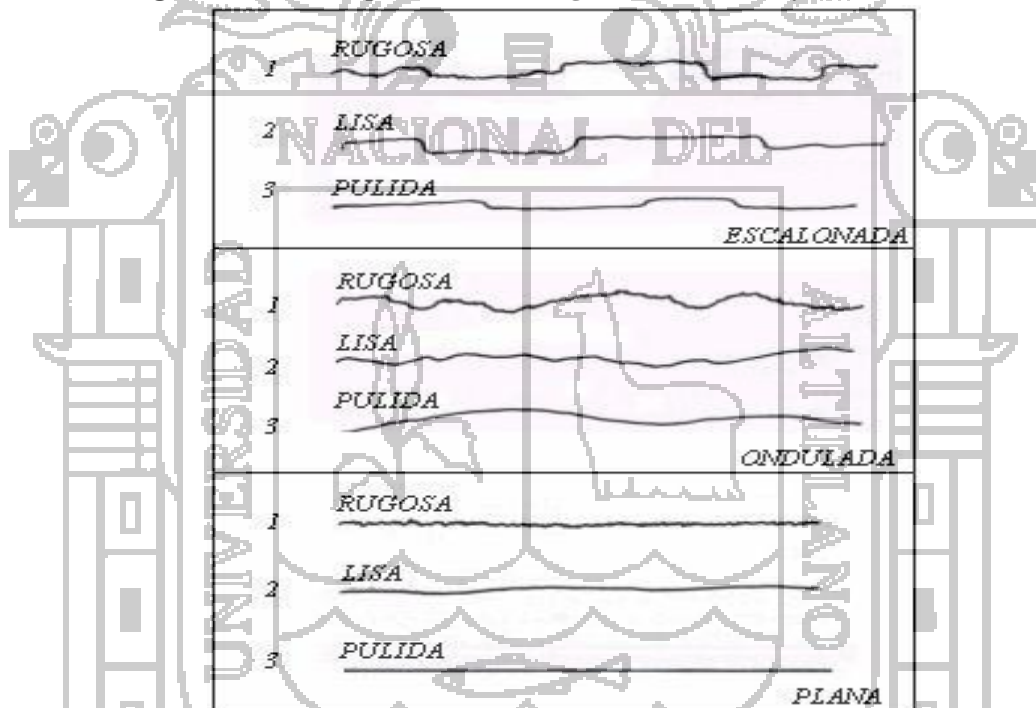
- **Espaciamiento**

Se determina el espaciamiento real de cada set estructural, mediante la determinación del espaciamiento mínimo observado de las estaciones, el espaciamiento máximo observado de las estaciones y el espaciamiento promedio de las estaciones. Se ingresa además la frecuencia de fracturas, o inverso del espaciamiento medio.

- **Rugosidad**

Este parámetro permite estimar el grado de aspereza natural presente en las discontinuidades de la roca. Se determina en dos escalas la mayor a escala del banco o galería observada y la otra a escala menor de centímetros.

Figura N°3, Criterio para estimar la rugosidad a escala mayor (ISRM, 1981).



Fuente: ISRM, 1981.

- **Alteración de las Paredes**

La alteración de las paredes se refiere al grado de alteración de éstas con respecto a la matriz de la roca. La tabla 8 muestra los criterios utilizados para determinar este parámetro. Es importante señalar que este parámetro se refiere a la variación comparativa en las propiedades resistentes de la roca.

Tabla N° 4, Criterios para determinar el grado de alteración de las paredes.

Código	Grado de Alteración	Descripción
1	Alta	La pared se encuentra totalmente alterada, y su grado de alteración es alto con respecto a la
2	Media	La pared se encuentra medianamente alterada y su grado de alteración es medio con respecto a la
3	Baja	La pared se encuentra ligeramente alterada en relación a la matriz.
4	Igual Matriz	El grado de alteración entre la pared y la matriz es
5	Menor Matriz	La pared se encuentra menos alterada que la matriz de la roca.

Fuente: ISRM, 1981.

- **Relleno**

La caracterización del relleno comprende la estimación de la resistencia de este, su espesor, y el tipo de relleno o mineralogía.

- Resistencia del Relleno.

La resistencia del relleno se determina mediante el uso de la tabla siguiente se considera que el material más débil del relleno será el que debe caracterizarse.

- Espesor del relleno

Se indica el espesor del relleno típico del set estructural analizado

- Tipo

Se indica el tipo o mineralogía que constituye el relleno típico de la estructura

Tabla N° 5, Criterios para la Estimación de la Resistencia del Material.

Grado	Descripción	Identificación de terreno	Rango aproximado de resistencia a la
S1	Arcilla Muy Blanda	Fácilmente penetrable varias pulgadas con el	<0,02
S2	Arcilla Blanda	Fácilmente penetrable varias pulgadas con el	0,025-
S3	Arcilla Firme	Puede ser penetrada varias pulgadas con el pulgar, con esfuerzo moderado.	0,05-
S4	Arcilla Rígida	Fácilmente marcada por el pulgar, solamente puede ser penetrada con gran esfuerzo.	0,10-
S5	Arcilla Muv	Fácilmente marcada por la uña.	0,25-
S6	Arcilla Dura	Marcada con dificultad por la uña.	>0,5
R0	Roca Extremadamente Débil	Marcada por la uña.	0,25-1,0
R1	Roca Muy Débil	Se disgrega por un golpe fuerte de la punta del martillo geológico, puede ser escarbada por el cortaplumas.	1,0-5,0
R2	Roca Débil	Puede ser escarbada por el cortaplumas con dificultad, se deforma o disgrega por un fuerte golpe de la punta del martillo.	5,0-25
R3	Roca Medianamente Fuerte	No puede ser escarbada o disgregada por una cortaplumas, la muestra se fractura con un solo golpe firme del martillo geológico.	25-50
R4	Roca Fuerte	La muestra requiere más de un golpe del martillo geológico para ser fracturada.	50-100
R5	Roca Muy Fuerte	La muestra requiere de muchos golpes del martillo geológico para ser fracturada.	100-250
R6	Roca Extremadamente Fuerte	La muestra solo puede ser astillada con el martillo geológico.	>250

(Fuente: ISRM, 1981).

- **Modelo de mapeo para celdas geotécnicas.**

Las celdas geotécnicas en la presente tabla N° 6, en la cual se detallan su ubicación, las características geológicas y geotécnicas, las direcciones y orientaciones, calidades geomecánicas como el RMR, Q de Barton y el Índice de Resistencia Geológica GSI.

Tabla N° 6, Celda de Mapeo Geotécnico.

INGENIERÍA DE ROCAS															 INGERO Ingeniería de Rocas Ltda.	
Proyecto		Quellaveco					Referencia Ubicación					C-4 Qda. Sarallenne				
Fecha		10-may-08					Ventana de mapeo					15X4				
Ubicación UTM 19K	Norte	8,109,321			Cota	3,821			Geologo					P. Merino-G.Pineda		
	Este	328,375			Observaciones											
1	Litología	Granodiorita														
2	Resistencia	R4														
3	Meteorización	2														
4	Cond. de Agua	Seco														
5	Efecto tronadura	N/A														
6	Criterio H&B	Blocky a Very Blocky														
		Cond: Disc. Good														
		GSI					65									
		RMR					71									
		Q					8.33									
		Foto: 81, 82, 83, 84. GPS: 113														
		Granodiorita de Biotta Grano Fino														
Set N°	Tipo	Orientación [°]		Espaciamiento [m]			Rugosidad	Persistencia (m)	Alteración	Resis.	Relleno					
		Dip Dir	Dip	Min.	Max	Med					Menor	Mayor	Espesor [mm]	Tipo		
1	SD	280	62	0.1	2.0	1.0	1.00	8	Ondulada Lisa	4	4	Patina Ox Fe				
2	SD	10	80	0.3	2.0	0.7	1.43	8	Escalonada Lisa	4	3	Patina Ox Fe				
3	SD	221	42	0.3	3.0	0.6	1.87	8	Escalonada Lisa	3	4	R1 7 Ox-Qz				
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
RQD* EQUIV.				RQD=		100	Jv=	4.10			4					
RQD=115-3.3Jv									N° de Set			Rjr				

Fuente: Ingeroc, 2011.

2.6. DESCRIPCION DE SONDAJES GEOTECNICAS

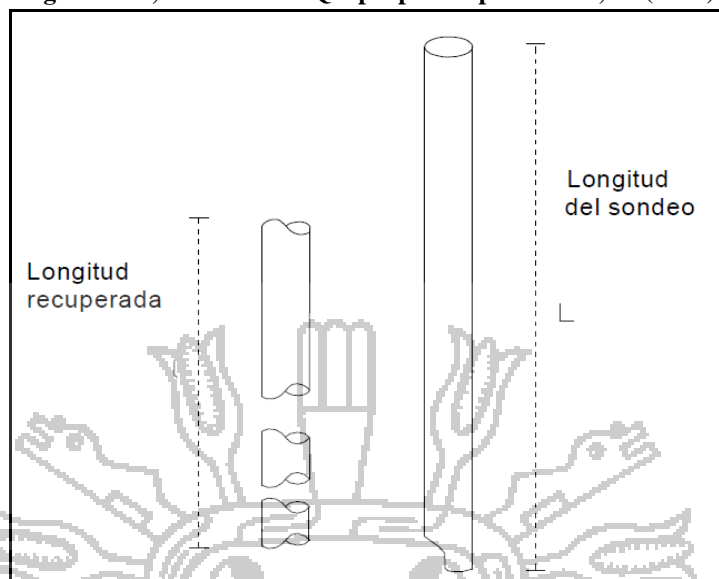
Se presenta una metodología para el levantamiento geotécnico de núcleos de sondajes de diamantina, especialmente para rocas afectadas por meteorización y/o alteraciones geológicas. Este levantamiento consta de dos planillas complementarias, donde la primera corresponde a un levantamiento básico de parámetros geotécnicos, por tramos de perforación, mientras que la segunda corresponde a la definición y levantamiento geotécnico de tramos de iso-calidad.

La descripción y análisis de los parámetros geotécnicos básicos de medición en testigos de sondajes de diamantina, como son el RQD, frecuencia de fracturas y espaciamiento se ven desordenados por la irregularidad de las muestras obtenidas, las cuales corresponden en algunos casos solamente a roca triturada, o degradada a suelo, o una alternancia de trozos de rocas separados por tramos de roca totalmente alterada. Debido a lo anterior; se ha adoptado la técnicas de medir el largo de todos los trozos de testigos limitados por fracturas abiertas de origen geológico, realizando esta medición a través del eje de rotación del testigo. También se ha definido el porcentaje de roca y el de roca molida.

2.6.1. RQD (ROCK QUALITY DESIGNATION)

El RQD (rock Quality Designation), es una medida del grado de fracturamiento del macizo rocoso, propuesta por Deere, D. (1964) que se expresa como una relación porcentual de la sumatoria de los testigos carentes de discontinuidades naturales mayores de 10cm. Y la longitud del tramo perforado; en el registro de perforación se representa también gráficamente, diferenciándolo de la recuperación de la muestra.

Figura N° 4, cálculo del RQD propuesta por Deere, D. (1964).



Fuente: Deere, (1964).

La fórmula a aplicar es:

$$\text{RQD} = \frac{\text{Longitud recuperada en piezas} \geq 0,10 \text{ m} \times 100}{\text{Longitud del sondeo}}$$

donde:

l = Longitud recuperada (en metros)
L = Longitud del sondeo (en metros)

Tabla N° 7, Índice de calidad de roca. (ver tabla N° 1)

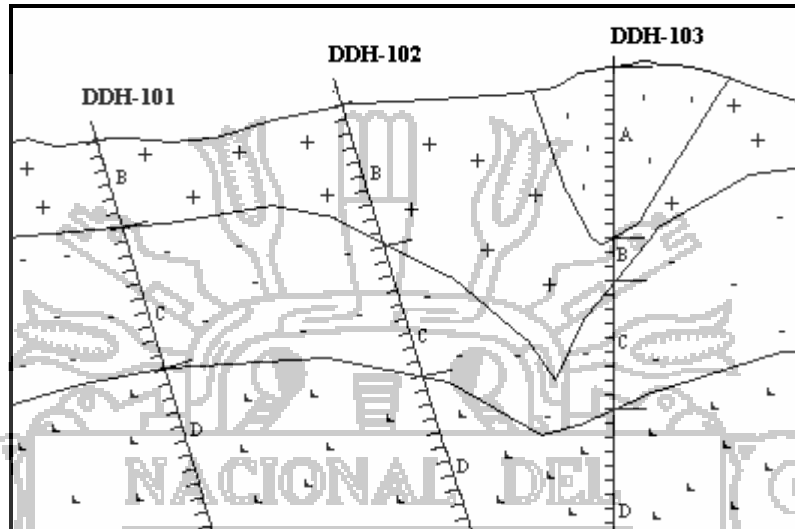
2.6.2. CARACTERÍSTICAS DE LA PERFORACION

El levantamiento de los datos geotécnicos consta de dos partes, la primera, corresponde a un levantamiento sistemático de tramos de perforación o tramos entre tacos de perforación, es decir se determinan las propiedades geotécnicas básicas para cada tramo perforado. La segunda parte del levantamiento corresponde a un levantamiento dirigido, el cual considera varios tramos de testigos de sondeos de igual aspecto y comportamiento geotécnico. Para este tramo se determinan las propiedades de las estructuras, la resistencia de la roca, el grado de meteorización y se realiza una estimación visual del GSI.

La figura siguiente, muestra una sección geotécnica con cuatro unidades, la cual ha sido definida en base al mapeo de tres sondajes de diamantina. A la izquierda de cada sondaje se observa un espaciado regular, que corresponde a los tramos considerados por el “Levantamiento Geotécnico Básico”, constituido por tramos de perforación, mientras que a la derecha se observan tramos irregulares que constituyen tramos de iso-calidad geotécnica, determinados

en el “Levantamiento por Tramos Geotécnicos” los cuales finalmente se correlacionan con otros sondajes, para obtener zonas de iso-calidad. En el ejemplo de figura siguiente se han definido 4 unidades geotécnicas A, B, C, y D.

Figura N° 5, Metodología de registro geotécnico.



2.6.3. DESCRIPCIÓN DE TÉCNICA DE MEDICIÓN

A continuación se describen los parámetros básicos considerados para las dos etapas del mapeo geotécnico, correspondientes a las etapas de “Mapeo Geotécnico Básico”, y, “Mapeo por Tramos Geotécnicos”.

- Mapeo Geotécnico Básico

Esta etapa del levantamiento geotécnico corresponde a un levantamiento sistemático de parámetros geotécnicos, los cuales son registrados, entre tramos de perforación (tacos), y/o tramos sistemáticos. Para cada tramo se determinan el número de fracturas, el largo de los trozos de roca, el tipo de molido y el grado de meteorización, cuyo formato de medición se presenta en la tabla 8, la forma de medición se describe a continuación:

Tramo de Sondeo. Corresponde al tramo de perforación considerado, se incluye la posición de perforación de inicio (DESDE) y termino del tramo (HASTA). En algunos casos estos tramos de perforación son regularizados a tramos regulares, en cuyo caso se podrá utilizar los tramos regulares, con la debida precaución con respecto al corte artificial de trozos de sondajes (ver tabla N° 8).

Tabla N°8, Formato de Mapeo Geotécnico Básico.

N°	Tramo Sondeo		N° FRACTURAS				LARGO DE TROZOS DE ROCA																				Tipo Molido	Grado Meteorización	
	DESDE	HASTA	0-30°	30-60°	60-90°	Total	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
1																													
2																													
3																													
4																													
5																													
6																													
7																													
8																													
9																													
10																													
11																													
12																													
13																													
14																													
15																													
16																													
17																													
18																													
19																													
20																													

Fuente: Ingeroc, 2011. Los resultados están en el anexo N° 3.

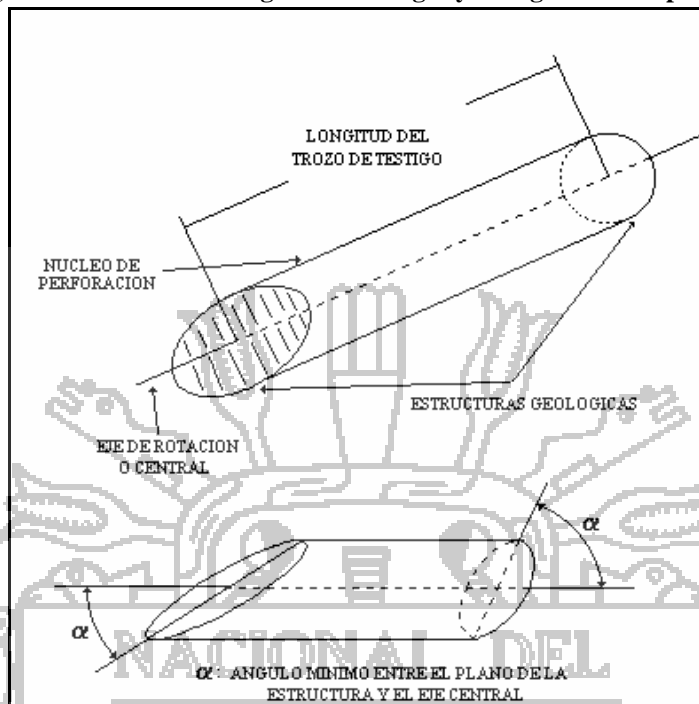
N° de Fracturas Se contabilizan todas las fracturas abiertas de origen geológico presentes en un determinado tramo de sondaje, evitando contar todas aquellas estructuras abiertas por la manipulación de los testigos ya sea a través de planos de debilidad o a través de la matriz de la roca.

Se agruparán las estructuras de acuerdo al ángulo menor que forman con respecto al eje del testigo o ángulo los rangos utilizados corresponden a: 0-30°, 30-60° y 60-90°, además del total que es la suma de las estructuras contabilizadas en estos rangos.

Largo de Trozos de Roca. Este ítem considera la medición de todos los trozos de roca separados por estructuras geológicas abiertas, que presenten sonoridad (Deere 1968), que tengan un grado de meteorización bajo, entre I y III, los testigos con grados de IV, V, y VI no se deben medir. Se recomienda utilizar una línea o eje central para medir en ella la longitud de los tramos, este método es recomendado por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM, 1981). Las rupturas causadas por el proceso de perforación o el operador, que son usualmente evidenciadas por superficies rugosas frescas, no deben ser incluidas y se deben considerar como un solo trozo de testigo.

Tipo de Molido. Corresponde a una descripción del material disgregado recuperado por la perforación del sondeo, que puede presentar un comportamiento como suelo, o los tramos de roca triturada que no es capaz de mantener la forma cilíndrica producida por la corona de perforación y las zonas con alto grado de meteorización (IV, V, y VI). La figura siguiente describe las categorías de caracterización utilizadas. Dempers (1994) denomina el molido como “matriz”, y la define como el material que va desde la arena a trozos más largos de roca que derivan de fallamientos, cizalles, y horizontes deformables.

Figura N° 6, Determinación del largo de los testigos y el ángulo con respecto al eje del sondaje.



Fuente: Dempers, 1994.

Tabla N° 9, Categorización de estructuras según su ángulo con respecto al eje del testigo.

Angulo C/R Eje	Descripción
0°-30°:	Número de fracturas con un ángulo entre 0 y 30° respecto al eje del testigo.
30°-60°:	Número de fracturas con un ángulo entre 30 y 60° respecto al eje del testigo.
60°-90°:	Número de fracturas con un ángulo entre 60 y 90° respecto al eje del testigo.
Total:	Número total de fracturas, suma de los tres - 26 -tems anteriores.

Fuente: Villarroel, 1994.

Tabla N° 10. Clasificación del Tipo de Molido

Tipo Molido	Descripción
Fino	Material principalmente de grano fino con escasos fragmentos de mayor tamaño.
Medio	Es aquel que presenta una mezcla de arenas o suelo y fragmentos de roca más gruesos, siendo en general los fragmentos, menores o iguales al radio de la sección del testigo.
Grueso	Predominan los fragmentos de tamaño superior al radio del testigo, pero se presentan como trozos donde no se puede reconstruir el cilindro original de perforación.

Fuente: Villarroel, 1994.

Grado de Meteorización. Para cada tramo considerado se realizará una estimación del grado de meteorización de acuerdo a lo recomendado por ISRM (1981), que se presenta en la figura siguiente.

Tabla N° 11, Grado de Meteorización ISRM (1981).

TERMINO	DESCRIPCION	GRADO
Roca Fresca	No presenta signos visibles de meteorización en la roca: tal vez una leve decoloración en las superficies de las discontinuidades mayores.	I
Levemente Meteorizada	La decoloración indica meteorización de la roca y en las superficies de las discontinuidades. La roca en su totalidad puede estar decolorada por la meteorización y puede estar externamente algo más débil, que en su condición fresca.	II
Moderadamente Meteorizada	Menos de la mitad de la roca esta descompuesta y/o desintegrada como un suelo. La roca fresca o decolorada se puede presentar como colpas o testigos continuos.	III
Muy Meteorizada	Más de la mitad de la roca esta descompuesta y/o desintegrada como un suelo. La roca fresca o decolorada se puede presentar como colpas o testigos discontinuos.	IV
Completamente Meteorizada	Toda la roca está descompuesta y/o desintegrada como un suelo. La estructura original del macizo aún se mantiene en gran parte intacta.	V
Suelo Residual	Toda la roca está convertida como suelo. La estructura del macizo y la fábrica del material están destruidas. Existe un gran cambio de volumen, sin embargo el suelo no ha sido transportado significativamente.	VI

Fuente; ISRM, 1981.

- **Mapeo por tramos geotécnicos.**

Una vez completado el mapeo básico se procede a la definición de los tramos geotécnicos, para ello, se debe revisar los núcleos del sondaje completo y definir tramos de sondajes de iguales características geotécnicas (ver tabla N° 12).

Dentro de la definición de tramos geotécnicos se deberán considerar en especial los cambios litológicos, de alteración y mineralización. Es importante en este caso apoyarse en el registro del levantamiento geológico. Los tramos definidos serán caracterizados de acuerdo a los parámetros geotécnicos que se muestran en la figura siguiente, que corresponde al formato de Mapeo por Tramos Geotécnicos.

Tramo Geotécnico Este parámetro está constituido por la posición de inicio (DESDE) y la posición de termino (HASTA) de un tramo de igual calidad geotécnica, el cual es definido por la persona que efectúa el levantamiento geotécnico.

Tabla N° 12, Formato de Mapeo por Tramos Geotécnicos.

Tramo Geotécnico		Caracterización de Estructuras						Caracterización Matriz de la Roca		Estimación GSI	
DESDE	HASTA	RUGOSIDAD JRC	Resist Pared	Alteración Paredes	Relleno			Resistencia de la matriz	Grado de Meteor.	Estructura	Condición
					Tipo	Espesor Mm	Resistencia				

Fuente: Ingeroc, 2011. Los resultados están en el anexo N° 3.

2.7. MARCO CONCEPTUAL

2.7.1. MECANICA DE ROCAS

La mecánica de roca se ocupa del estudio teórico y práctico de las propiedades y comportamiento mecánicos de los materiales rocosos, y de sus respuestas ante la acción de la fuerza aplicada en su entorno físico.

El desarrollo de la mecánica de rocas se inicio como consecuencia de la utilización del medio geológico para obras superficiales y subterráneas; entre otros en la explotación de los recursos minerales. Los distintos ámbitos de aplicación de la mecánica de rocas se puede agrupar en aquellos en que la roca constituye la estructura principal (excavación de túneles, galerías, taludes, casas de maquinas y etc.), aquellos en que la roca es el soporte de otras estructuras (cimentaciones de edificios, presas, etc.).

La mecánica de rocas guarda una estrecha relación con otras disciplinas como la geología estructural, para el estudio de los procesos y estructuras tectónicas que afectan el basamento rocoso; mientras que la mecánica de suelos, para abordar el estudio de rocas alteradas y meteorizadas en superficie.

Las caracterización de la roca y de los macizos rocosos y el estudio de su comportamiento mecánico y deformacional es compleja debido a la gran variabilidad de características y propiedades que presentan y el elevado numero de factores que lo condicionan su estabilidad y su proyección de las medidas de sostenimiento, en el momento de excavación del proyecto subterráneo.

La finalidad de la mecánica de rocas es conocer y predecir el comportamiento de los materiales rocosos ante la actuación de fuerzas internas y externas que ejercen sobre ellos. Cuando se excava un macizo rocoso o se construye estructuras sobre las rocas se modifican las condiciones iniciales del medio rocoso, el cual responde a estos cambios deformándose y generándose rupturas por fallas activas, estallidos de rocas, presiones actuantes y otros factores, como movimientos sísmicos.

2.7.2. MACIZO ROCOSO

Unidad geológica de afloramiento de todo tipo de roca que distingue habitualmente la geología, como la roca de basamento para obras de ingeniería; así como túneles; galerías subterráneas; casas de maquinas; cimentaciones y otros.

Matriz rocosa es de material rocoso exento de discontinuidades, o los bloques de “rocas intacta” que queda entre ellas. La matriz rocosa, a pesar de considerarse continua, presenta un comportamiento heterogéneo y anisótropo ligado a su fábrica y a su microestructura mineral. Mecánicamente queda caracterizada por su peso específico, resistencia y deformabilidad. Datos que detallan en el registro lineal.

La discontinuidad es cualquier plano de origen mecánico o sedimentario que independiza o separa los bloques de matriz rocosa en un macizo rocoso. Generalmente la resistencia a la tracción de los planos de discontinuidades es muy baja a nula. Su comportamiento mecánico queda caracterizado por su resistencia al corte o en su caso, por el material de relleno (Gonzalo de Vallejo L. 2002)

2.7.3. CLASIFICACION GEOMECANICA DEL MACIZO ROCOSO

La clasificación del macizo rocoso están basadas en algunos o varios factores que determinan su comportamiento mecánico.

- Propiedades de la matriz rocosa
- Frecuencia y tipo de discontinuidades, que definen el grado de fracturamiento, el tamaño y la forma de los bloques del macizo, sus propiedades hidrogeológicas, etc.
- Grado de meteorización o alteración
- Estado de tensiones in situ
- Presencia de agua

La gran variabilidad de estos factores y el carácter discontinuo y anisótropo de los macisos rocosos implican la dificultad para establecer clasificaciones geotecnicas o geomecánicas generales validas para los diferentes tipos de macizos.

Las clasificaciones más útiles en mecánica de rocas son las denominadas clasificación geomecánica RMR de Bieniawski y el índice Q de Barton son las más utilizadas. Establecen diferentes grados de calidad de macizo en función a las propiedades de la matriz rocosa y de las discontinuidades y proporcionan valores estimados a sus propiedades resistentes globales.

Existen otras clasificaciones basadas en diferentes parámetros más o menos representativos de las propiedades del conjunto del macizo rocoso. Así como el grado de fracturamiento; el índice de calidad de roca RQD, y clasificación en diferentes grados de calidad.

La obtención de los parámetros geomecánicos, se hace mediante la investigación del comportamiento del macizo; para su ejemplo en el diseño y proyecto de las obras de ingeniería. Los macizos rocosos, como medios discontinuos presentan un comportamiento geomecánico complejo que, de una forma simplificada, pueden ser estudiados y categorizados en función de su aptitud en sus distintas aplicaciones. Con este objetivo surgieron las clasificaciones geomecánicas, que aportan, mediante las observaciones directas de las características de macizo rocoso y la realización de sencillos ensayos; índices de calidad relacionados con los parámetros geomecánicos del macizo y sus características frente a los sostenimientos de túneles y otras obras de ingeniería.

2.7.4. SISTEMA DE CLASIFICACION RMR

Para la clasificación geomecánica del macizo rocoso, en las excavaciones subterráneas, se ha considerado utilizar los parámetros propuestos por Bieniawsky (1979), sistema de valoración del macizo rocoso (Rock Mass Rating), comúnmente denominado RMR, cuyo procedimiento consta de los siguientes parámetros.

1. Resistencia a la compresión uniaxial del material rocoso
2. Índice de calidad de roca RQD
3. Espaciamiento de las juntas
4. Estado de las fisuras
5. Condiciones hidrogeológicas de las aguas subterráneas
6. Corrección de las orientaciones de las discontinuidades

La existencia de los parámetros en el comportamiento geomecánico de un macizo se expresa por el índice de calidad RMR, que varía de 0 – 100. Para la clasificación de RMR se divide el macizo rocoso en zonas o tramos que presentan características geológicas más o menos uniformes de acuerdo con las observaciones hechas en campo, en las que se lleva a cabo la toma de datos y medidas referentes a las propiedades y características de la matriz rocosa y de las discontinuidades.

La clasificación geomecánica constituye un procedimiento para la caracterización de los macizos rocosos a partir de datos de afloramiento y sondeos, y se aplican principalmente a los túneles, dado la dificultad del estudio de los macizos rocosos a profundidad. Pero igualmente se aplica a la caracterización de los macizos en forma general, como medio para clasificar geotécnicamente las rocas (ver tabla 13). El cálculo del índice RMR permite estimar los parámetros de resistencia y deformabilidad del macizo.

Tabla N° 13, clasificación del macizo rocoso (RMR).

PARAMETROS DE RMR	TIPO DE ROCA	CONDICION
100 - 81	I	Muy buena roca
80 - 61	II	Buena roca
60 - 41	III	Roca regular
40 - 21	IV	Roca mala
< 20	V	Roca muy mala

Fuente: Bieniawsky, 1979.

Para su aplicación es necesario llevar a cabo una serie de observaciones y medidas en campo, que constituye la base y la sistemática práctica del parámetro geomecánicos. Las clases de macizos que se obtiene se refieren a las condiciones previas a la excavación, y en su descripción debe indicarse si se ha aplicado correcciones por orientación de discontinuidades u otras específicas para los túneles.

2.7.5. CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO “Q”

Esta clasificación fue propuesta por Barton, Lien y Luden del N. G. I. (norwegian Geotecnical Institute), consiste determinar el índice de la calidad de roca con la siguiente relación.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}, \text{ donde}$$

R.Q.D : Índice de calidad de la roca.

J_n : Índice de diaclasado que indica el grado de fracturación.

J_r : Índice de que contempla la rugosidad, relleno y continuidad de las discontinuidades.

J_a : Índice de alteración de las discontinuidades.

J_w : Coeficiente reductor por la presencia de Agua.

SRF : (Stress reduction factor) Coeficiente que tiene en cuenta la influencia del estado tensional sobre el macizo rocoso.

El primer coeficiente ($R.Q.D./J_n$) representa la estructura de la masa rocosa es una medida aproximada del tamaño de los bloques o partículas, los que generalmente se observan para la estabilidad del túnel.

El segundo coeficiente (J_r/J_a) representa la rugosidad y las características de fricción de las paredes de las discontinuidades o del material del relleno, que se encuentra en la obtención de las perforaciones diamantinas.

El tercer y último coeficiente (J_w/SRF) representa la pérdida de carga, e las excavaciones subterráneas y la presión de confinamiento del macizo de acuerdo de acuerdo a las profundidades, las condiciones de flujo de aguas subterráneas, el tipo de relleno, la resistencia de la roca y otros aspectos que afectan al comportamiento geomecánico.

2.7.6. INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA (GSI) (HOEK – BROWN)

Para la obtención de los parámetros de roca intacta y del macizo rocoso se utilizó la metodología definida por Hoek y Brown (1997), basados en el Índice Geológico de Resistencia (GSI – Geological Strength Index). Para ello, Hoek y Brown (1997), proponen la siguiente correlación:

Si se utiliza la versión del RMR 1989 de Bieniawski, entonces $GSI = RMR_{89} - 5$, donde RMR_{89} asigna 15 puntos a la condición de aguas subterráneas (condición seca), y en su condición in situ, sin ajuste por orientación de discontinuidades.

$$GSI = RMR_{89} - 5$$

A partir de esta formulación se obtuvieron los valores GSI, los que sumados a los resultados de los ensayos de laboratorio, permiten la obtención de parámetros de roca y macizo rocoso de acuerdo a la metodología definida por Hoek.

Para la estimación de las propiedades de la masa rocosa se utilizó la metodología definida por Hoek (2002 y 2006), la cual a partir de los antecedentes proporcionados desde las diferentes campañas de exploración y sus ensayos de laboratorio (determinación de propiedades de la roca intacta) permite, en conjunto con las características generales de las obras a realizar, estimar las propiedades de la masa rocosa.

La metodología propuesta por Hoek se presenta detallada y a grandes rasgos permite la obtención de los parámetros de la masa rocosa a partir de las propiedades de la roca intacta obtenida desde ensayos de laboratorio. Esta metodología permite obtener las propiedades de la masa rocosa basándose en una serie de fórmulas empíricas, las cuales se correlacionan adecuadamente con los escasos ejemplos de ensayos in situ que han sido realizados a lo largo de la historia.

Figura N° 7, Estimación del Índice Geológico de Resistencia. GSI.

ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO	CONDICIONES DE LOS LABIOS DE LAS DISCONTINUIDADES				
	MUY BUENA	BUENA	MEDIA	MALA	MUY MALA
<p>INTACTO O MASIVO Muestras intactas de roca o macizos rocosos masivos con pocas discontinuidades muy espaciadas.</p>	90			N/A	N/A
<p>FORMADO POR BLOQUES Macizo rocoso consistente en bloques cúbicos delimitados por tres familias de discontinuidades, con los bloques bien encajados.</p>	80	70			
<p>FORMADO POR MUCHOS BLOQUES Macizo rocoso formado por bloques angulares de muchas caras delimitados por cuatro o más familias de discontinuidades. Los bloques están encajados pero sólo parcialmente.</p>		60	50		
<p>FORMADO POR MUCHOS BLOQUES, DISTORSIONADO Y BANDEADO Plegado con muchos bloques angulares formados por la intersección de muchas familias de discontinuidades. Planos de estratificación o de esquistosidad persistentes.</p>			40	30	
<p>DESINTEGRADO Macizo rocoso muy fracturado con una mezcla de bloques angulares y redondeados débilmente encajados.</p>				20	
<p>LAMINADO Y CIZALLADO Debido a la existencia de numerosos planos débiles muy próximos de esquistosidad o de cizalla, no existen bloques.</p>	N/A	N/A			10

ENCAJE DECREciente ENTRE LOS TROZOS DE ROCA

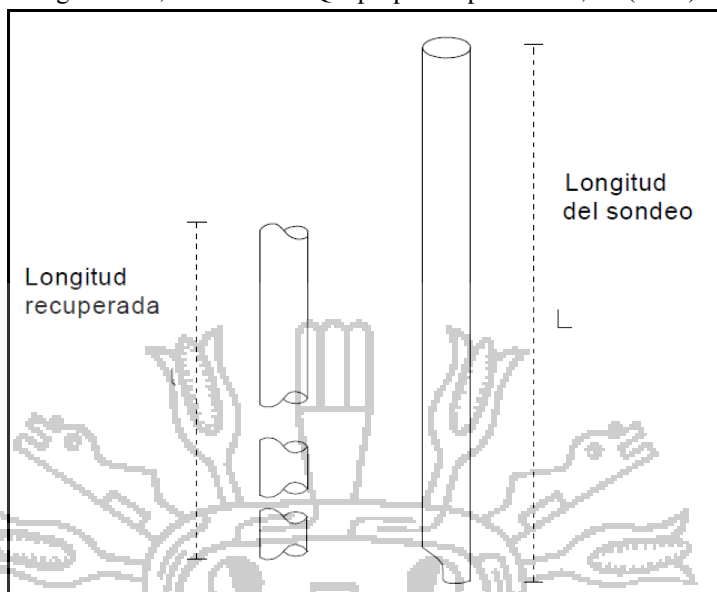
NOTAS SOBRE LAS CONDICIONES DE LOS LABIOS DE LAS DISCONTINUIDADES
 MUY BUENA : superficies muy rugosas y sanas
 BUENA : superficies rugosas, ligeramente meteorizadas y teñidas de óxido
 MEDIA : superficies lisas y moderadamente meteorizadas y alteradas
 MALA : superficies con espejos de falla y altamente meteorizadas, con rellenos de fragmentos angulares o con recubrimientos compactos
 MUY MALA : superficies con espejo de falla altamente meteorizadas con recubrimientos o rellenos de arcillas blandas

Fuente: Hoek & Brown, 1997.

2.7.7. INDICE DE CALIDAD DE ROCA (RQD)

El RQD (rock Quality Designation), es una medida del grado de fracturamiento del macizo rocoso, propuesta por Deere, D. (1964) que se expresa como una relación porcentual de la sumatoria de los testigos carentes de discontinuidades naturales mayores de 10cm. Y la longitud del tramo perforado; en el registro de perforación se representa también gráficamente, diferenciándolo de la recuperación de la muestra, con un achurado diferente.

Figura N° 8, cálculo del RQD propuesta por Deere, D. (1964).



La fórmula a aplicar es:

$$RQD = \frac{\text{Longitud recuperada en piezas} \geq 0,10 \text{ m} \times 100}{\text{Longitud del sondeo}}$$

donde:

I = Longitud recuperada (en metros)

L = Longitud del sondeo (en metros)

Tabla N° 14, Índice de calidad de roca.

RQD %	CALIDAD DE ROCA
<25%	Muy mala
25 – 50%	Mala
50 – 75%	Regular
75 – 90%	Buena
90 – 100%	Muy buena

Fuente: ISRM, 1978.

2.7.8. PLANOS PRINCIPALES DE SISTEMA DE DISCONTINUIDADES

De acuerdo al análisis de las condiciones de esfuerzo cortante que actúa en el macizo rocoso; son los principales planos de deformación que crean cuñas de caídas y la inestabilidad del macizo, que esta directamente relacionados a la deformabilidad de la actividad tectónica, al movimiento de los flujos de aguas subterráneas, el grado de alteración de la roca matriz; es decir relacionados a los principales fallamientos locales y regionales, que intervienen en el desplazamiento de planos de juntas principales, con respecto a otros planos que crean brechamiento en la matriz del macizo rocoso.

2.7.9. JUNTAS

Son sistema de fracturamiento que se observan en las obras subterráneas, son juntas que no presenta desplazamientos algunos con respecto a un bloque de apoyo. Muchas de las juntas se presentan paralelos al dominio estructural de fallas dominantes en el macizo rocoso, en la deformación del macizo.

La mayoría de las yuntas, presentan relleno de roca triturada entre los planos de diaclazamiento y/o fracturamiento; los mismos que no inestabilizan al macizo; se observa el auto-sostenimiento de los bloques que constituyen la matriz rocosa.

2.7.10. ANGULO DE FRICCIÓN

Es la resistencia al deslizamiento causado por la fricción que hay entre las superficies de contacto entre partículas y su densidad. Como los suelos granulares tienen superficies de contacto mayores y cuyas partículas especialmente si son angulares estas presentan una buena trabazón tendrán fricciones internas altas. En cambio los suelos finos las tendrán bajas.

La fricción interna de suelo está definida por el ángulo cuya tangente es la relación entre fuerza del deslizamiento a lo largo de un plano y la fuerza normal "P" aplicada a dicho plano. Los valores de este ángulo llamado, ángulo de fricción interna ϕ , varían de 0° para arcillas plásticas cuya consistencia es próxima a su límite líquido, hasta 45° o más y para gravas, arenas secas compactas de partículas angulares, generalmente el ángulo es alrededor de 30° .

CAPITULO III

3. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INVESTIGACIÓN

3.1. UBICACIÓN

El Proyecto Quellaveco se encuentra en el Departamento de Moquegua, Provincia de Mariscal Nieto, Distrito de Torata, Perú. Corresponde a un pórvido (Cu-Mo) alineado al NW, cuyo segmento central está emplazado en el lecho del río Asana. Ante lo anterior, el proyecto requiere el desvío de las aguas del río Asana, para lo cual se ha diseñado una barrera y túnel de desvío, los cuales conducirán las aguas del río Asana hasta aguas abajo del proyecto.

El portal de entrada del túnel de desvío se ubica entre las coordenadas UTM 8.108.407- 329.275 y 8.108.433–329.288, junto a la barrera de desvío, el cual se extiende por aproximadamente 7.690m, con una orientación general E-W, entre las coordenadas UTM 323.000 y 330.000, en la ribera norte del río Asana.

Tabla N° 15, coordenadas del Proyecto Túnel de Desvío Río Asana

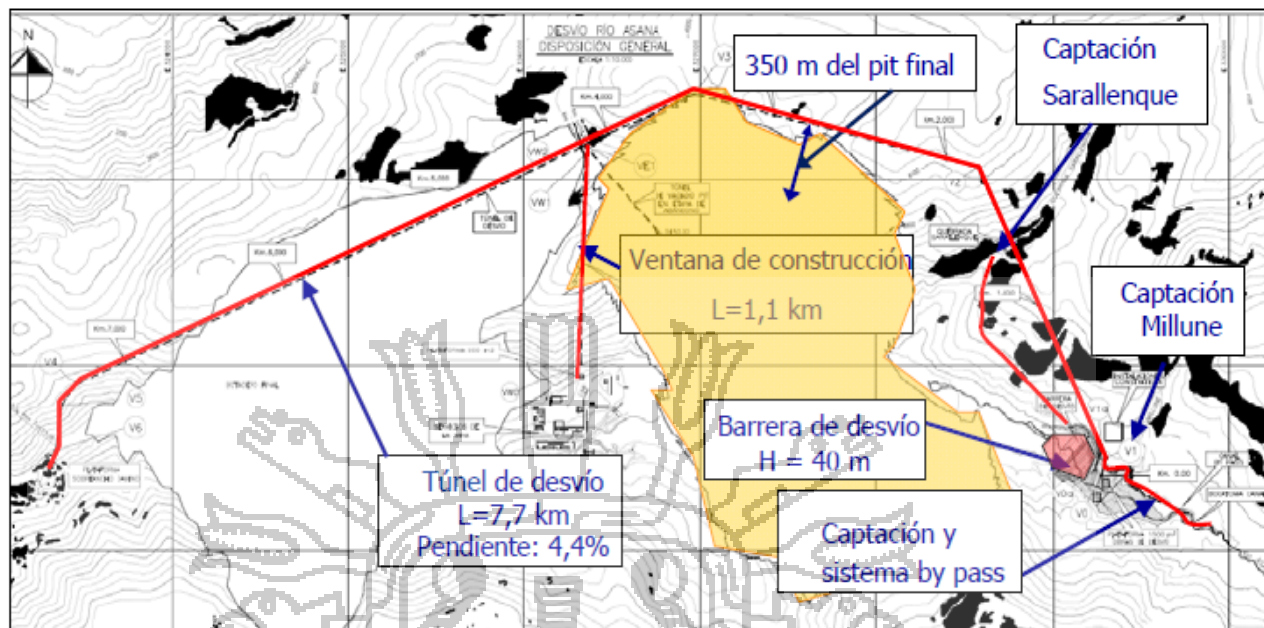
INICIO Y SALIDA DEL TÚNEL	COORDENADAS UTM		LONGITUD (m)	SECCIÓN DEL TÚNEL (m)
	NORTE	ESTE		
Portal de acceso	8.108.407	329.275	7.700m	4 x 4 tipo herradura
Portal de salida	8.108.433	323.390		
Portal de ventana	8.109.010	326.273	1.000m	
Final de ventana	8.110.102	326.318		

Fuente: Propia del tesista, Junio 2012.

Plano de ubicación del Proyecto Túnel de Desvío Río Asana – Quellaveco - Moquegua.

(Ver anexo N° 1, Plano N° 1)

Figura N° 9, Ubicación específica del Proyecto Túnel de Desvío Río Asana.



(Fuente: INGEROC 2011).

3.2. ACCESIBILIDAD

- Vía terrestre es accesible por la red vial panamericana sur Lima – Arequipa – Moquegua, esta vía asfaltada en toda su longitud 1.120 kilómetros. (aproximadamente 18 horas), para luego tomar la red de carretera Moquegua – Quellaveco, con una distancia de 75 kilómetros con un aproximado de 1 hora 30 minutos de recorrido.
- Vía aérea puede realizarse desde la capital Lima – Tacna. Tomando un tiempo de vuelo de (aproximadamente de 1 hora con 30 minutos). Para luego continuar el acceso terrestre de Tacna – Moquegua – Quellaveco.

Lima – Tacna: 1 370 Km. – 2 hora con 00 min. – vía aérea

Tacna – Moquegua: 2 horas – vía terrestre

Lima – Arequipa - Moquegua: 1 120 Km. – 18 horas - vía terrestre

Moquegua – Quellaveco: 75 Km. – 1.5 horas – vía Terrestre

3.3. CLIMA Y METEOROLOGÍA

El área de suministro de agua está ubicada en la zona altoandina, se caracteriza por presentar precipitación significativa en los meses de enero a marzo (100 mm) y empieza a disminuir en abril, hasta tener los valores más bajos en meses de mayo a noviembre. Respecto a las temperaturas tienen un promedio anual de 2.1 °C, con una temperatura mensual promedio más alta en febrero de 5.3 °C y una temperatura mensual menor de 2.1 °C en los meses de junio y julio.

El área de operaciones se encuentra ubicada en la zona media andina entre los 2 300 y 4 000 msnm, en general presenta un régimen térmico menos frío que el de la zona de suministro de agua, pudiendo clasificarse como un clima templado, bastante cálido en las zonas más bajas (2 300 – 2 800 msnm), y frío en las zonas altas (3 600 – 4 000 msnm). La temperatura media se encuentra entre 9.0 °C a 12.5 °C, no presentando una variación anual significativa y con una temperatura promedio anual de 10.8 °C.

La precipitación se caracteriza por presentar un comportamiento con dos periodos bien diferenciados, la época de lluvia (diciembre a marzo) y la época de sequía (abril a noviembre). Los niveles más altos de evaporación se presentan en los periodos de agosto a diciembre y los niveles más bajos en el periodo de enero a marzo.

El promedio anual para la velocidad del viento en la estación Quellaveco es de 3,0 m/s siendo el periodo comprendido entre mayo y agosto el que presenta los niveles más altos de viento y el comprendido entre enero y marzo, el periodo con el nivel más bajo.

La distribución de las velocidades a lo largo del día señala que los valores más altos de velocidad de viento se alcanzan entre las 12:00 y las 16:00 horas. La dirección predominante del viento es Este (E) durante la noche y Oeste (O) durante el día, siendo éste un comportamiento particular de los vientos de valle y montaña como en el caso de la zona de estudio.

La ruta de transporte de concentrados, línea de transmisión y zona de embarque se ubica en la región desértica de la costa y sierra del departamento de Moquegua, por ello, la caracterización climática se desarrolló a partir de una zonificación por pisos altitudinales. Walsh Peru Consultores S.A. 2012.

3.4. GEOLOGIA DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.4.1. GEOMORFOLOGIA

El área del proyecto está emplazada en el valle del río Asana, presentando una topografía cordillerana, característica del flanco andino. En el área de estudio se presentan cotas máximas entre 3.900 y 4.000 metros sobre el nivel del mar, las cuales contrastan con los 3.590 metros a los que se sitúa el río Asana, en el sector del portal de entrada al túnel.

El río tiene su nacimiento en un valle glaciar situado en la cadena de conos volcánicos ubicados al este del área de estudio, escurre de oriente a occidente y corresponde a uno de los principales tributarios del río Tumulaca, el cual a su vez tributa al río Moquegua. El río Asana presenta un régimen torrencial, cuyos eventos principales de escorrentía se producen con las lluvias estacionales.

En el entorno de la barrera de desvío se reconoce la presencia de terrazas fluvio-glaciales y un relieve suavizado hacia el lecho actual del río, relacionado con los potentes depósitos de material coluvial desprendido desde las cotas más elevadas.

Figura N° 10, Vista satelital del Proyecto Túnel de Desvío Río Asana.



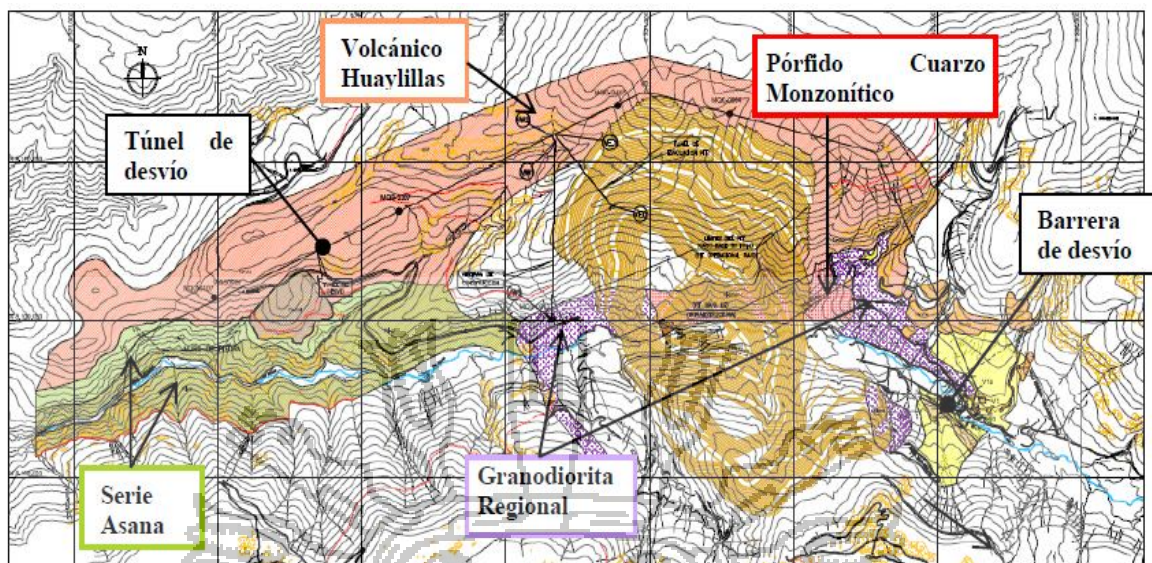
Fuente: Google Earth.

3.4.2. GEOLOGIA LOCAL (ver plano geológico en anexo N° 1, plano N° 2)

3.4.2.1. Riolita Asana

En el área de interés las rocas más antiguas, de edad Cretácico-Terciario, corresponden a tobas líticas riolíticas, en parte soldadas, pertenecientes a la unidad Volcánico Paralaque (Figura N° 11) y riolitas porfíricas de la unidad denominada Pórfidos Quellaveco. Estas unidades afloran principalmente al oeste de la zona mineralizada en el sector de Tala, constituyen una secuencia de aproximadamente 220 metros de color pardo grisáceo rojizo para las tobas y gris claro para las riolitas. Para efectos de este trabajo, ambas unidades se agrupan y toman la denominación de Riolita Asana. Se debe hacer mención que el tramo final del túnel y el portal de salida se encuentran proyectados sobre las rocas de la unidad Volcánico Paralaque, esta unidad no ha sido reconocida en el entorno de la barrera de desvío.

Figura N° 11, Geología del área de estudio del Proyecto túnel de Desvío Río Asana.

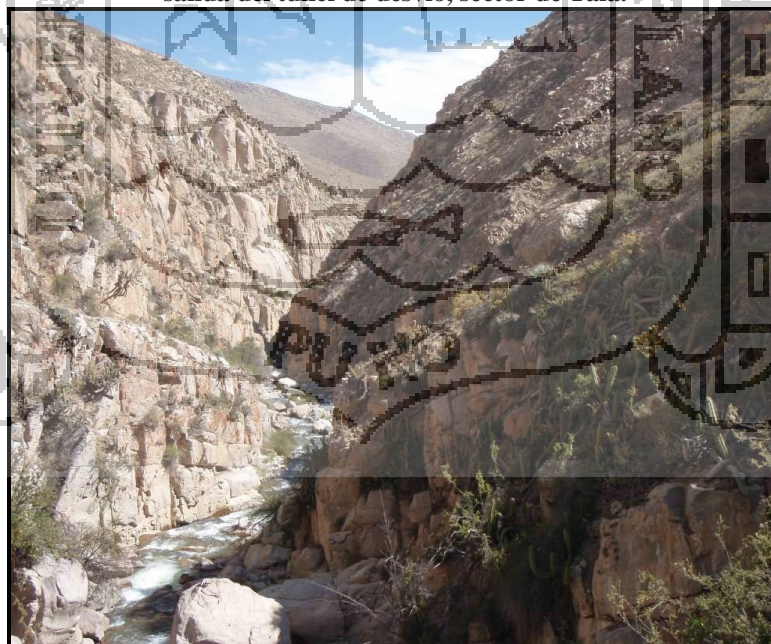


Fuente: Ingeroc, 2011.

3.4.2.2. Granodiorita

La actividad magmática continúa en el Cretácico Superior-Terciario con el desarrollo de cuerpos intrusivos de composición granodiorítica, correspondientes a la unidad denominada Granodiorita Regional, la cual aflora principalmente en el centro y oriente de la zona mineralizada, constituyendo un cuerpo elongado de dirección NW, de color gris claro con superficie meteorizada con desarrollo de planos de oxidación de color café y roca de composición granodiorítica con textura fanerítica, holocristalina y biotita - anfíbola como máficos principales (ver Figura N° 13).

Figura N° 12, Vista de los macizos rocosos de la unidad Volcánico Paralaqué en el entorno del portal de salida del túnel de desvío, sector de Tala.



Fuente: Ingeroc, 2011.

Figura N° 13, Fotografía de la granodiorita de anfibola-biotita del cuerpo intrusivo denominado Granodiorita en el sector de la Quebrada Sarallénque.



Fuente: Ingeroc, 2011.

La unidad granodiorítica se encuentra intruída (en alrededor de 20 fases) por cuerpos porfíricos cuarzo monzoníticos, ver Figura N° 14. Estos cuerpos, stocks en rigor, están asociados a los eventos mineralizadores del yacimiento Quellaveco.

Se encuentran emplazados bastante en el área de estudio, presentando una disposición elongada en un sentido NW, probablemente asociado al sistema estructural predominante en la granodiorita. A estos eventos intrusivos se asocian también procesos de brechas, ver Figura N° 15, el cual modifica las propiedades y características geotécnicas del macizo rocoso. Se describen dos tipos de brechas, las más extendidas presentan un origen en los procesos hidrotermales tempranos e intermedios, y se caracteriza por formar una masa bien consolidada con fragmentos de roca angulosos con escaso transporte. La segunda unidad de brecha descrita para el yacimiento corresponde a los “pebble dykes” o diques de guijarros, correspondientes a cuerpos de escasa representación, de espesores inferiores 5m, caracterizado por la presencia de una matriz degradada y fragmentos redondeados característicos de un transporte importante.

Figura N° 14, Pórfido Cuarzo Monzonítico intruyendo a la Granodiorita en el sector de la quebrada Millune.



Fuente: Ingeroc, 2011.

Figura N° 15, Fotografía de una caja de testigos del Sondaie MQG-0407 mostrando brechas y diques ubicado en el trazado del túnel de desvío al NW de la ubicación del rajo.



Fuente: Ingeroc, 2011.

3.4.2.3. Pórfido Quellaveco

En lo referido a los intrusivos pórfido cuarzo monzoníticos, en el entorno del yacimiento se reconocen los cuerpos intrusivos porfíricos monzoníticos intruyendo en tres etapas, en primer lugar se identifican los pórfidos monzoníticos tempranos, correspondiente al cuerpo de mayor extensión reconocido en el sector de Quellaveco, el cual se estima como el principal responsable de los procesos hidrotermales ligados a la mineralización del yacimiento. Se reconocen adicionalmente otras dos etapas, la intermedia y la tardía, de menor extensión. Los cuerpos temprano e intermedio se ven a su vez intruídos por diques porfíricos dacíticos.

3.4.2.4. Volcánico Huaylilla

De edad asignada al terciario afloran principalmente rocas volcánicas de la unidad Volcánico Huaylillas (Mioceno-Plioceno), las que corresponden a tobas líticas soldadas con fragmentos andesíticos de color pardo rojizo claro, tobas cineríticas con abundante pómez de color blanco grisáceo, ignimbritas e importantes niveles de cenizas de escasa cohesión.

Esta unidad cubre en discordancia de erosión a la unidad Granodiorita Regional y en otros sectores se reconoce sobreyaciendo, también en discordancia de erosión, a la unidad denominada Conglomerados Quellaveco.

Las ignimbritas del Volcánico Huaylillas infrayacen, en discordancia de erosión, a las andesitas de color gris oscuro de la unidad Volcánico Barroso (Plioceno-Pleistoceno), las que afloran en la parte más alta de la secuencia y de acuerdo a los antecedentes disponibles no se encontrarían en el trazado del túnel de desvío.

3.4.2.5. Depósitos resientes

La secuencia culmina con depósitos semiconsolidados a no consolidados morrénicos y fluvio-glaciales a cotas superiores a 4.200 m.s.n.m., depósitos no consolidados fluviales en los valles de ríos y quebradas y depósitos no consolidados coluviales en las laderas de cerros.

3.4.3. GEOLOGIA ESTRUCTURAL

A nivel regional se reconoce que el plegamiento andino afecta al complejo intrusivo granodiorítico y a la denominada Riolita Asana. Las rocas volcánicas más jóvenes (Huaylillas y Barroso) y los depósitos sobreyacentes, no se encuentran afectados por este plegamiento y muestran una disposición subhorizontal con inclinaciones de hasta 5°, localmente se reconocen inclinaciones mayores, probablemente asociadas a basculamientos de bloques asociados a tectónica.

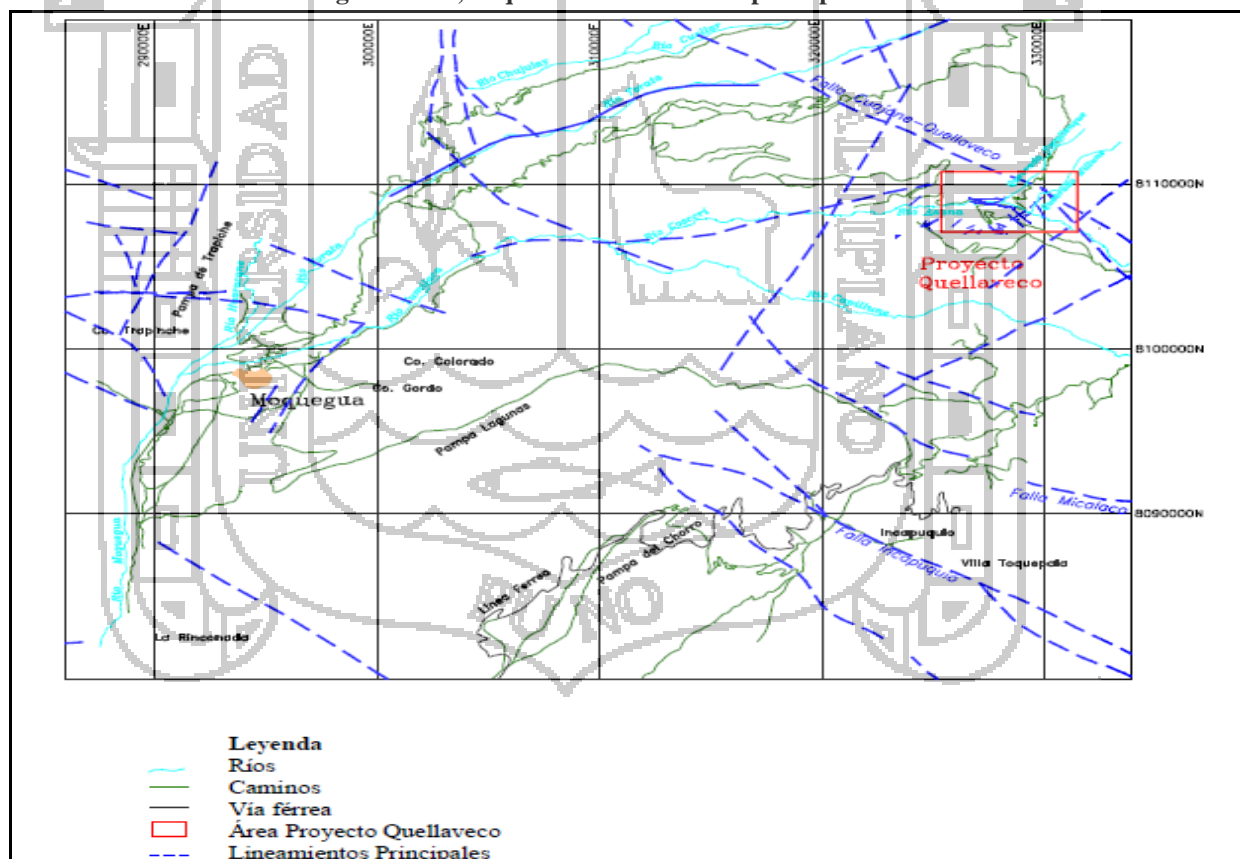
Respecto de las fallas mayores y lineamientos, se reconoce un estilo tectónico caracterizado por tres orientaciones estructurales preferenciales, NW, NE y EW, ver Figura N° 16. Se debe hacer mención que algunas de las estructuras visibles en la figura N° 16 fueron tomada desde los trabajos anteriores, por lo que en algunos de esos casos la ubicación es esquemática.

Las orientaciones, NW de buzamiento al norte y al sur, NE con buzamiento subverticales y EW con buzamiento al norte y subverticales, son ampliamente reconocidas en el sector del yacimiento, existiendo una coherencia entre los rasgos estructurales mayores y los rasgos estructurales locales del yacimiento Quellaveco.

A nivel local, en el entorno de las áreas del proyecto en estudio, vale decir el túnel de desvío del río Asana, se reconocen tres dominios estructurales.

Dos de estos dominios se encuentran emplazados en las rocas intrusivas que conforman la unidad de mayor extensión del proyecto (granodiorita, granodiorita brechada e intruida de porfido), en tanto que el tercero corresponde al dominio definido por las estructuras reconocidas en las unidades volcánicas de la serie Asana.

Figura N° 16, Esquema de estructuras principales.



Fuente: Ingeroc, 2011.

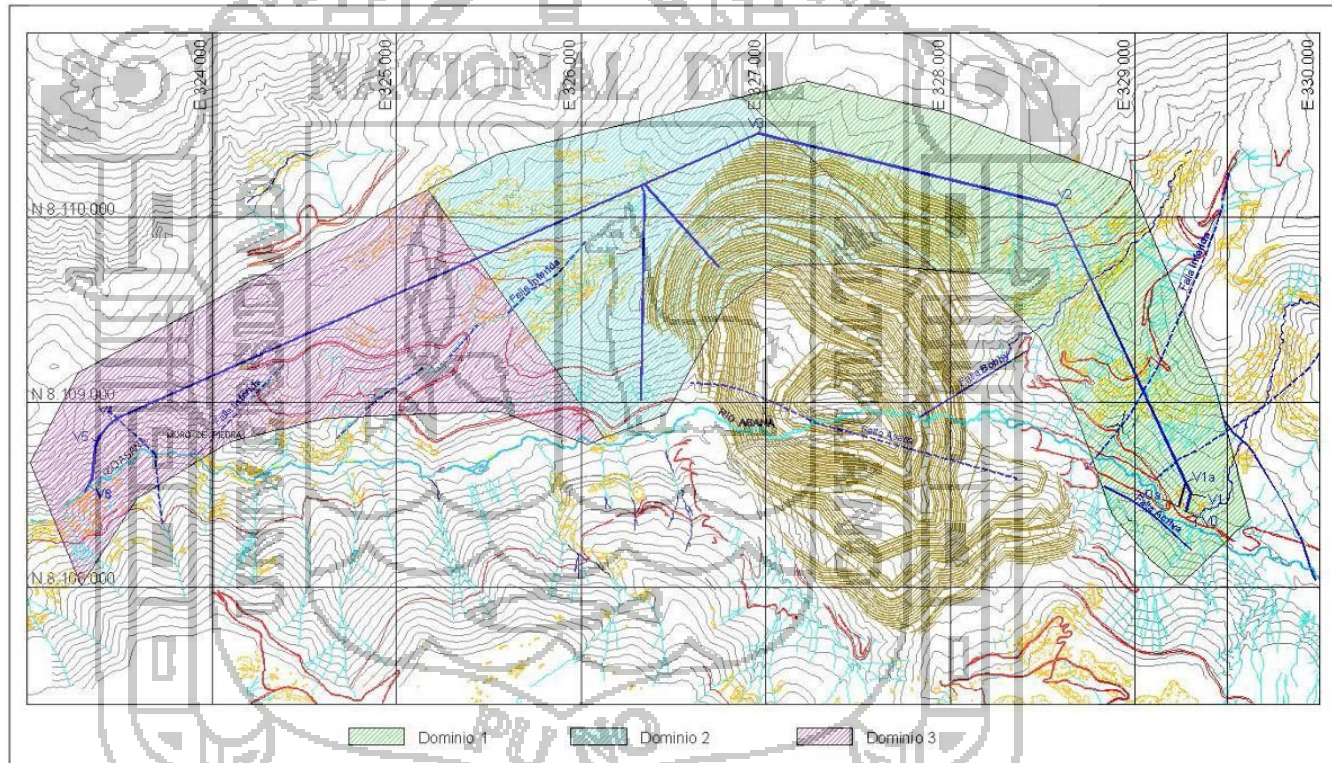
El límite entre los dominios I y II, ambos en el entorno de las rocas intrusivas, con el dominio III (en la serie Asana) está dado por la quebrada Quellaveco y su prolongación hacia el NW, básicamente definido por el contacto entre la granodiorita regional y la secuencia riolita Asana.

Respecto del límite entre los dominios I y II, se ha identificado al dominio I como las estructuras emplazadas en la granodiorita regional alejada del entorno de los pórfidos mineralizadores, emplazamiento en el cual se reconoce la presencia del dominio II, la disposición de los tres dominios identificados se presenta en la figura N° 17.

En los dominios I y II (Rocas Intrusivas), se emplaza más del 65% del túnel. Las orientaciones estructurales para cada uno de los dominios estructurales definidos en este trabajo se pueden ver en las figuras N° 18, 19 y 20.

Para la caracterización de los dominios estructurales se incorporaron los nuevos antecedentes de los sondeos MQG-0904, MQG-0107, MQG-1001, MQG-1002 y MQG-1003A.

Figura N° 17, Esquema mostrando los dominios estructurales principales.



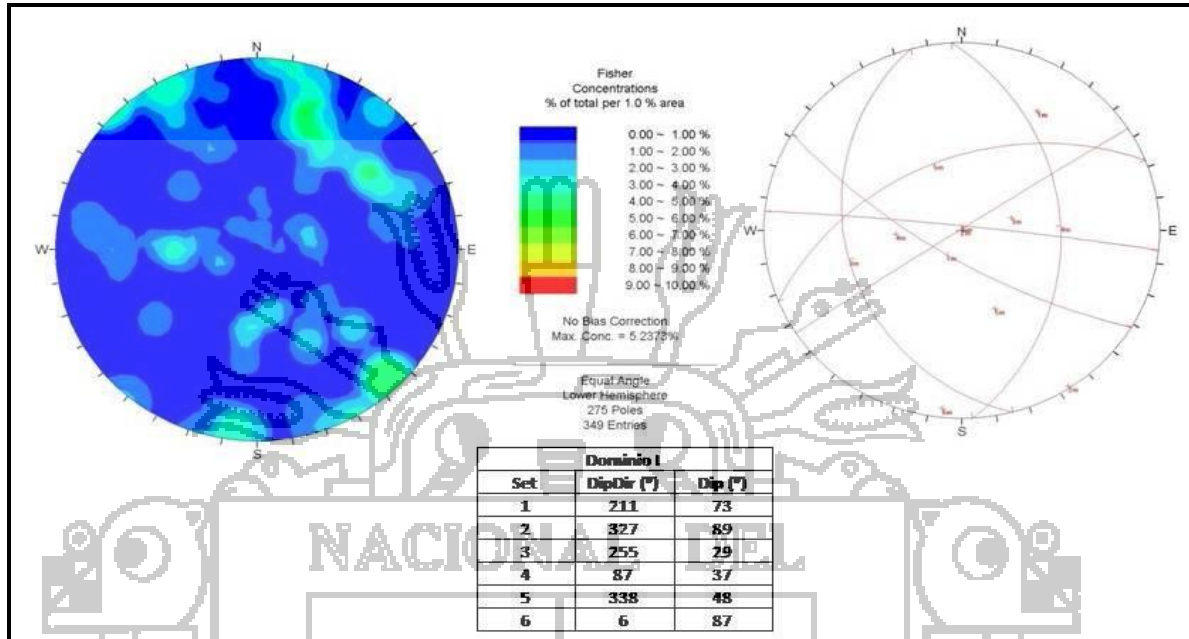
Fuente: Ingeroc 2011.

El dominio estructural I, ver figura N° 18 se caracteriza por una fuerte presencia de los sistemas estructurales de orientación ENE y WNW con buzamiento en general de alto ángulo tanto al sur como al norte. En menor medida se reconocen los sistemas NS de buzamiento moderado tanto al E como al W.

Para el caso del dominio estructural II, ver figura N° 19, definido en el entorno de las rocas graníticas intruídas por los pórfidos mineralizadores, se reconoce el dominio del sistema estructural

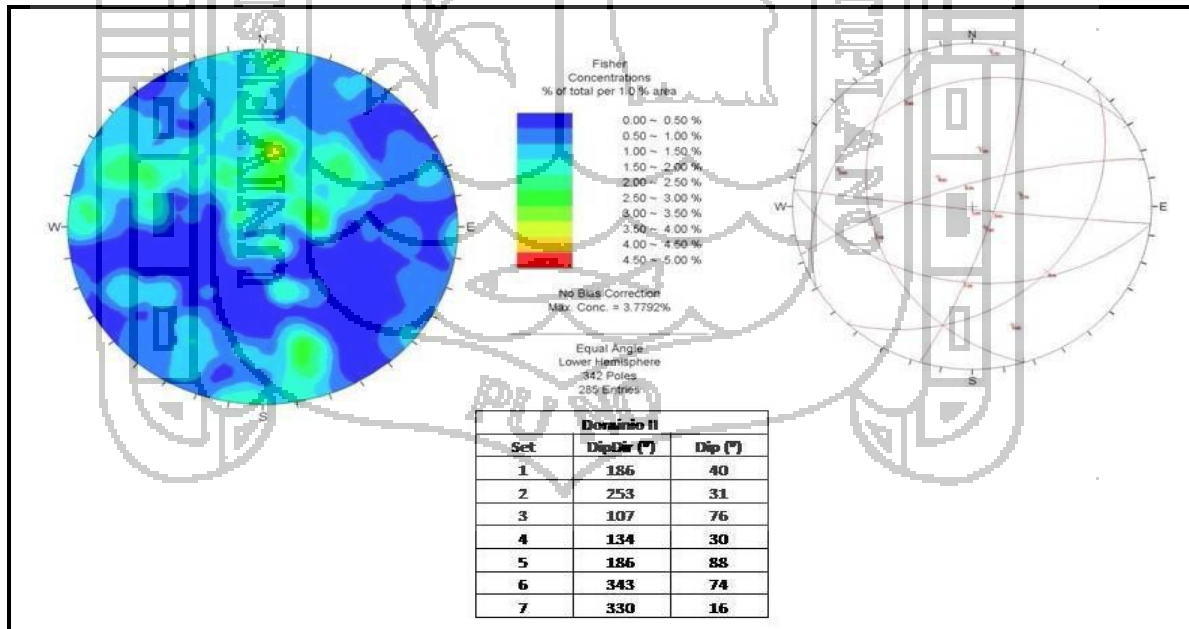
NE a EW. Los buzamientos en general son inferiores a 30° o superiores a 70°, en las diferentes orientaciones posibles.

Figura N° 18, Diagrama de concentración de polos y planos principales de estructuras Dominio I, Granodiorita.



Fuente: Ingeroc, 2011.

Figura N° 19, Diagrama de concentración de polos y planos principales diaclasas Dominio II, Granodiorita brechada e intruida de porfido.

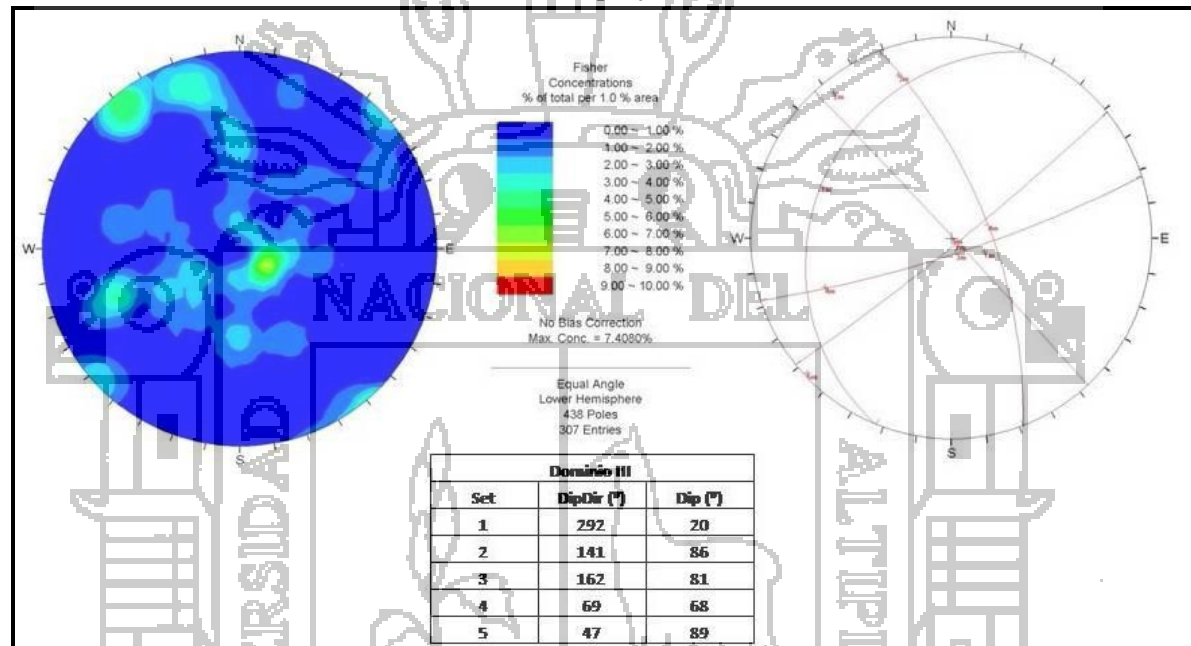


Fuente: Ingeroc, 2011.

El dominio estructural III, emplazado en las secuencias rocosas más antiguas del entorno del yacimiento, de edad asignada al Cretácico-Terciario denominadas Volcánico Paralaque y Pórfido

Quellaveco, ambos agrupados como la serie Asana, presenta el rasgo estructural mejor definido de los tres dominios identificados. En este dominio se reconoce la presencia de un sistema NNE con buzamiento de bajo ángulo hacia el W, un sistema NW en general de alto ángulo al E y un sistema NNE de buzamiento de alto ángulo al SE, lo anterior define claramente los sistemas estructurales que caracterizan a esta secuencia volcánica y que se refleja en afloramientos con la formación de bloques cúbicos de diferentes dimensiones, en función de la frecuencia de fractura de cada una de las unidades rocosas de la secuencia.

Figura N° 20, Diagrama de concentración de polos y planos principales estructuras Dominio III, Riolita Asana (Volcánico Paralaque y Pórfido Quellaveco).



Fuente: Ingeroc, 2011.

Se debe hacer mención que los dominios descritos pueden tener un desarrollo particular a lo largo de la traza del túnel, pudiendo encontrarse con zonas donde domina una orientación particular respecto de otra, con los consiguientes efectos sobre el macizo rocoso en el cual se emplaza el túnel.

La escasa exposición de los afloramientos rocosos en los cuales se emplazará el túnel de desvío, en particular en su zona central, no permite definir adecuadamente el arreglo estructural en detalle, aunque las variaciones locales en las orientaciones de las estructuras respecto a los tramos determinados del túnel, han sido definidas y consideradas a la hora de ajustar los parámetros geotécnicos del mismo. Los dominios estructurales por tramo son considerados en los capítulos correspondientes de este informe.

Respecto de la edad geológica de las estructuras, la gran mayoría de las orientaciones preferenciales reconocidas en terreno, presentan una escasa representación en las unidades volcánicas más jóvenes, Volcánico Huaylillas y Volcánico Barroso, las cuales conforman un “manto” que recubre las unidades geológicas más antiguas y sus propiedades o características estructurales. Sin embargo

lo anterior, se han reconocido en terreno fallas que presentaban actividad reciente, como la ubicada en la ribera izquierda en el sector de la barrera de desvío del río Asana, y otras que han sido descritas en el entorno del área de estudio y a las cuales se les asigna la actividad sísmica del área de estudio.

3.4.4. CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS

La información de ensayos de Lugeon efectuados en los sondajes MQG-0802, MQG- 0803, MQG-0807, MQG-0904, MQG-0905, MQG-1002 y MQG-1003A, permitieron determinar las permeabilidades de las unidades litológicas, presentados en tabla N° 16. El resumen de los ensayos se presenta en tabla N° 17.

Tabla N° 16, Valores de Permeabilidad unidades litológicas.

Unidad	Coefficiente de Permeabilidad cm/s
Granodiorita	2.4×10^{-6}
Granodiorita lixiviada	2.4×10^{-6}
Granodiorita brechada	2.4×10^{-6}
Granodiorita cercanías de falla	3.5×10^{-5}
Volcánico Paralaque	5.93×10^{-5}
Pórfido Cuarzo Monzonítico	3.8×10^{-5}

(Fuente: GMI Ingenieros Consultores, 2010).

Los resultados de los ensayos de Lugeon fueron clasificados de acuerdo a lo establecido por Olalla y Sopena (1991). Se debe tener en consideración que se aceptaron como válidos los ensayos de Lugeon realizados que cumplieran las siguientes condiciones:

- Mínimo de 5 etapas de escalones de presiones.
- Las dos primeras etapas deben ser ascendentes, la tercera etapa debe obtener presión máxima, y luego las 2 etapas restantes deben ser descendientes y de igual valor que los utilizados en las dos primeras etapas ascendentes.

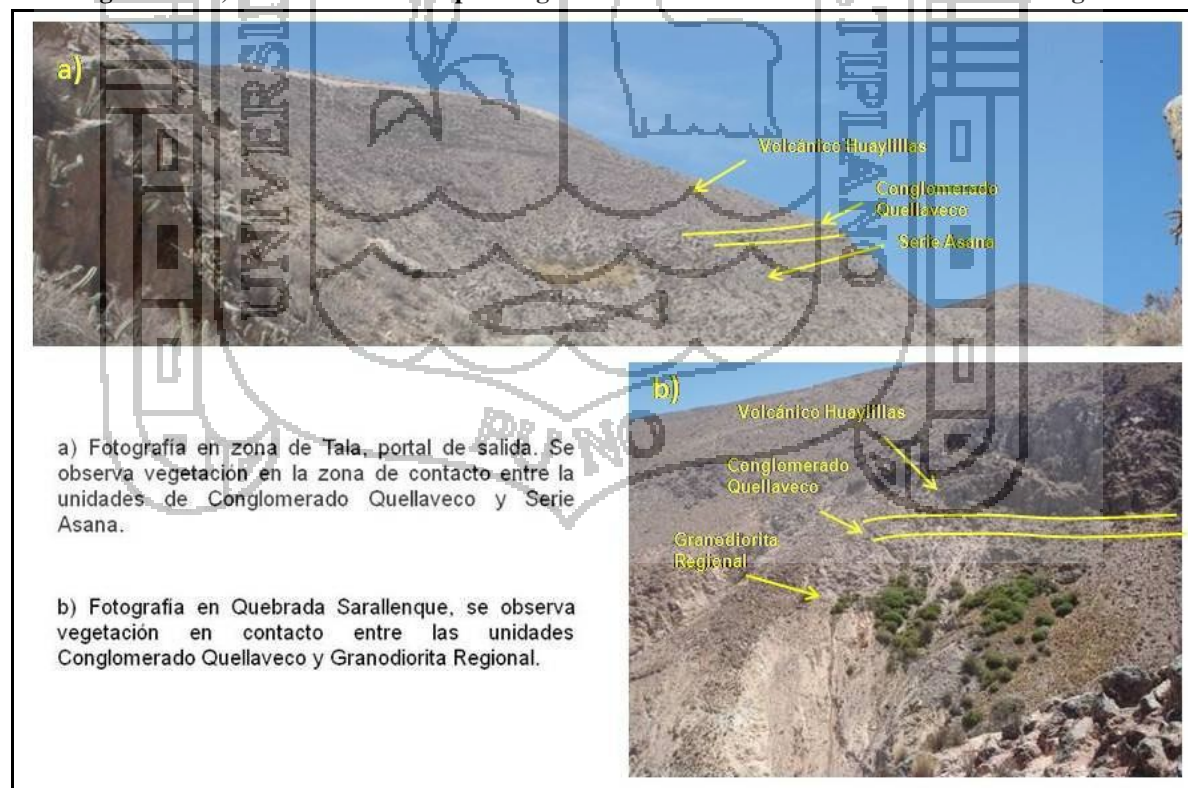
Sin embargo se debe hacer hincapié sobre las presiones máximas utilizadas, lo anterior debido a que normalmente este tipo de ensayo se encuentra definido para ser desarrollado logrando una presión máxima de 10 Kg/cm², con 10 min de inyección. Además de escalones sucesivos de carga y descarga 0, 3, 5, 7, 10, 10, 7, 5, 3 Kg/cm² con 10 min. Para todos los tramos ensayados de un mismo sondaje. La presión máxima utilizada podría cambiar según la presión a la cual será sometida la roca, sin embargo se debe utilizar la misma máxima presión y con los mismos escalones sucesivos, en todos los tramos ensayados, al menos por sondaje. Así se podrá hacer una buena comparación de U.L y permeabilidades entre tramos del sondaje y entre sondaje. Lamentablemente, para el caso de los ensayos del túnel de desvío esta condición no siempre se cumple.

La interpretación de los ensayos de Lugeon de los sondajes MQG-0802, MQG-0803, y MQG-0807 fueron realizadas, mientras que la interpretación usada para los ensayos de los sondajes MQG-0904, MQG-0905, MQG-1002 y MQG-1003, fue realizada por GMI. Los sondajes MQG-1002 y MQG-1003A se encuentran en zona de falla, por lo cual presentan altas permeabilidades que representan dicha singularidad, mientras que los sondajes MQG-0802, MQG-0803 y MQG-0807 se encuentran en la zona de la barrera de desvío, y corresponden a sondajes someros y que además interactúan con la falla Asana, por lo tanto presentan altas permeabilidades que representan este ambiente. Por lo cual, para determinar la permeabilidad de las unidades de Granodiorita se utilizaron los datos de permeabilidades de sondaje MQG-0904, que presenta permeabilidades coherentes con lo observado en terreno, donde la unidad de granodiorita regional presenta las características de menor permeabilidad tal como se muestra en Figura N° 21, fotografía b).

En figura N° 21 se observan zonas con vegetación, que se interpretan como el afloramiento de la napa de agua. Este afloramiento se debe al contacto entre distintas unidades litológicas de diferentes permeabilidades, la granodiorita y Serie Asana de menor permeabilidad, el Conglomerado Quellaveco muy permeable y el Volcánico Huaylillas moderadamente permeable.

El nivel de aguas subterráneas N.A.S, fue estimado a partir del estudio realizado por Water Management Consultants y de observaciones estimadas en terreno. Y en general corresponde a 200m bajo la superficie.

Figura N° 21, Afloramiento de napa de agua en los contactos de distintas unidades litológica.



Fuente: Water Management Consultants Perú S.A (2009).



Tabla N° 17, Resumen Ensayos de Lugeon de sondajes en túnel de desvío.

Sondaje	N°	Tramo (m)		Observaciones ensayo	Etapas	Presión Máxima	LUGEOON		Tipo
		De	Hasta				18 kg/cm ²	1 kg/cm ²	
MQG-1002*	1	320.00	325.65	Normal	5	1	2.00	2.80E-06	Dilatación
MQG-1002*	2	324.25	330.25	Normal	5	1	1.99	2.80E-06	Erosión
MQG-1002*	3	332.10	337.10	Normal	5	1	3.99	2.80E-06	Dilatación
MQG-1002*	4	337.10	342.15	Normal	5	1	3.78	4.90E-06	Dilatación
MQG-1002*	5	342.15	347.40	Normal	5	1	0.22	2.90E-06	Erosión
MQG-1002*	6	347.40	350.85	Normal	5	1	0.88	1.10E-06	Erosión
MQG-1002*	7	350.85	356.25	Normal	5	1	0.23	3.00E-06	Laminar
MQG-1002*	8	356.25	361.25	Normal	5	1	0.48	6.30E-06	Dilatación
MQG-1002*	9	361.25	366.25	Normal	5	1	0.43	5.80E-06	Dilatación
MQG-1002*	10	366.25	371.30	Normal	5	1	1.07	1.40E-06	Dilatación
MQG-1002*	11	371.25	376.25	Normal	5	1	0.00	1.20E-06	Refrío
MQG-1002*	12	376.25	381.25	Normal	5	1	1.23	1.80E-06	Dilatación
MQG-1002*	13	381.25	386.25	Normal	5	1	2.57	3.30E-06	Dilatación
MQG-1003A*	1	167.05	172.05	Normal	5	1	0.00	1.10E-06	Refrío
MQG-1003A*	2	172.05	177.05	By pass	5	1	0.00	0.00E+00	-
MQG-1003A*	3	177.05	182.05	Normal	5	1	2.93	3.80E-06	Laminar
MQG-1003A*	4	182.05	187.05	Normal	5	1	1.11	1.40E-06	Laminar
MQG-1003A*	5	187.05	192.05	Normal	5	1	2.47	3.20E-06	Laminar
MQG-1003A*	6	192.05	197.05	Normal	5	1	5.46	7.10E-06	Dilatación
MQG-1003A*	7	197.05	202.05	Normal	5	1	4.85	6.00E-06	Dilatación
MQG-1003A*	8	202.05	207.05	Normal	5	1	14.45	1.90E-04	Dilatación
MQG-1003A*	9	207.05	212.05	Normal	5	1	0.20	2.50E-06	Dilatación
MQG-1003A*	10	212.05	217.05	Normal	5	1	11.50	1.50E-04	Dilatación
MQG-1003A*	11	217.05	222.05	Normal	5	1	8.93	1.10E-04	Dilatación
MQG-1003A*	12	222.05	227.05	Normal	5	1	0.31	4.60E-06	Dilatación
MQG-1003A*	13	227.05	232.05	Normal	5	1	8.85	1.07E-04	Laminar
MQG-1003A*	14	232.05	237.05	Normal	5	1	0.21	2.50E-06	Laminar
MQG-1003A*	15	182.00	187.00	Paker doble	5	1	0.22	2.70E-07	Dilatación
MQG-1003A*	16	187.00	192.00	Paker Doble	5	1	0.44	5.70E-06	Dilatación
MQG-0905*	1	330.00	335.00	Bypass	1	0	Bypass	Bypass	-
MQG-0905*	2	338.00	340.35	Normal	5	10	0.56	5.12E-06	Refrío
MQG-0905*	3	343.00	346.00	Normal	5	3	0.92	9.98E-06	Laminar
MQG-0905*	4	346.80	351.25	Normal	5	3	3.74	4.19E-05	Turbulento
MQG-0905*	5	352.70	355.00	Bypass	1	1	-	-	-
MQG-0905*	6	357.00	360.00	Normal	5	3	2.3	2.05E-05	Laminar
MQG-0905*	7	361.00	365.00	Normal	5	3	10.69	1.18E-04	Laminar
MQG-0906*	8	366.00	370.00	Normal	5	3	10.26	1.33E-04	Dilatación
MQG-0906*	9	371.00	375.00	Bypass	2	2	-	-	-
MQG-0906*	10	375.00	380.00	Normal	5	3	8.99	1.01E-04	Lavado
MQG-0906*	11	380.00	385.00	Normal	5	3	4.87	6.45E-05	Dilatación
MQG-0904*	1	411.50	415.00	Normal	3	1	0.00	0.0E+00	-
MQG-0904*	2	415.00	420.00	Normal	5	1	0.00	0.0E+00	-
MQG-0904*	3	420.00	425.00	Normal	5	1	0.00	0.0E+00	-
MQG-0904*	4	425.00	430.00	Normal	5	1	0.22	1.7E-06	Dilatación
MQG-0904*	5	430.00	435.00	Normal	5	1	0.22	1.9E-06	Dilatación
MQG-0904*	6	435.00	440.00	Normal	5	1	0.63	6.2E-06	Dilatación
MQG-0904*	7	440.00	445.00	Normal	5	1	0.00	0.0E+00	-
MQG-0904*	8	445.00	450.00	Normal	5	1	0.00	0.0E+00	-
MQG-0904*	9	450.00	455.00	Normal	5	1	0.04	4.6E-07	Dilatación
MQG-0904*	10	455.00	460.00	Normal	5	1	0.22	2.0E-06	Refrío
MQG-0802*	1	8.00	12.00	Bypass	3	3	By Pass	By Pass	Dilatación
MQG-0802*	2	12.00	17.00	Normal	5	4	11.14	2.9E-04	Refrío
MQG-0802*	3	17.00	22.00	Bypass	0	1	By Pass	By Pass	-
MQG-0802*	4	22.00	27.00	Normal	5	10	2.98	7.0E-05	Erosión
MQG-0802*	5	27.00	32.00	Normal	5	10	1.66	1.6E-05	Erosión
MQG-0803*	1	5.00	10.00	Bypass	2	3	Bypass	Bypass	-
MQG-0803*	2	10.00	15.00	Bypass	2	3	Bypass	Bypass	-
MQG-0803*	3	15.00	20.00	Normal	5	7	0.43	6.1E-06	Laminar
MQG-0803*	4	20.00	25.00	Normal	5	10	5.46	5.6E-05	Turbulento
MQG-0803*	5	25.00	30.00	Normal	5	10	0.82	8.0E-06	Erosión
MQG-0807*	1	25.00	30.00	Normal	5.00	10	0.76	7.2E-06	Laminar
MQG-0807*	2	30.00	35.00	Normal	5.00	10	2.09	1.8E-05	Erosión

(Fuente; Ingeroc, 2011)

3.5. CLASIFICACION GEOMECANICA DEL MACIZO ROCOSO

Para el análisis geotécnico de las rocas del área de estudio se consideró el uso de dos sistemas de clasificación, el primero corresponde al “Rock Mass Rating” o RMR según Bieniawski (1989), sistema principal utilizado para la determinación de las características geotécnica de los macizos rocosos del sector de la barrera de desvío, y el segundo corresponde al “Sistema Q” según Barton (1974, 2000).

3.5.1. CLASIFICACION RMR.

La clasificación RMR de Bieniawski (1989) considera la evaluación de 5 parámetros geológico-geotécnicos de la roca, obteniéndose una primera calidad “RMR *in situ*”, para luego, en el caso de un túnel u otra obra, efectuar un ajuste por orientación de discontinuidades con respecto a la orientación de ésta.

En la tabla N° 18 se describe en forma general la clasificación del sistema RMR. (Resultados de la clasificación RMR ver en anexos N° 2 y N° 3)

Tabla N° 18, Determinación del Rock Mass Rating (RMR).

PARAMETRO	PUNTUACION
1.- RESISTENCIA DE LA ROCA INTACTA	0 a 15
2.- CALIDAD DEL TESTIGO PERFORADO RQD (%)	0 a 20
3.- ESPACIAMIENTO DE DISCONTINUIDADES	0 a 20
4.- CONDICIÓN DE DISCONTINUIDADES	0 a 30
5.- AGUA SUBTERRÁNEA	0 a 15
RMR <i>in situ</i> (suma parámetros)	0 a 100
AJUSTE POR ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES	0 a -12 túneles
	0 a -25 fundaciones
RMR ajustado (RMR <i>in situ</i> – ajuste)	100 -81 Roca Muy Buena
	80-61 Roca Buena
	60-41 Roca Regular
	40-21 Roca mala
	< 20 Roca Muy Mala

(Fuente: Ingerroc 2011).

- 1.- Resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa.
- 2.- R.Q.D. Grado de fracturación del macizo rocoso.
- 3.- Espaciado de las discontinuidades.
- 4.- Condiciones de las discontinuidades, el cual consiste en considerar los siguientes parámetros:
 - Abertura de las caras de la discontinuidad.
 - Continuidad o persistencia de la discontinuidad.
 - Rugosidad.
 - Alteración de la discontinuidad.
 - Relleno de las discontinuidades.



- 5.- Presencia del Agua, en un macizo rocoso, el agua tiene gran influencia sobre su comportamiento, la descripción utilizada para este criterio son: completamente seco, húmedo, agua a presión moderada y agua a presión fuerte.
- 6.- Orientación de las discontinuidades.

Para obtener el Índice RMR de Bieniawski se realiza lo siguiente:

Primero. Se suma los 5 variables o parámetros calculados, eso da como resultado un valor índice (RMR básico).

Segundo. El parámetro 6 que se refiere a la orientación de las discontinuidades respecto a la excavación.

$$RMR = (1) + (2) + (3) + (4) + (5)$$

Tabla N° 19, Determinación específica del Rock Mass Rating (RMR).

Parámetro		Rango de valores					
1	Resistencia de la roca intacta	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa		
	Ensayo carga puntual	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	
	Compresión simple					1-5 MPa	
	valor	15	12	7	4	< 1 MPa	
2	RQD	90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%	
	valor	20	17	13	8	3	
3	Espaciado de las discontinuidades	> 2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	6-20 cm	< 6 cm	
	valor	20	15	10	8	5	
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
		Valor	6	4	2	1	0
	Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm	
	Valor	6	5	3	1	0	
	Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave	
	Valor	6	5	3	1	0	
	Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm	
	Valor	6	4	2	2	0	
Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
	valor	6	5	3	1	0	
5	Flujo de agua en las juntas	Relación Agua/Aire	0	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5
		Condiciones Generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo
	valor	15	10	7	4	0	

Fuente: Bieniawski, 1989.



Tabla N° 20, Ajuste por orientación de discontinuidades

Dirección y buzamiento de las fisuras		Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorables
	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Fuente: Bieniawsky, 1979

Tabla N° 21, clasificación de roca según el total de valoración

Valoración	100 - 80	80 - 61	60 - 41	40 - 21	≤ 20
Clasificación	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Roca regular	Roca mala	Muy mala

Fuente: Bieniawsky, 1979.

Tabla N° 22, Características geotécnicas

Clasificación de la roca	I	II	III	IV	V
Tiempo medio de sostenimiento	10 años para un claro de 5m	6 meses para claro de 4 m	1 semana para claro de 3m	5 horas para claro de 15 m	30 minutos para claro de 1 m
Cohesión (KPa)	≥ 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	≤ 100
Angulo de fricción en grados	≥ 45°	40° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	≤ 15°

Fuente: Bieniawsky, 1979.

Tabla N° 23, orientaciones de las discontinuidades en el túnel.

Dirección perpendicular al eje del túnel				Dirección paralela al eje del túnel		Buzamiento de 0° - 20° cualquier dirección
Excavación en el sentido del buzamiento del echado		Excavación en contra al buzamiento del echado				
45° - 90°	20° - 45°	45° - 90°	20° - 45°	45° - 90°	20° - 45°	
Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable	Regular	Desfavorable

Fuente: Bieniawsky, 1979.

Tabla N° 24, calculo y clasificación del sistema RMR.



3.5.2. SISTEMA DE CLASIFICACION Q

La determinación del Sistema Q considera el análisis de 6 parámetros básicos en un rango de valores entre $Q = 0.001$ a $Q = 1000$ en una escala logarítmica de calidad del macizo rocoso (ver Tabla N° 25). Para este proyecto, los valores de Q han sido agrupados de forma diferente de manera de definir de mejor manera la fortificación necesaria para cada una de las clases de roca (ver Tabla N° 26).

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

Donde;

- R.Q.D : Índice de calidad de la roca.
- J_n : Índice de diaclasado que indica el grado de fracturación.
- J_r : Índice de que contempla la rugosidad, relleno y continuidad de las discontinuidades.
- J_a : Índice de alteración de las discontinuidades.
- J_w : Coeficiente reductor por la presencia de Agua.
- SRF : (Stress reduction factor) Coeficiente que tiene en cuenta la influencia del estado tensional sobre el macizo rocoso.

Tabla N° 25, Determinación del valor del “Sistema Q”.

PARÁMETRO	PUNTUACIÓN
Rock Quality Designation (RQD)	0-100
Joint Set Number (J_n)	0.5 a 20
Joint Roughness number (J_r)	1.0 a 4.0
Joint Alteration Number (J_a)	0.75 a 20.0
Joint Water Reduction Number (J_w)	0.05 a 1.0
Stress Reduction Factor (SRF)	1.0 a 20.0
$Q = (RQD/J_n) (J_r/J_a) (J_w/SRF)$	Varía de $Q=0.001$ a $Q=1000$
	1000-400 Excelente
	400-100 Extremadamente Buena
	100-40 Muy Buena
	40-10 Buena
	10-4 Regular
	4-1 Mala
	1-0.1 Muy Mala
	0.1-0.01 Extremadamente Mala
	0.01-0.001 Excepcionalmente Mala
Q Barton (2000)	

El primer coeficiente (R.Q.D./ J_n) representa el tamaño de los Bloques.

El segundo coeficiente (J_r/J_a) representa la resistencia al corte entre los bloques.

El tercer y último coeficiente (J_w/SRF) representa el estado tensional del macizo rocoso.



Tabla N° 26, Determinación de clase de roca en función de su rango de Q.

Clase	Rango de Q
I	$10 < Q < 1000$
II	$5 < Q < 10$
III	$0.4 < Q < 5$
IV	$0.1 < Q < 0.4$
V	$0.03 < Q < 0.1$
VI	$0.001 < Q < 0.03$

Fuente: Barton, 2000.

Tabla N° 27, Parámetros individuales de R.Q.D.

Descripción de la calidad del macizo rocoso	R Q D	Observaciones.
Muy pobre	0-25	Para R.Q.D < 10, se puede tomar R.Q.D.= 10 en la ecuación de Q.
Pobre	25-50	
Medio	50-75	
Buena	75-90	
Muy Buena	90-100	

Fuente: Barton, 2000.

Tabla N° 28, Parámetro: Índice de diaclasado Jn.

Índice de Diaclasado Jn	Valor
Roca Masiva	0,5 - 1
Una familia de diaclasas	2
Idem con otras diaclasas ocasionales	3
Dos familias de diaclasas	4
Idem con otras diaclasas ocasionales	6
Tres familias de diaclasas	9
Idem con otras diaclasas ocasionales	12
Cuatro o mas familias, roca muy fracturada	15
Roca triturada	20

Fuente: NGI Instituto Geotécnico Noruego.

Tabla N° 29, Parámetro: Índice de rugosidad Jr.

Índice de Rugosidad	Jr	Valor
Diaclasas rellenas		1
<i>Diaclasas limpias:</i>		
<i>Discontinuas</i>		4
Onduladas rugosas		3
Onduladas lisas		2
Planas rugosas		1,5
Planas lisas		1
<i>Lisos o espejos de falla</i>		
Ondulados		1.5
Planos		0.5

Fuente; NGI Instituto Geotécnico Noruego.

Tabla N° 30, Parámetro: Índice de alteración de las discontinuidades Ja.

Índice de Alteración	Ja	Valor
Diaclasas de paredes sanas		0,75 - 1
Ligera alteración		2
Alteraciones arcillosas		4
Con detritos arenosos		4
Con detritos arcillosos preconsolidados		6
Idem poco consolidados		8
Idem expansivos		8 - 12
Milonitos (productos de trituración) de roca y arcilla		6 - 12
Milonitos de arcilla limosa		5
Milonitos arcillosos gruesos		10 - 20

Fuente; NGI Instituto Geotécnico Noruego.

Tabla N° 31, Parámetro: Coeficiente reductor por la presencia de agua Jw.

Coeficiente reductor por la presencia de agua	Jw	Presión de agua [Kg/cm ²]	Valor
Excavaciones secas a con < 5 l/min localmente		<1	1
Afluencia media con lavado de algunas diaclasas		1 - 2,5	0,66
Afluencia importante por diaclasas limpias		2,5 - 10	0,5
Idem con lavado de diaclasas		2,5 - 10	0,33
Afluencia excepcional inicial, decreciente con el tiempo		> 10	0,2 - 0,1
Idem mantenida		> 10	0,1 - 0,05

Fuente; NGI Instituto Geotécnico Noruego.

Tabla N° 32, Parámetro: Condiciones tensionales S.R.F.

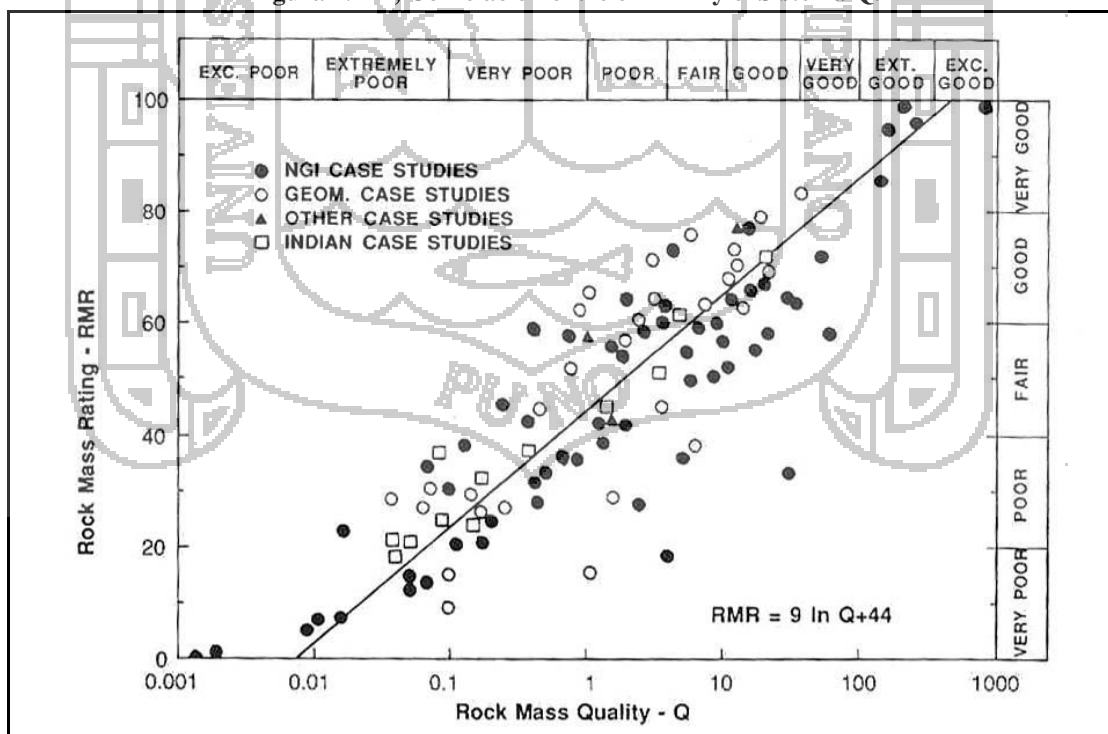
Parámetro SRF	Valor
<i>Zonas débiles</i>	
Multitud de zonas débiles	10
Zonas débiles aisladas, con arcilla o roca descompuesta (cobertura ≤ 50 m)	5
Idem con cobertura > 50 m.	2,5
Abundantes zonas débiles en roca competente	7,5
Zonas débiles aisladas en roca competente (cobertura ≤ 50 m)	5
Idem con cobertura > 50 m	2,5
Terreno en bloques muy fracturado	5
<i>Roca competente</i>	
Pequeña cobertura (σc / σ1 > 200)	2,5
Cobertura media (200 > σc / σ1 > 10)	1
Gran cobertura (10 > σc / σ1 > 5)	0,5 - 2,0
<i>Terreno fluyente</i>	
Con bajas presiones	5 - 10
Con altas presiones	10 - 20
<i>Terreno expansivo</i>	
Con presión de hinchamiento moderada	5 - 10
Con presión de hinchamiento alta	10 - 15

Fuente; NGI Instituto Geotécnico Noruego.

De la clasificación geomecánica RMR y Q ambas incorporan una correlación del comportamiento de los parámetros geomecánicos y se obtiene un valor de la calidad del macizo rocoso mediante la siguiente ecuación:

$$RMR = 9 \ln Q + 44$$

Figura N° 22, Correlación entre el RMR y el Sistema Q.



Fuente; Bieniawski 1989.

Se considera una evaluación más directa y concreta (Bieniawski 1976). (Todos los resultados de la clasificación de Q de Barton se apresian en los anexos N° 2 y N° 3).

3.6. PARAMETROS GEOMECANICO DE LA ROCA INTACTA

Para calcular los parámetros del macizo rocoso se utilizaron los valores de resistencia y módulos de Young determinados a partir de ensayos realizados (ensayos resistencia a la compresión simple con medición de módulo de deformación, ensayos resistencia a la compresión simple y ensayos de carga puntual). Los valores de GSI a utilizar fueron calculados a partir del RMR Bieniawski utilizando la relación que existe entre ambos índices de calidad. Se calcularon los parámetros del macizo rocoso para cada rango de Q modificado y para distintas profundidades. Finalmente con el programa RocLab se calcularon los parámetros para el macizo rocoso basándose en la metodología Hoek&Brown, resumida en subcapítulos anteriores. (ver los resultados en los anexos N° 4 y N° 5).

Existen casos que no cuentan con los parámetros de la roca intacta a partir de ensayos, por lo que se utilizaron valores propuestos, basándose en la metodología Hoek&Brown, para determinar los parámetros del macizo. Para cada unidad geológica se determinaron los parámetros de cohesión y ángulo de fricción a distintas profundidades, a continuación en las tablas 33 al 39, se entregan los resultados correspondientes a las profundidades más representativas del trazado. En anexo N° 5 se entregan el detalle de los parámetros de la roca intacta, parámetros del macizo rocoso y los parámetros Hoek&Brown.

Se ha definido la presencia de una unidad geológica de menor distribución en el área, denominada brecha Ígnea. Ésta litología se encuentra en las zonas de intrusión de pórfidos en la granodiorita, debido a la dificultad de delimitar estas zonas no fueron identificadas en el perfil del túnel de desvío. Esta litología aparece principalmente en las cercanías de los pórfidos mineralizadores (granodiorita regional intruída y brechizada).

Tabla N° 33, Parámetros Unidad Pórfido Cuarzo Monzonítico. Túnel a 50mde profundidad.

RANGO Q modificado	Propiedades Roca Intacta			Propiedades Macizo Rocosos					
	Res. Comp. Simple (MPa)	M. Def. E (MPa)	Razón de Poisson	M. Def. E (MPa)	Razón de Poisson	Res. Comp. Simple (MPa)	Res. a la Tracción (MPa)	Cohesión (MPa)	Fricción (°)
10 - 1000	161.87	13980	0.27	13702.42	0.18	122.605	-5.552	15.132	63.11
5 - 10	161.87	13980	0.27	6322.28	0.23	14.601	-0.0316	1.472	65.42
0.4 - 5	113.72	10610	0.26	2880.05	0.25	6.038	-0.112	0.755	62.67
0.1 - 0.4	113.72	10610	0.26	715.39	0.28	1.565	-0.023	0.386	57.51
0.03 - 0.1	68.23	11630	0.27	407.53	0.30	0.308	-0.005	0.206	48.48
0.001 - 0.03	68.23	11630	0.27	310.44	0.31	0.099	-0.003	0.125	41.75

Fuente; Ingeroc, 2011.

Tabla N° 34, Parámetros Unidad Granodiorita Regional. Túnel a 100m de profundidad.

RANGO	Propiedades Roca Intacta			Propiedades Macizo Rocoso						
	Q modificado	Res. Comp. Simple	M. Def. E	Razón de	M. Def. E	Razón de	Res. Comp. Simple	Res. a la Tracción	Cohesión	Fricción
	(MPa)	(MPa)	Poisson	(MPa)	Poisson	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(°)
10 - 1000	135.14	15693.47	0.28	15381.87	0.18	102.359	-3.196	10.705	65.93	
5 - 10	98.87	11245	0.30	5085.41	0.23	8.918	-0.133	1.256	62.52	
0.4 - 5	98.87	11245	0.30	3052.42	0.25	5.296	-0.068	0.990	60.72	
0.1 - 0.4	74.64	8489.09	-	572.38	0.28	1.036	-0.01	0.567	53.25	
0.03 - 0.1	74.64	8489.09	-	297.47	0.30	0.336	-0.004	0.384	47.83	
0.001 - 0.03	74.64	8489.09	-	226.6	0.31	0.108	-0.002	0.242	41.92	

Fuente; Ingeroc, 2011.

Tabla N° 35, Parámetros Unidad Granodiorita Regional. Túnel a 250m de profundidad.

RANGO	Propiedades Roca Intacta			Propiedades Macizo Rocoso						
	Q modificado	Res. Comp. Simple	M. Def. E	Razón de	M. Def. E	Razón de	Res. Comp. Simple	Res. a la Tracción	Cohesión	Fricción
	(MPa)	(MPa)	Poisson	(MPa)	Poisson	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(°)
10 - 1000	135.14	15693.47	0.28	15381.87	0.18	102.359	-3.196	11.158	63.79	
5 - 10	98.87	11245	0.30	5085.41	0.23	8.918	-0.133	2.02	57.15	
0.4 - 5	98.87	11245	0.30	3052.42	0.25	5.296	-0.068	1.700	54.97	
0.1 - 0.4	74.64	8489.09	-	572.38	0.28	1.036	-0.01	1.047	46.80	
0.03 - 0.1	74.64	8489.09	-	297.47	0.30	0.336	-0.004	0.724	41.56	
0.001 - 0.03	74.64	8489.09	-	226.6	0.31	0.108	-0.002	0.466	36.29	

Fuente; Ingeroc, 2011.

Tabla N° 36, Parámetros Unidad Granodiorita Regional. Túnel a 350m de profundidad.

RANGO	Propiedades Roca Intacta			Propiedades Macizo Rocoso						
	Q modificado	Res. Comp. Simple	M. Def. E	Razón de	M. Def. E	Razón de	Res. Comp. Simple	Res. a la Tracción	Cohesión	Fricción
	(MPa)	(MPa)	Poisson	(MPa)	Poisson	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(°)
10 - 1000	135.14	15693.47	0.28	15381.87	0.18	102.359	-3.196	11.522	62.68	
5 - 10	98.87	11245	0.30	5085.41	0.23	8.918	-0.133	2.457	54.95	
0.4 - 5	98.87	11245	0.30	3052.42	0.25	5.296	-0.068	2.099	52.66	
0.1 - 0.4	74.64	8489.09	-	572.38	0.28	1.036	-0.01	1.312	44.31	
0.03 - 0.1	74.64	8489.09	-	297.47	0.30	0.336	-0.004	0.912	39.2	
0.001 - 0.03	74.64	8489.09	-	226.6	0.31	0.108	-0.002	0.592	34.23	

Fuente; Ingeroc, 2011.

Tabla N° 37, Parámetros Unidad Granodiorita Regional. Túnel a 500m de profundidad.

RANGO	Propiedades Roca Intacta			Propiedades Macizo Rocoso						
	Q modificado	Res. Comp. Simple	M. Def. E	Razón de	M. Def. E	Razón de	Res. Comp. Simple	Res. a la Tracción	Cohesión	Fricción
	(MPa)	(MPa)	Poisson	(MPa)	Poisson	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(°)
10 - 1000	135.14	15693.47	0.28	15381.87	0.18	102.359	-3.196	12.103	61.3	
5 - 10	98.87	11245	0.30	5085.41	0.23	8.918	-0.133	3.048	52.49	
0.4 - 5	98.87	11245	0.30	3052.42	0.25	5.296	-0.068	2.635	50.09	
0.1 - 0.4	74.64	8489.09	-	572.38	0.28	1.036	-0.01	1.665	41.62	
0.03 - 0.1	74.64	8489.09	-	297.47	0.30	0.336	-0.004	1.164	36.7	
0.001 - 0.03	74.64	8489.09	-	226.6	0.31	0.108	-0.002	0.761	32.07	

Fuente; Ingeroc, 2011.

Tabla N° 38, Parámetros Unidad Volcánico Paralaque, Túnel a 50m de profundidad.

RANGO	Propiedades Roca Intacta			Propiedades Macizo Rocoso						
	Q modificado	Res. Comp. Simple	M. Def. E	Razón de	M. Def. E	Razón de	Res. Comp. Simple	Res. a la Tracción	Cohesión	Fricción
	(MPa)	(MPa)	Poisson	(MPa)	Poisson	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(°)
10 - 1000	216.38	29110	-	28532	0.18	163.893	-5.937	18.19	65.88	
5 - 10	183.63	14532	-	6571.92	0.23	16.564	-0.287	1.476	68.17	
0.4 - 5	145.06	19006	-	5159.12	0.25	7.77	-0.115	0.808	66.31	
0.1 - 0.4	145.06	19006	-	1281.5	0.28	2.013	-0.024	0.394	61.77	
0.03 - 0.1	118.08	8550	-	299.6	0.30	0.532	-0.007	0.228	55.2	
0.001 - 0.03	118.08	8550	-	228.22	0.31	0.171	-0.004	0.137	48.56	

Fuente; Ingeroc, 2011.

Tabla N° 39, Parámetros Unidad Volcánico Paralaque. Túnel a 300m de profundidad.

RANGO	Propiedades Roca Intacta			Propiedades Macizo Rocoso						
	Q modificado	Res. Comp. Simple	M. Def. E	Razón de	M. Def. E	Razón de	Res. Comp. Simple	Res. a la Tracción	Cohesión	Fricción
	(MPa)	(MPa)	Poisson	(MPa)	Poisson	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(°)
10 - 1000	216.38	29110	-	28532	0.18	163.893	-5.937	18.516	63.72	
5 - 10	183.63	14532	-	6571.92	0.23	16.564	-0.287	2.624	60.04	
0.4 - 5	145.06	19006	-	5159.12	0.25	7.77	-0.115	1.885	56.61	
0.1 - 0.4	145.06	19006	-	1281.5	0.28	2.013	-0.024	1.222	50.55	
0.03 - 0.1	118.08	8550	-	299.6	0.30	0.532	-0.007	0.775	43.57	
0.001 - 0.03	118.08	8550	-	228.22	0.31	0.171	-0.004	0.489	37.76	

Fuente; Ingeroc, 2011.

En la tabla N° 40 se presentan los valores de coeficiente de permeabilidad y peso específico para las distintas unidades. Los datos de permeabilidad fueron tomados de los ensayos de lugeon realizados por GMI correspondiente a los sondajes MQG-0904, MQG- 0905, MQG-1002 y MQG-1003A. Para los valores de peso específico se utilizaron los valores de ensayos realizados por GMI.

Tabla N° 40, Peso específico y permeabilidades para cada unidad geológica.

Unidad	Coficiente de Permeabilidad (cm/s)	Peso Específico (ton/m ³)gc
Granodiorita	2.4 x 10 ⁻⁶	2.65
Granodiorita Lixiviada	2.4 x 10 ⁻⁶	2.45
Granodiorita Brechada e intruidas de porfido	2.4 x 10 ⁻⁶	2.59
Granodiorita en cercanías de fallas	3.5 x 10 ⁻⁵	2.65
Volcánico Paralaque	5.9 x 10 ⁻⁵	2.14
Pórfido Cuarzo Mozonítico	3.8 x 10 ⁻⁵	2.65
Brechas Ígneas	---	2.71

Fuente; Ingeroc, 2011.

3.7. PARAMETROS DISCONTINUIDADES GEOLOGICAS

Para estimar los valores de ángulo de fricción y cohesión de las discontinuidades, se utilizó un total de 15 ensayos de corte directo realizados en estructuras naturales. (ver los resultados en los anexos N° 4 y N° 5).

Estos ensayos fueron realizados en rocas intrusivas, en las tablas N° 41 y 42 se presentan los parámetros para las distintas discontinuidades.

Tabla N° 41, Valores de ángulo de fricción y cohesión para las distintas unidades en profundidad.

TUNEL			
Rocas volcanicas ¹			
Tipo Estructura	Cohesión (KPa)	Fricción (°)	Persistencia (m)
Falla Principal	50	25	>30
Falla secundaria	75	28	10 - 30
Diaclasas	150	30	1 - 10
Vetillas	180	35	1 - 10
Roca Intrusiva [*]			
Tipo Estructura	Cohesión (KPa)	Fricción (°)	Persistencia (m)
Falla Principal	50	26	>30
Falla Secundaria	75	30	10 - 30
Diaclasas ²	150	35	1 - 10
Vetillas	180	40	1 - 10

¹Valores estimados a partir de los datos de terreno y de experiencia del consultor.
²Valores de ensayo Geotécnicos de corte directo, Geotecnia Peruana S.R.L. mayo 2011.

Tabla N° 42, Valores de ángulo de fricción y cohesión para las distintas unidades en superficie.

SUPERFICIAL			
Rocas volcanicas ¹			
Tipo Estructura	Cohesión (KPa)	Fricción (°)	Persistencia (m)
Falla Principal	25	25	>30
Falla secundaria	50	28	10 - 30
Diaclasas	50	30	1 - 10
Vetillas	100	35	1 - 10
Roca Intrusiva [*]			
Tipo Estructura	Cohesión (KPa)	Fricción (°)	Persistencia (m)
Falla Principal	25	26	>30
Falla Secundaria	50	30	10 - 30
Diaclasas ²	50	35	1 - 10
Vetillas	100	40	1 - 10

¹Valores estimados a partir de los datos de terreno y de experiencia del consultor.
²Valores de ensayo Geotécnicos de corte directo, Geotecnia Peruana S.R.L. mayo 2011.

CAPITULO IV

4. ANÁLISIS Y EXPOSICIÓN DE RESULTADOS

4.1. MAPEO GEOLOGICO - GEOTECNICO DE SUPERFICIE

Para el sector del Proyecto Túnel de Desvió Rio Asana se realizaron levantamientos de celdas geotécnicas de superficie, basado en registros geológicos (principalmente contactos litológicos), estructurales y de ventanas geotécnicas. Las celdas registradas se presentan en Anexo N° 2 y su ubicación en el Anexo N° 1, Plano N° 1.

Las celdas geotécnicas realizadas se presentan en Tabla N° 43, en la cual se detallan su ubicación y calidades geotécnicas en tanto que el gráfico de correlación RMR versus Q para los resultados de estas celdas geotécnicas se presentan en Figura N° 23. Y la descripción de las celdas geotécnicas se detalla en el anexo N° 02.

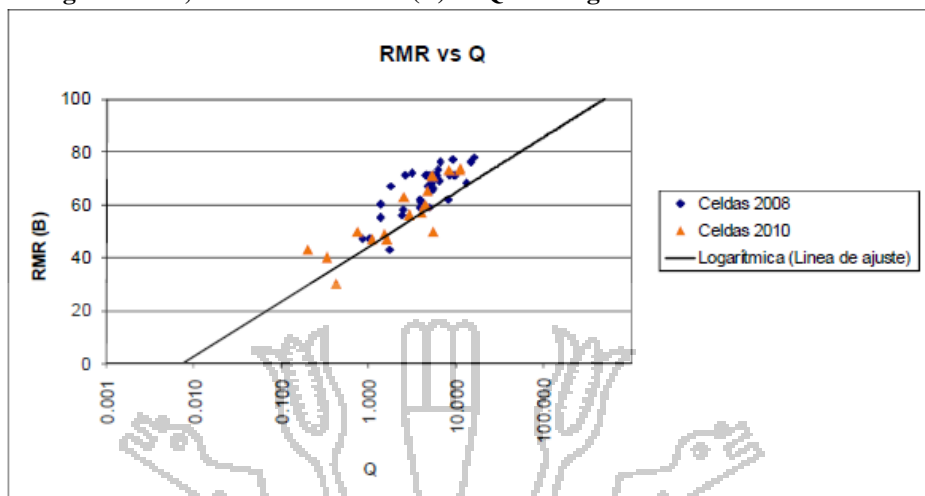
Las calidades geotécnicas RMR Bieniawski obtenidas para las celdas geotécnicas, en general, varían de regulares a buena. En particular, para las rocas intrusivas se tiene un 52% de rocas de buena calidad geotécnica, un 43% de rocas de calidad regular y un 5% de rocas de mala calidad geotécnica. Para las rocas volcánicas, existe un 82% de rocas de buena calidad y un 18% de rocas de calidad geotécnica regular según índice RMR (B).

Tabla N° 43, Ubicación y características de las celdas geotécnicas.

Ventana de Mapeo	Coordenadas UTM 19K PSAD 56			GSI	RMR (B)	Q	RQD	Litología
	Norte	Este	Cota					
1	8,109,400	328,266	3,656	60	69	6.40	96	Granodiorita
2	8,109,316	328,288	3,645	70	76	6.53	98	Granodiorita
3	8,109,248	328,294	3,613	70	77	9.24	92	Granodiorita
4	8,109,321	328,375	3,621	65	71	8.33	100	Granodiorita
5	8,109,131	328,278	3,561	65	72	3.13	100	Granodiorita
6	8,109,051	328,157	3,552	60	68	13.01	78	Granodiorita
7	8,108,754	329,579	3,680	70	76	14.86	89	Pórfido Cuarzo Monzonítico
8	8,108,696	329,558	3,677	70	78	16.09	97	Granodiorita
9	8,108,697	329,570	3,678	60	67	4.86	73	Pórfido Cuarzo Monzonítico
10	8,108,608	329,510	3,665	40	43	1.74	95	Granodiorita
11	8,108,497	329,531	3,664	60	67	4.84	73	Pórfido Cuarzo Monzonítico
12	8,108,497	329,308	3,663	45	47	1.00	60	Pórfido Cuarzo Monzonítico
13	8,108,444	329,334	3,668	40	47	0.84	51	Pórfido Cuarzo Monzonítico
14	8,108,484	329,297	3,648	50	56	2.40	72	Pórfido Cuarzo Monzonítico
15	8,108,492	329,252	3,640	70	73	6.18	93	Granodiorita
16	8,108,454	329,120	3,615	50	58	2.48	74	Granodiorita
17	8,108,887	323,769	3,439	65	71	9.72	88	Riolita
18	8,108,823	323,528	3,385	65	71	9.42	85	Riolita
19	8,108,785	323,533	3,379	65	71	5.67	88	Riolita
20	8,108,915	328,764	3,666	50	59	4.00	60	Granodiorita
21	8,108,842	328,854	3,650	50	61	4.04	61	Granodiorita
22	8,108,819	328,926	3,650	55	62	8.13	73	Granodiorita
23	8,108,761	328,946	3,638	60	68	5.25	79	Granodiorita
24	8,108,618	329,177	3,654	50	55	1.37	82	Granodiorita
25	8,108,378	328,976	3,634	50	59	3.83	59	Granodiorita
26	8,109,132	326,602	3,430	55	62	3.88	78	Granodiorita
27	8,109,127	326,627	3,423	60	65	5.20	94	Granodiorita
28	8,109,070	326,601	3,429	40	47	1.04	62	Granodiorita
29	8,108,895	325,601	3,494	55	60	1.38	41	Riolita
30	8,108,668	324,827	3,392	65	71	4.59	83	Andesita
31	8,108,674	324,879	3,378	65	71	4.95	89	Andesita
32	8,108,635	325,056	3,381	65	71	2.62	79	Riolita
33	8,108,611	325,124	3,398	65	71	5.94	89	Toba Rio-Andesítica
34	8,108,645	325,150	3,377	60	67	1.78	53	Toba Lítico-Cristalina Riolítica
35	8,108,617	325,227	3,383	65	71	4.49	81	Toba Lítico-Cristalina Riolítica
36	8,109,297	327,833	3,672	60	66	5.47	82	Granodiorita
37	8,109,258	327,845	3,575	65	71	5.32	80	Granodiorita
38	8,109,123	327,408	3,612	55	59	4.95	74	Monzonita Cuarzifera
39	8,108,551	329,207	3,648	35	43	0.20	48	Granodiorita
40	8,108,595	329,133	3,636	50	56	2.90	44	Granodiorita
41	8,109,004	326,337	3,506	40	47	1.08	33	Pórfido andesítico-dacítico
42	8,109,092	326,284	3,573	40	47	1.63	49	Granodiorita
43	8,109,064	326,293	3,555	50	57	4.00	60	Pórfido dacítico
44	8,109,034	326,299	3,539	35	40	0.33	8	Pórfido Dacítico
45	8,109,020	326,312	3,527	40	49	1.52	46	Pórfido dacítico-andesítico
46	8,108,996	326,322	3,527	50	55	5.44	49	Riolita
47	8,108,571	323,340	3,317	60	65	4.65	70	Granodiorita
48	8,108,562	323,346	3,320	75	74	11.41	100	Riolita
49	8,108,553	323,341	3,313	70	73	11.11	100	Riolita
50	8,109,224	328,506	3,689	55	60	4.47	67	Riolita
51	8,109,238	328,428	3,674	45	50	0.75	45	Pórfido Cuarzo Monzonítico
52	8,109,242	328,388	3,658	65	73	6.33	100	Granodiorita
53	8,109,190	328,272	3,603	60	63	2.53	91	Granodiorita
54	8,109,132	328,234	3,585	65	71	5.35	96	Granodiorita
55	8,109,417	328,579	3,681	50	56	2.91	87	Granodiorita
56	8,109,417	328,579	3,681	25	30	0.42	10	Zonas de Falla

Fuente; Ingeroc, 2011.

Figura N° 23, Correlación RMR (B) vs Q celdas geotécnicas Túnel de Desvío.



Fuente: Ingeroc, 2011.

4.2. MAPEO GEOLOGICO - GEOTECNICO DE SONDAJES

Para la caracterización geológica-geotécnica del macizo rocoso se desarrolló un registro geológico-geotécnico de aquellos sondajes que se encontraban en las proximidades de la traza del túnel de desvío y de los portales sujetos de este estudio. Donde se puede observar en los anexos N° 3, anexo N° 6 y su ubicación se observa en el anexo N° 1; plano N° 1.

Cabe mencionar que los sondajes del área de la presa de desvío y de los portales de entrada se encontraban manipulados (cortados mecánicamente), razón por la cual el registro de estos testigos ha sido adecuado a estas circunstancias, sin embargo, no se descarta que puedan existir desviaciones importantes en parámetros tales como RQD, fracturamiento o recuperación, las cuales pueden influir en la caracterización geotécnica obtenida. Los registros de los sondajes son presentados en el Anexo N° 3 y la metodología para el levantamiento de sondajes.

Una vez que los datos obtenidos fueron incorporados a la base de datos, se procedió a estimar los valores de RMR (Bieniawski, 1989) y Q (Barton, 2000).

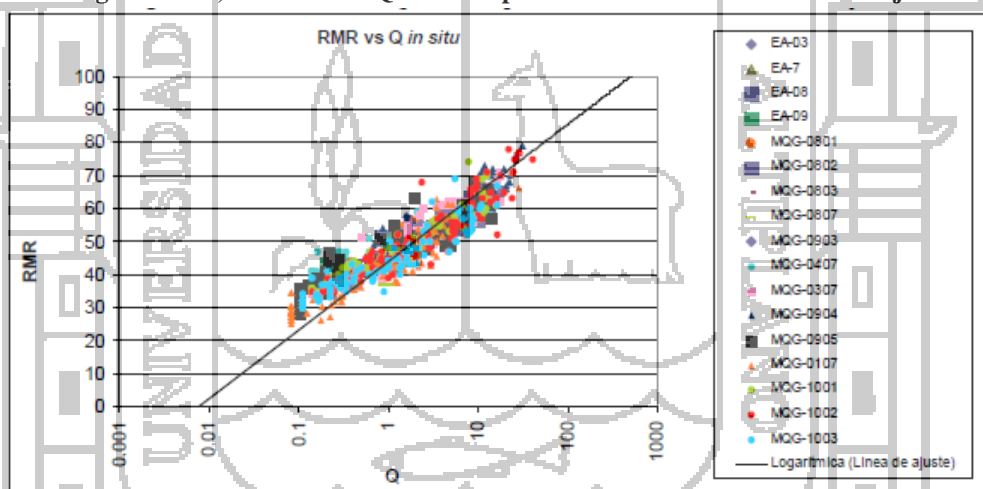
En la tabla N° 44 se muestra la ubicación de los sondajes utilizados para este estudio. En la figura N° 24 se muestra la correlación para los valores de calidades obtenidos por tramo geotécnico para sondajes. Los resultados de calidades para los diferentes sondajes se presentan en el anexo N° 06. Los resultados de la calidad por tramos en sondajes muestran que el macizo rocoso varía su calidad geotécnica de mala a buena, según RMR (Bieniawski, 1989).

Tabla N° 44, Ubicación de sondajes utilizados en este estudio.

Sondaje	Norte	Este	Cota
EA-03	8108453.4	329282.6	3632
EA-07	8108505.6	329290.7	3649.3
EA-08	8108400.4	329263.5	3618.6
EA-09	8108385	329220.8	3611
MQG-0801	8108431.2	329241.47	3621.12
MQG-0802	8108487.5	329209.36	3615.87
MQG-0803	8108542	329200.28	3632.73
MQG-0807	8108627.5	329216.91	3678.97
MQG-0903	8109009.42	326325.63	3497.96
MQG-0904	8110309.99	327555	3923.96
MQG-0905	8109151	323983	3625
MQG-0107	8109149.75	323970.86	3631
MQG-0307	8109702	325264	3664
MQG-0407	8110366	326773	3889
MQG-1001	8108987.95	326324.926	3488.876
MQG-1002	810476.004	328841.53	3998.176
MQG-1003A	8109431.3	328176.738	3708.284

Fuente: Ingeroc, 2011.

Figura N° 24, Correlación Q vs RMR para valores de calidades de sondajes.



Fuente: Ingeroc, 2011.

4.3. PORTAL DE ESTRADA

Los antecedentes proporcionados para el sector del portal de entrada, corresponden a ocho sondajes, identificados como MQG-0801, MQG-0802, MQG-0803, MQG-0807, EA-03, EA-07, EA-08 y EA-09, cuya ubicación esquemática es representada en el Anexo N° 1, Planos N° 2 y Plano N° 3. Adicionalmente se cuenta con registros superficiales de celdas geotécnicas, los cuales se pueden ver en el Anexo N° 2 sobre los mapeos de celdas geotécnicas.

Los resultados obtenidos corresponden a valores de RMR *in situ* y ajustado, además de los valores según el índice Q de Barton se detallan en los anexos anteriormente ya mencionados.

4.3.1. Condiciones Geológicas

Los portales de entrada se encuentran emplazados en la granodiorita, en un sector moderadamente meteorizado con un espesor de aproximadamente 10 metros para la zona meteorizada, sector esta cubierta por granodiorita lixiviada. Sobreyaciendo a la unidad de granodiorita, se ubica un depósito fluvioaluvial de 5 a 10 metros de potencia. También en este sector, en ambas laderas del río Asana, se observan terrazas fluvioglaciales antiguas.

La granodiorita presenta alteración silícea, derivada de los procesos de intrusión del pórfido cuarzo monzonítico identificado en este sector. Como ya se ha indicado, la Granodiorita (tanto la roca fresca como la lixiviada) se encuentra intruida por pórfidos cuarzo – monzoníticos en este sector del área de estudio.

Los sondajes muestran una cobertura importante de material cuaternario, generalmente fluvioaluvial, seguida de la granodiorita lixiviada o meteorizada para al final encontrar granodiorita fresca. (los resultados de los sondajes se aprecia en el anexo N° 3.

Más detalle con respecto a la ubicación de las diferentes unidades geológicas a lo largo de la traza del portal se pueden ver en la planta geológica y perfiles geológicos asociados en el Anexo N° 1, Planos 2 y 3 respectivamente.

4.3.2. Condiciones geomecánicas

El volumen de bloques observado en el sector de la granodiorita varía entre 2 m^3 y 0.02 m^3 en las zonas de fallas y en los alrededores de los sectores de granodiorita. Mientras que para en pórfido cuarzo-monzonítico los bloques alcanzan un volumen máximo de 0.4 m^3 .

En general en el sector de la granodiorita lixiviada las discontinuidades presentan persistencias mayores a 10 m., salvo en aquellos sectores reconocidos como zonas de falla, en donde la persistencia máxima de las discontinuidades menores disminuye levemente en función del rasgo estructural mayor. En el sector del pórfido cuarzo – monzonítico la persistencia de las estructuras se ha considera en general como menor, estimándose aproximadamente en 5 m.

En general, bajo la zona meteorizada, el macizo rocoso se presenta leve a moderadamente meteorizado y presenta resistencias moderadamente altas.

En función de las características de la obra y de las características geotécnicas del macizo rocoso en la cual se emplazan, en función de Barton (2000), se ha definido un SRF (factor reducción de tensiones del macizo rocoso) de 5 para la estimación del valor “Q” de las rocas del portal. Lo anterior implica que se considera existen zonas débiles de forma aislada, que contienen arcillas o roca desintegrada químicamente, en una excavación con una cobertura igual o menor a los 50 mts.

Considerando lo anteriormente expresado, se puede estimar que los macizos rocosos donde se emplazarán los portales de entrada presentan en general características geotécnicas desfavorables a regulares lo cual puede ser ratificado al revisar los antecedentes presentados en los primeros metros de los registros de los sondajes del área y de los mapeos de superficie en los Anexos N° 2 y 3 respectivamente. Lo anterior puede ser derivado del fuerte fracturamiento de la unidad de Pórfido Cuarzo Monzonítico (ver figura N° 26) y del que induce sobre la granodiorita, y a lo expuesto que se encuentra a los agentes exógenos, que influyen en la meteorización de la roca, la cual se ha estimado en aproximadamente 10 m. de profundidad para el sector.

Revisando la información en detalle, a partir de los sondajes EA-03, EA-07 y EA-08 (en anexo N° 3), se pueden definir las calidades según el parámetro Q de Barton (2000) como de muy malas a malas. Sin embargo, según los sondajes EA-09, MQG-801, MQG-803, y MQG-807 las calidades en general son malas (especialmente en la parte superficial) pero con tramos de calidad regular a buena hacia los tramos más profundos.

Figura N° 25, Fotografías del Portal de Entrada al Túnel de Desvío río Asana y Pórfido Cuarzo Monzonítico.



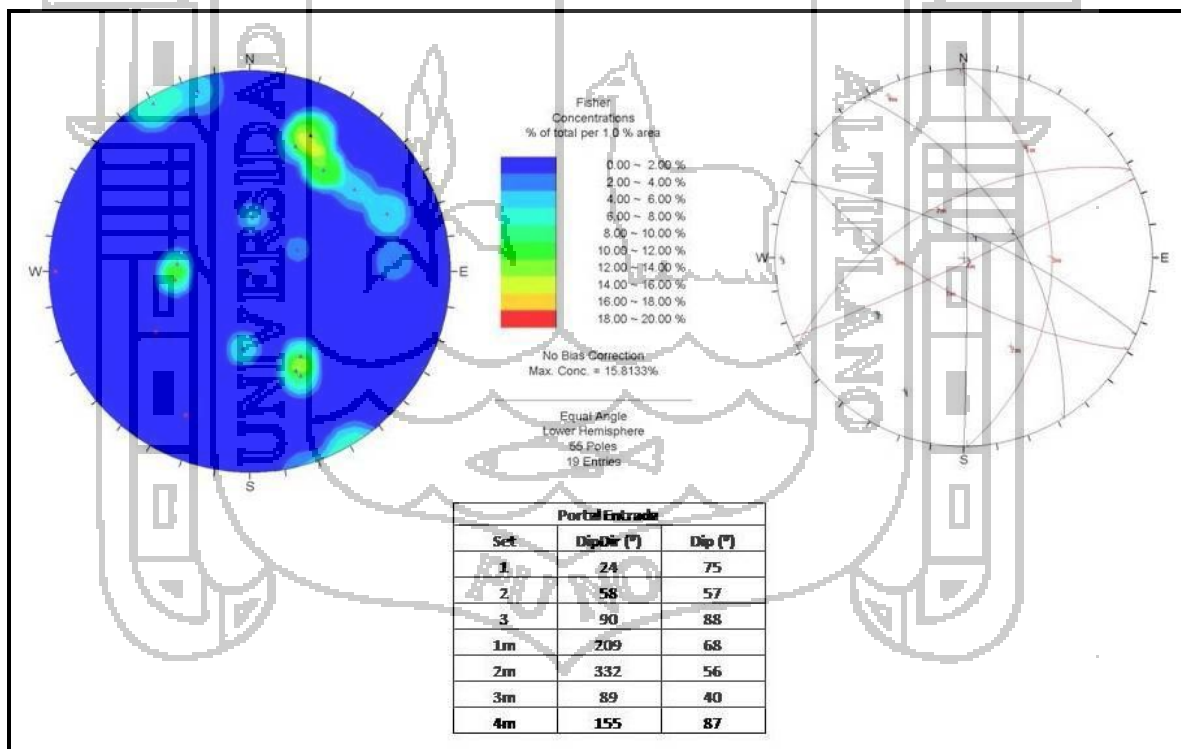
Fuente; Ingeroc 2011.

Respecto de las discontinuidades reconocidas en el sector de los portales de entrada, se identifica que la orientación preferencial de las estructuras medidas (ver figura N° 26) corresponde a la NW a NNW y de forma subordinada la orientación NE. Los buzamientos de las orientaciones NW a NNW tienden a estar en el rango de los 45°-65° hacia el SW, en tanto que el sistema NE en general el buzamiento es hacia el NW. Sin embargo lo anterior, se reconocen planos de bajo ángulo de menor presencia en el sector.

Respecto de las fallas registradas, estas en general presentan orientaciones hacia el NW a NNW con buzamiento es sobre los 50° y mayores, hacia el NE-E.

Considerando la disposición de estaciones geotécnicas de discontinuidades descritos, se considera que es posible el desarrollo de condiciones desfavorables para el portal, tales como cuñas de caída libre.

Figura N° 26, Diagrama de densidad de polos y planos de las discontinuidades del macizo rocoso de los Portales de Entrada. Los cuadrados y planos rojos representan fallas y los triángulos y planos azules los sets de diaclasas.



Fuente; Ingeroc 2011.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto y a la información previa disponible, se estima que los puntajes de acuerdo a los sistemas de clasificación geotécnica utilizados en este estudio (RMR de Bieniawski y Q de Barton), son los presentados en tabla N° 45.

Se presentan los índices RMR (B) *in situ* y ajustado, el ajuste se realiza por orientación de discontinuidades con respecto a la orientación de la obra, para este sector se consideraron muy desfavorables las estructuras que afectan a los portales de entradas.

Tabla N° 45, Calidad Geotécnica del macizo rocoso en portales de entrada, del Túnel de Desvío Río.

Portal	Litología	RMR <i>in situ</i>	RMR ajustado	Q
PE 1	Granodiorita Lixiviada	35 – 45	23 – 33	0.02 – 0.3
PE 1	Granodiorita	46 – 64	34 – 52	0.2 – 2.5
PE 2	Granodiorita Lixiviada	35 – 45	23 – 33	0.02 – 0.3
PE 2	Granodiorita	46 – 64	34 – 52	0.2 – 2.5

Fuente; Ingeroc 2011.

Considerando los puntajes obtenidos, el macizo rocoso donde se emplazaran los portales de entrada puede ser clasificado como de mala calidad (roca tipo IV), según RMR (Bieniawski, 1989), y de muy mala calidad según Q (Barton, 2000).

4.3.3. Medidas de sostenimiento

Que necesita medidas de sostenimiento; así como aplicación de schocret, instalación de siembras; pernos de anclaje.

Tabla N° 46, Medidas de sostenimiento recomendada

MEDIDA DE SOSTENIMIENTO	CONDICION DE LA ROCA
Instalación de pernos de anclaje sistemático y cimbras separados de 1 – 0.5m, aplicación de schocret de acuerdo a los parámetros geomecánicos.	Roca tipo IV, moderadamente meteorizada la granodiorita y granodiorita lixiviada.

Fuente: Propia del Tesista, 2013

4.4. PORTAL DE SALIDA

Los antecedentes proporcionados para el sector del portal de salida, corresponden a registros superficiales de celdas geotécnicas y los registros geotécnicos de sondajes, los cuales se pueden ver en el anexo N° 2 y anexo N° 3.

Los resultados obtenidos corresponden a valores de RMR *in situ* y ajustado, además de los valores según el índice Q de Barton, donde los resultados y parámetros del macizo rocoso que están en los anexos N° 5 y anexo N° 6 respectivamente.

4.4.1. Condiciones Geológicas

El sitio seleccionado para el portal, en términos de la litología, se encuentra caracterizado por la presencia de rocas riolíticas y andesíticas caracterizadas por tener tonos rosáceos con distinción de cuarzo, ortoclasa y plagioclasas para las riolitas, y tonos grisáceos con distinción de pequeños cristales de plagioclasas, lo cual le dan un carácter porfídico con matriz afanítica.

El macizo rocoso del sector presenta un bajo grado de alteración y de meteorización. No se aprecia mineralización ni cuerpos intrusivos en los alrededores del sector de emplazamiento de las obras del portal de salida.

Más detalle con respecto a la ubicación de las diferentes unidades geológicas a lo largo de la traza del portal se puede ver en la planta geológica y perfil geológico asociado en el anexo N°1, planos N° 1 y 4 respectivamente.

4.4.2. Características Geomecánicas

Desde los registros de superficie se reconocieron un máximo de 4 sets de diaclasas y un mínimo de tres, asociado a los macizos rocosos del sector. Lo anterior permite estimar la formación de bloques cúbicos a columnares de un volumen de bloque máximo observado de 10 m³ y un mínimo de 0,2 m³. El volumen medio es de aproximadamente 1 m³

La persistencia de los sets de discontinuidades llega a ser mayor a los 30 m para varios de las orientaciones reconocidas. Las rocas presentan un leve grado de alteración y de meteorización, generalmente en la forma de patinas de óxidos de fierro.

Las rocas se presentan de una alta competencia y se caracterizan por presentar pronunciados escarpes en el extremo inferior de la secuencia, lo que resulta en una morfología del valle bastante estrecha para la zona del portal. Los suelos presentes corresponden a bloques de roca en matriz gravosa y arenosa, presentando un comportamiento friccionante.

Las superficies de roca se presentan en general secas, aunque se reconoce el afloramiento de aguas subterráneas en sectores más elevados de la secuencia (200 m sobre la cota del portal aproximadamente), razón por la cual se estima una baja presencia de aguas en el sector del portal de salida. La estabilidad del macizo rocoso está controlada por las discontinuidades, por lo que el diseño del portal debe estar enfocado a remover la capa de suelo que pueda deslizarse y a controlar los bloques potencialmente inestables mediante su remoción o instalación de pernos. En la figura N° 27 se muestran fotografías que ilustran lo descrito anteriormente.

Figura N° 27, Fotografías del sector del portal de salida, Túnel de Desvío Río Asana, donde se muestran bloques de roca (riolita) y discontinuidades de gran longitud

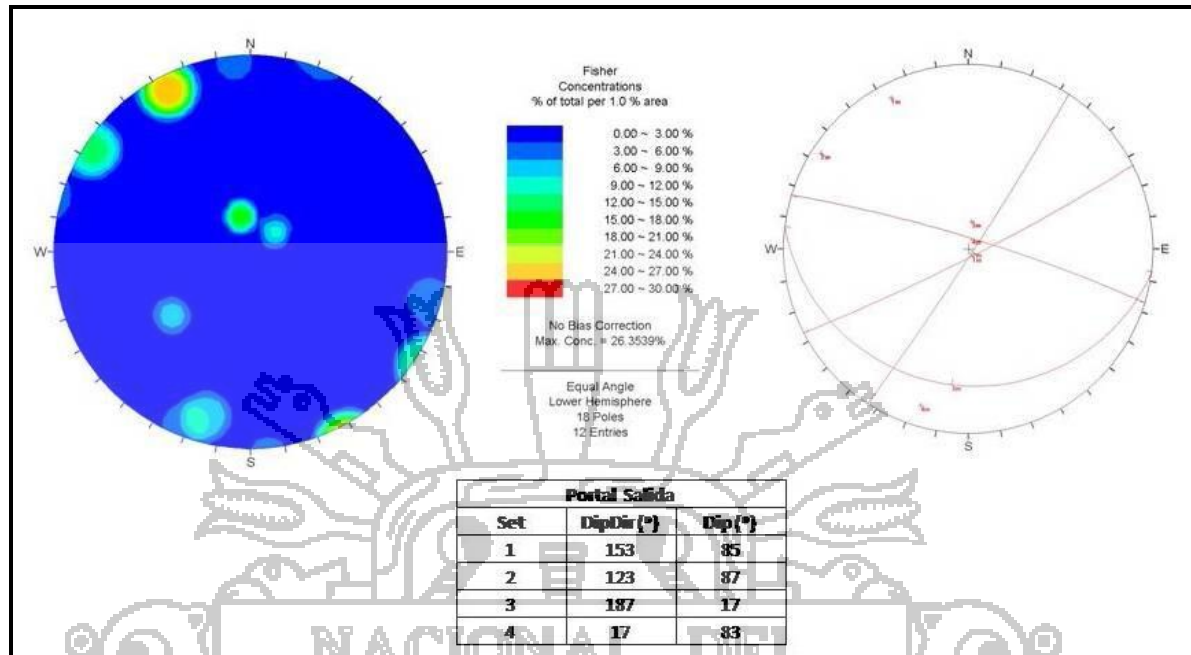


Fuente; Ingeroc 2011.

Respecto de la orientación de las discontinuidades, como ya se detalló, en general se reconocieron cuatro familias de discontinuidades, tres de las cuales presentan ortogonalidad entre si, tal como se aprecia en la figura N° 28.

Al analizar la disposición de los planos principales de las familias de discontinuidades se reconocen las orientaciones NE y NW de altos ángulos de buzamiento y la disposición EW con buzamiento de 17° aprox. hacia el SW. Es justamente este plano, en intersección con los otros dos individualizados, el responsable de la alta probabilidad de generación de condiciones estructurales complejas, tales como cuñas, para el macizo rocoso del lugar de emplazamiento del portal de salida.

Figura N° 28, Diagrama de densidad de polos y planos de las discontinuidades del macizo rocoso del Portal de Salida.



Fuente; Ingeroc, 2011.

En función de lo anterior, y de acuerdo a Barton (2000), se ha definido un SRF (factor reducción de tensiones) de 5 para la estimación del valor “Q” de las rocas del portal. Lo anterior implica que existen zonas débiles de forma aislada, que contienen arcillas o roca desintegrada químicamente, en una excavación con una cobertura igual o menor a los 50 mts.

Considerando lo anterior, en tabla N° 47 se presentan los puntajes estimados para la clasificación geotécnica RMR de Bieniawski (1989) y Q de Barton (2000) del macizo rocoso sobre el cual se emplazaría el portal de salida, el ajuste se realiza por orientación de discontinuidades con respecto a la orientación de la obra. El ajuste para esta obra se realizó considerando estructuras de alto ángulo de buzamiento, que se dispone de manera paralela a la traza de la obra, lo cual es muy desfavorable para el desarrollo de la labor.

Tabla N° 47, Calidad Geotécnica macizo rocoso estimada para el portal de salida.

Litología	RMR in situ	RMR ajustado	Q
Riolita y andesitas	62 - 78	50 - 66	2.6 - 5.3

Fuente; Ingeroc, 2011.

Desde la tabla N° 47 se desprende que la calidad geotécnica del macizo rocoso del portal de salida puede ser clasificada como regular, tipo de roca III; según el RMR (Bieniawski, 1989), y como de calidad mala a regular de acuerdo al sistema Q de Barton (2000).

4.4.3. Medidas de sostenimiento

Se recomienda las medidas de sostenimiento dependiendo del tipo de roca y la calidad de macizo rocoso in situ.

Tabla N° 48, Medidas de sostenimiento recomendadas en Portal de Salida

MEDIDAS DE SOTENIMIENTO	CONDICIONES DE LA ROCA
Instalación de pernos sistemáticos de 1m y aplicación de schotcret en sitios puntuales.	Roca tipo III, Riolitas y andesitas, presenta bajo grado de alteración y meteorización.

Fuente: Propia del Tesista, 2013

4.5. PORTAL VENTANA DE CONSTRUCCION

Para el portal de la ventana de construcción existen los registros de superficie desarrollados. En el anexo 2, además de la información proporcionada por los sondajes desarrollados en este sector, MQG-0903 y MQ-1001 (ver resultados anexo N° 3), este último cuenta con orientación de estructuras.

4.5.1. Condiciones Geológicas

El portal de la Ventana de Construcción se encuentra proyectado en las unidades de Granodiorita, Pórfido Dacítico- Andesítico y eventualmente brechas, cubiertas por material coluvial de potencia aproximada 10m.

Las unidades litológicas identificadas en el sondaje MQG-0903 del portal, corresponden a aproximadamente 3,6 metros de limos, arenas y gravas. A partir de estos 3,6 m y hasta los 13,3 m. se reconoce un pórfido dacítico, en sectores puntuales brechadas. Esta roca se presenta como una roca volcánica alterada hidrotermalmente, con oxidación de sus minerales constituyentes, también presenta un acelerado proceso de argilización; todas estas condiciones asociadas a un alto fracturamiento. Estas unidades son probablemente correlacionables con las intrusiones porfídicas asociadas a los eventos de mineralización de Quellaveco. Desde los 13,3 m de profundidad se reconoce una brecha. Esta brecha se encuentra moderada a fuertemente fracturada y presenta una resistencia moderadamente baja frente a los golpes de martillo. En la última parte del sondaje, la brecha se presenta silicificada y con mejor calidad geotécnica (ver anexo N° 3).

Para el sondaje MQG-1001, los primeros 16m, aproximadamente, se consideran de coluvio, y luego atraviesa una zona de brechas ígneas, hasta los 42.20 m. Desde los 42.20 m hasta los 120 m, el sondaje atraviesa pórfido dacíticos y cuarzo monzoníticos. Existen tramos, que se presentan fuertemente fracturados y en algunos casos con contenidos de arcillas.

En terreno se reconocieron las siguientes unidades: Granodiorita Lixiviada, pórfido dacítico y pórfido dacítico-andesítico. Todos ellos se encontraban moderada a fuertemente meteorizados. No se observó roca mineralizada.

Más detalle con respecto a la ubicación de las diferentes unidades geológicas a lo largo de la traza del portal se pueden ver en el plano geológico y perfil geológico, en Anexo N° 1, Plano N° 1 y 5, respectivamente. En la figura N° 29 se observa el contacto entre la zona de coluvio y el pórfido dacítico-andesítico.

Figura N° 39, Fotografía de la zona del portal de la ventana de construcción donde destaca la presencia del pórfido dacítico-andesítico, cubierto por coluvio.



Fuente: Ingeroc, 2011.

4.5.2. Condiciones Geomecánicas

Respecto de los antecedentes aportados por los registros de superficie, se especifica la presencia de un alto fracturamiento con presencia de al menos 4 sets de discontinuidades lo que define bloques con un volumen máximo de $0,4m^3$, una media de $0,12 m^3$ y un mínimo de $0,09m^3$.

Además la persistencia de las discontinuidades ha sido estimada como inferior a los 10 m. y en promedio no superan el metro de largo, por lo que se presupone que los bloques asociados a este sector presentarían volúmenes moderados a bajos.

La brecha se encuentra moderada a fuertemente fracturada, con discontinuidades de escasa persistencia como es característico para este tipo de litologías, y presenta una resistencia

moderadamente baja frente a los golpes de martillo en su extremo superior o más expuesto a los factores exógenos que han meteorizado el macizo rocoso. En la última parte del sondaje, hacia el fondo del mismo, la brecha se presenta silicificada y con mejor calidad geotécnica.

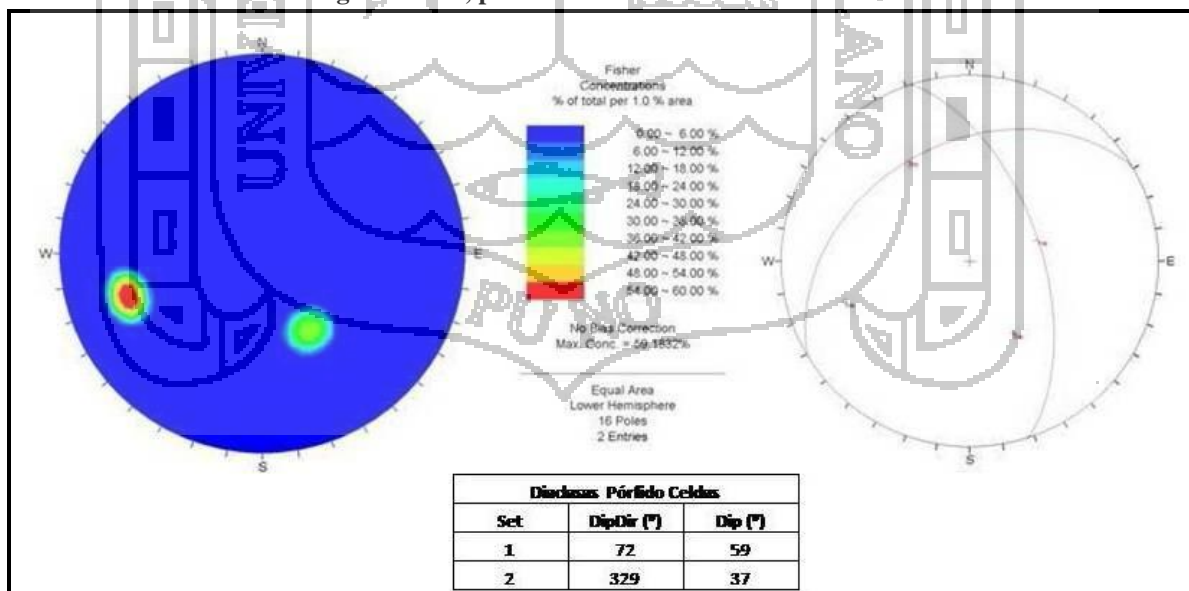
En terreno todas las rocas se observaban moderada a fuertemente meteorizadas y no se ha reconocido la presencia de aguas subterráneas aflorando en superficie.

Considerando lo anterior, y en función de las características de la obra y las del macizo rocoso en donde estas se emplazan, para el cálculo del Q de Barton (2000), se ha definido un SRF (factor reducción de tensiones) de 5 para la estimación del valor “Q” de las rocas del portal, lo cual implica que existen zonas débiles de forma aislada, que contienen arcillas o roca desintegrada químicamente, en una excavación con una cobertura igual o menor a los 50 mts (ver anexo N° 2).

Respecto de las características geotécnicas obtenidas a través de sondajes, el sondaje MQG-0903, indica que el macizo rocoso del sector del portal en general presentan una calidad geotécnica baja (ver anexo N° 3), la que puede ser calificada como de mala a regular del sondaje según Q de Barton, en tanto que según el RMR (Bieniawski, 1989), pueden ser calificadas como de calidad mala a regular (tipo de roca IV y III) para el mismo tramo.

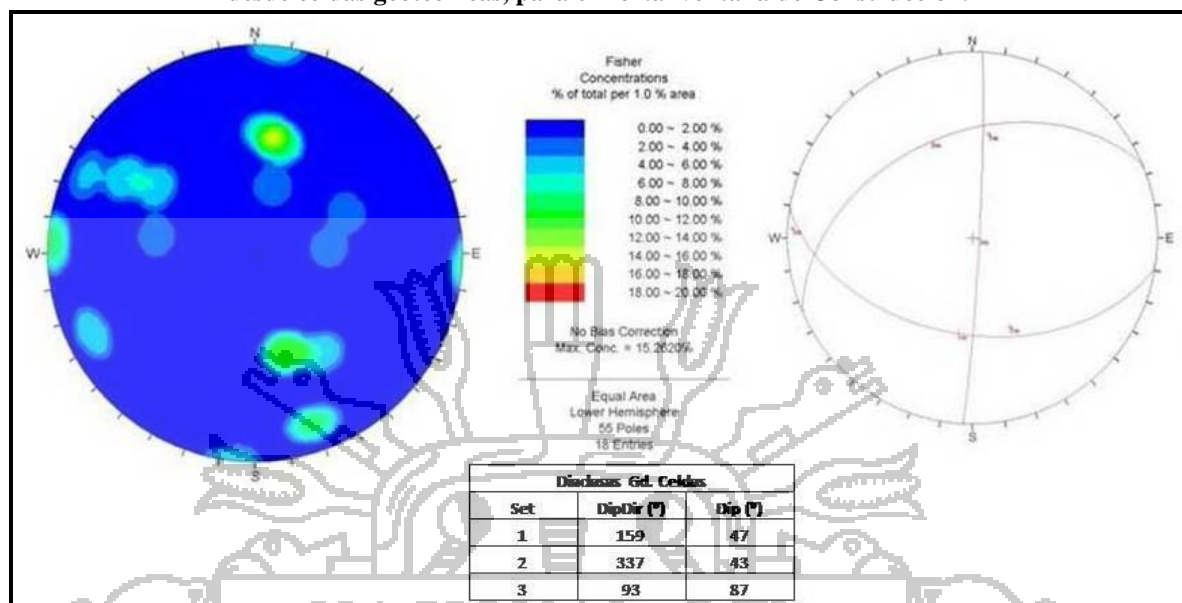
Respecto de los antecedentes de las discontinuidades geológicas, se estima que en las unidades del macizo rocoso donde se emplaza el portal de la ventana de construcción se tendrá la presencia de un alto fracturamiento con presencia de al menos 4 sets de discontinuidades, se deduce de los datos obtenidos para celdas y sondajes (ver figuras N° 30, 31).

Figura N° 30, Diagrama de polos y planos para diaclasas en pórfido, con estructuras tomadas desde celdas geotécnicas, para el Portal ventana de Construcción.



Fuente; Ingeroc, 2011.

Figura N° 31, Diagrama de polos y planos para diaclasas en granodiorita, con estructuras tomadas desde celdas geotécnicas, para el Portal ventana de Construcción.



Fuente; Ingeroc, 2011.

Respecto de la orientación de los planos principales, en se reconoce que las orientaciones preferenciales corresponden a aquellas que tienden a ser NNW, EW y NNE, orientaciones obtenidas para datos de celdas en las unidades de pórfidos y granodioritas y de los datos de sondajes para la unidad de pórfido. Con buzamientos intermedios tanto para el norte como para el sur. Se reconocen sets NNE de alto ángulo de buzamiento, el cual puede representar un problema para el desarrollo del túnel en el entorno del portal, así como también se deben evaluar las posibles cuñas que se puedan formar a partir de las intersecciones de las discontinuidades geológicas, situación que debe ser revisada a partir de los registros geotécnicos que se realicen en el momento de la construcción del portal.

A pesar de que en superficie se observan tres unidades litológicas para esta etapa del estudio sólo se analizaron dos, debido a que son las únicas que corta el portal de la ventana de construcción. La calidad de la roca obtenida luego de los análisis realizados, va desde mala a regular para las granodioritas y para el pórfido dacítico-andesítico, con tipo de roca IV y III; según el RMR *in situ* (Bieniawski, 1989) y de extremadamente mala a mala según el Q de Barton para ambas unidades, ver tabla N° 49.

El ajuste de RMR se realiza por orientación de discontinuidades con respecto a la orientación de la obra, para este sector se consideraron muy desfavorables las estructuras que afectan a la zona del portal de Ventana de Construcción (ver resultados en anexos N° 2 y 3).

Tabla N° 49, Calidad Geotécnica estimada para el macizo rocoso del portal ventana de construcción.

Litología	RMR in situ	RMR ajustado	Q
Granodiorita	33 – 46	21 – 34	0.08 – 1.6
Pórfido dacítico - andesítico	34 – 56	22 – 44	0.06 – 1.02

Fuente; Ingeroc, 2011.

4.5.3. Medidas de sostenimiento

Tabla N° 50, Medidas de sostenimiento del Portal Ventana de Construcción.

MEDIDAS DE SOSTENIMIENTO	CONDICIONES DE LA ROCA
Instalación de pernos de anclaje sistemático y cimbras separados a 1 – 0,5m, aplicación de schotcret de acuerdo a los parámetros geomecánicos. Instalación de drenes de alivio en zonas de flujo de agua subterránea	Tipo de roca IV – III, granodiorita, porfido Dacítico – Andesítico y zonas brechadas; todos ellos se encuentran moderada a fuerte meteorización.

Fuente: Propia del Tesista, 2013

4.6. TUNEL VENTANA DE CONSTRUCCION

Para el túnel de Ventana de Construcción se cuenta con la información del sondaje MQG- 0704 y registros de celdas geotécnicas levantadas en el sector del portal (ver anexos N° 2 y 3).

4.6.1. Condiciones Geológicas

Esta obra se ubica en las cercanías del tajo, donde la granodiorita regional se encuentra argilizada en distintos grados, en algunos sectores la roca se encuentra brechada debido a la acción de los pórfidos que intruyen y además, hay presencia de mineralización. Para esta zona se define la unidad de granodiorita brechada e intruida por el pórfido cuarzo - monzonítico, en esta unidad se proyecta el Túnel de Ventana de Construcción.

4.6.2. Condiciones Geomecánicas

El túnel se dividió en 7 tramos geológicos-geotécnicos utilizando como criterios principales los cambios en las alteraciones de la roca, la sobrecarga de la obra y los cambios de rumbo de la obra.

Los tramos varían su calidad geotécnica de muy mala a regular, tipo de roca V a III; según RMR (Bieniawski) y de extremadamente mala a regular según Q (Barton). De acuerdo a Q modificado para este proyecto, la calidad varía entre roca tipo VI a roca tipo II. En la tabla N° 51 se muestra un resumen de las calidades obtenidas para cada tramo, mientras que en tabla N° 52 se muestran las calidades esperadas para cada tramo del túnel.

Debido a que los 2 primeros tramos (T1 y T2) se proyectan en la unidad de Granodiorita brachada e intruida por el pórfido cuarzo - monzonítico, la que se encuentra alterada y meteorizada en estos tramos, se obtienen calidades geotécnicas menores a las que se obtienen para el resto de los tramos (T3, T4, T5, T6 y T7), los cuales atraviesan dicha unidad con un menor grado de alteración y meteorización.

Más detalle con respecto a los distintos tramos geológico-geotécnicos a lo largo de la traza del túnel se puede ver en el perfil geológico-geotécnico, en anexo N° 1, Plano N° 6.

Tabla N° 51, Resumen calidades RMR (Bieniawski) ajustado y Q modificado por tramos de Ventana de Construcción.

Tramos	RMR ajustado		Q	
	Desfavorable	Favorable	Desfavorable	Favorable
T1	20	46	0.14	1.63
	V	III	Roca Tipo IV	Roca Tipo III
	Muy Mala	Regular		
T2	11	51	0.03	3.11
	V	III	Roca Tipo VI	Roca Tipo III
	Muy Mala	Regular		
T3	17	48	0.11	5.72
	V	III	Roca Tipo IV	Roca Tipo II
	Muy Mala	Regular		
T4	16	48	0.08	5.72
	V	III	Roca Tipo V	Roca Tipo II
	Muy Mala	Regular		
T5	15	39	0.083	1.613
	V	IV	Roca Tipo V	Roca Tipo III
	Muy Mala	Mala		
T6	16	48	0.08	5.72
	V	III	Roca Tipo V	Roca Tipo II
	Muy Mala	Regular		
T7	20	53	0.14	5.72
	V	III	Roca Tipo IV	Roca Tipo II
	Muy Mala	Regular		

Fuente; Ingeroc, 2011.

Tabla N° 52, Porcentajes esperados por tramos geológicos-geotécnicos de ventana de Construcción.

CALIDAD GEOTÉCNICA Q						
Q Tramo	Roca Tipo VI 0.001 - 0.03	Roca Tipo V 0.03 - 0.1	Roca Tipo IV 0.1 - 0.4	Roca Tipo III 0.4 - 5	Roca Tipo II 5 - 10	Roca Tipo I 10 - 1000
T1						
Probable	6	34	35	25		
Optimista	5	30	35	30		
Pesimista	8	40	32	20		
T2						
Probable	18	35	27	20		
Optimista	16	32	27	25		
Pesimista	20	35	30	15		
T3						
Probable		10	35	40	15	
Optimista		5	30	45	20	
Pesimista		15	40	35	10	
T4						
Probable		20	35	35	10	
Optimista		15	30	40	15	
Pesimista		25	40	30	5	
T5						
Probable	5	35	35	25		
Optimista		30	40	25	5	
Pesimista	10	40	30	20		
T6						
Probable	2	24	30	34	10	
Optimista	4	19	30	40	10	
Pesimista	2	30	30	33	5	
T7						
Probable	4	19	30	40	10	
Optimista	1	14	30	40	15	
Pesimista	2	23	35	35	5	

Fuente; Ingeroc, 2011.

4.6.3. Medidas de sostenimiento

Se recomendó las medidas de sostenimiento de acuerdo al tipo de roca y la calidades geomecánicas del macizo rocoso.

Tabla N° 53, Medidas de sostenimiento para el Túnel Ventana de Construcción

TRAMO	MEDIDAS DE SOSTENIMIENTO	CONDICION DE LA ROCA
T1	Instalación de cimbras GWF25 a 1.5m de separación y aplicación de schotcret sección completa; relleno con bolsacret en zonas delesnables y sobre excavaciones.	Tipo de roca V – III, se proyecta en la Unidad Granodiorita brechada e intruida de cuarzo - monzonítico, la que se encuentra alterada y meteorizada.
T2	Instalación de cimbras GWF25 a 1.5m de separación y aplicación de schotcret sección completa; relleno con bolsacret en zonas delesnables y sobre excavaciones.	Tipo de roca V – III, se proyecta en la Unidad Granodiorita brechada e intruida por un porfido, la que se encuentra alterada y meteorizada.
T3	Instalación de cimbras GWF25 a 1.5m de separación y aplicación de schotcret sección completa; relleno con bolsacret en zonas delesnables y sobre excavaciones.	Tipo de roca V – III, tramo que atraviesa menor grado de alteración y meteorización. La granodiorita brechada e intruida.
T4	Instalación de cimbras GWF25 a 1.5m de separación y aplicación de schotcret sección completa; relleno con bolsacret en zonas delesnables y sobre excavaciones.	Tipo de roca V – III, tramo que atraviesa menor grado de alteración y meteorización. La granodiorita brechada e intruida.
T5	Instalación de cimbras GWF25 a 1.5m de separación y aplicación de schotcret sección completa; relleno con bolsacret en zonas delesnables y sobre excavaciones.	Tipo de roca V – IV, Unidad Granodiorita Regional brechada e intruida por el porfido, la que se encuentra alterada y meteorizada.
T6	Instalación de cimbras GWF25 a 1.5m de separación y aplicación de schotcret sección completa; relleno con bolsacret en zonas delesnables y sobre excavaciones.	Tipo de roca V – III, tramo que atraviesa menor grado de alteración y meteorización. La granodiorita brechada e intruida por el porfido.
T7	Instalación de cimbras GWF25 a 1.5m de separación y aplicación de schotcret sección completa; relleno con bolsacret en zonas delesnables y sobre excavaciones.	Tipo de roca V – III, tramo que atraviesa menor grado de alteración y meteorización. La granodiorita brechada e intruida por el pórfido cuarzo - monzonítico.

Fuente; Propia del Tesista, 2013.

4.7. TUNEL DE DESVIO

Para la actualización del perfil del túnel de desvío se tienen los registros de superficie y los registros de los sondajes MQG-0807, MQG-0803, MQG-0802, MQG-0801, MQG- 0904, MQG-0704, MQG-0307, MQG-0905, MQG-0107, MQG-1001, MQG-1002, MQG-1003A, EA-07 y EA-03.

4.7.1. Condiciones Geológicas

El túnel de desvío se emplaza, en forma sucesiva desde aguas arriba hacia aguas abajo, en el pórfido cuarzo monzonítico, en la granodiorita, granodiorita brechada e intruida del Cz-Mz, esta unidad es reconocida en las cercanías de los sectores W y N de la proyección del tajo donde se reconoce la presencia de brechas e intrusiones de pórfido, relacionados con los procesos de mineralización de Quellaveco, y en las secuencias volcánicas de la serie Paralaque. Sin embargo, la mayor parte de la traza del túnel está proyectada sobre la Granodiorita, la cual se presenta moderadamente alterada en sus primeros tramos.

El detalle de las distintas unidades geológicas a lo largo de la traza del túnel se presenta en el Anexo N° 1, Plano N° 2 y 7.

En la traza del túnel se reconoce una falla mayor en el sector de la Quebrada Sarallénque.

Esta falla se reconoce con una disposición NE y alto ángulo de buzamiento. Esta orientación fue definida a partir de las estructuras orientadas para el sondaje MQG-1002. En las celdas geotécnicas levantadas en la zona de la quebrada se reconocen estructuras de similar orientación con buzamiento que varían entre los 45° y 80°. Para la falla se determinó una potencia promedio de 30 m con una zona de influencia de 80 m aproximadamente.

En los sondajes MQG-1003A y MQG-1002, se reconoce para la zona de falla la presencia de roca fuertemente fracturada con argilización intensa y salbanda de falla, ver figura N° 32.

Independiente de lo anterior, no se descarta la presencia de otras discontinuidades mayores relacionadas con algunos de los lineamientos principales destacados o incluso los no evidenciados en superficie, debido a la cobertura de las secuencias volcánicas efusivas más jóvenes que recubren el área de estudio.

Figura N° 32, Tramos de sondajes MQG-1002 y MQG-1003A donde se reconoce zona de fallas.



Fuente; Geotecnia Peruana SRL.

4.7.2. Condiciones Geotécnicas

Los tramos geotécnicos fueron determinados considerando la litología, la presencia de estructuras o lineamientos, alteraciones y/o meteorización de la roca, sobrecarga y variaciones en el rumbo de la obra. Con esto el túnel de desvío quedó determinado por 15 tramos geológicos-geotécnicos los cuales se resumen en tabla N° 54, mientras que en tabla N° 55 se presentan los porcentajes de roca esperado para cada clase en los diferentes tramos geológico-geotécnicos.

Es importante notar que debido a la falta de información, las calidades geotécnicas del contacto entre las unidades granodiorita regional y volcánico Paralaque fueron estimadas en base a las observaciones de terreno y la experiencia del consultor para condiciones geológicas similares.

Tabla N° 54, Resumen de calidades de Túnel de Desvío Río Asana.

Tramos	RMR ajustado		Q	
	Desfavorable	Favorable	Desfavorable	Favorable
T1	18	57	0.06	6.67
	V	III	Roca Tipo V	Roca Tipo II
	Muy Mala	Regular		
T2	25	54	0.20	6.60
	IV	III	Roca Tipo IV	Roca Tipo II
	Mala	Regular		
T3	23	71	0.39	11.22
	IV	II	Roca Tipo IV	Roca Tipo I
	Mala	Buena		
T4	18	47	0.017	1.44
	V	III	Roca Tipo VI	Roca Tipo III
	Muy Mala	Regular		
T5	24	65	0.15	7.04
	IV	II	Roca Tipo IV	Roca Tipo II
	Mala	Buena		
T6	26	72	0.2	11.8
	IV	II	Roca Tipo IV	Roca Tipo I
	Mala	Buena		
T7	19	65	0.06	7.92
	V	II	Roca Tipo V	Roca Tipo II
	Muy Mala	Buena		
T8	12	53	0.04	2.86
	V	III	Roca Tipo V	Roca Tipo III
	Muy Mala	Regular		
T9	12	53	0.04	2.86
	V	III	Roca Tipo V	Roca Tipo III
	Muy Mala	Regular		
T10	18	65	0.03	7.92
	V	II	Roca Tipo VI	Roca Tipo II
	Muy Mala	Buena		
T11	13	42	0.01	0.63
	V	III	Roca Tipo VI	Roca Tipo III
	Muy Mala	Regular		
T12	22	65	0.07	7.92
	IV	II	Roca Tipo V	Roca Tipo II
	Mala	Buena		
T13	14	62	0.03	4.99
	V	II	Roca Tipo VI	Roca Tipo III
	Muy Mala	Buena		
T14	14	62	0.04	4.99
	V	II	Roca Tipo V	Roca Tipo III
	Muy Mala	Buena		
T15	14	61	0.04	7.48
	V	II	Roca Tipo V	Roca Tipo II
	Muy Mala	Buena		

Fuente; Ingeroc, 2011.



Tabla N° 55, Porcentajes esperados de cada clase de roca para túnel de desvío.

CALIDAD GEOTÉCNICA Q						
Q	Roca Tipo VI	Roca Tipo V	Roca Tipo IV	Roca Tipo III	Roca Tipo II	Roca Tipo I
Tramo	0.001 - 0.03	0.03 - 0.1	0.1 - 0.4	0.4 - 5	5 - 10	10 - 1000
T1						
Probable		15	35	40	10	
Optimista		5	30	45	20	
Pesimista	5	20	40	35		
T2						
Probable		5	45	35	15	
Optimista		5	40	30	20	5
Pesimista	5	10	45	30	10	
T3						
Probable			25	45	20	10
Optimista			15	40	25	20
Pesimista	5		30	45	15	5
T4						
Probable	15	25	35	15		
Optimista	5	25	35	30	5	
Pesimista	25	35	30	10		
T6						
Probable		5	20	30	35	10
Optimista			20	30	35	15
Pesimista		10	25	35	30	
T8						
Probable			15	35	40	10
Optimista			5	35	40	20
Pesimista		5	25	35	35	
T7						
Probable	2	10	38	30	20	
Optimista		5	35	30	25	5
Pesimista	5	15	40	25	15	
T8						
Probable	5	30	40	20	5	
Optimista		20	45	25	10	
Pesimista	10	35	40	15		
T9						
Probable	5	20	25	25	15	
Optimista		20	35	35	10	
Pesimista	10	40	35	15		
T10						
Probable	5	20	35	25	15	
Optimista		20	30	30	20	
Pesimista	10	25	40	20	5	
T11						
Probable	10	30	45	15		
Optimista		25	50	20	5	
Pesimista	15	35	40	10		
T12						
Probable	1	10	29	40	20	
Optimista		10	25	40	25	
Pesimista	2	15	33	35	25	
T13						
Probable	5	15	35	40	5	
Optimista		15	30	45	10	
Pesimista	10	15	40	35		
T14						
Probable	2	20	35	38	5	
Optimista		10	35	45	10	
Pesimista	5	25	35	35		
T16						
Probable		20	30	40	10	
Optimista		10	30	40	15	5
Pesimista	5	20	35	35	5	

Fuente; Ingeroc, 2011.

4.7.3. Medidas de sostenimiento

Se recomienda las siguientes tipos de sostenimiento a los 15 tramos divididos el túnel Asana.

Tabla N° 56, Medidas de sostenimiento recomendada para el Túnel de Desvió Rio Asana.

TRAMO	MEDIDAS DE SOSTENIMIENTO	CONDICION DE LA ROCA
T1	Instalación de cimbras GWF25 a 1.5m de separación y aplicación de schotcret sección completa; relleno con bolsacret en zonas delesnables y sobre excavaciones.	Tipo de roca V – III, Pórfido Cuarzo Monzonitico.
T2	Instalación de pernos de anclaje sistemático y cimbras separadas a 1.5 – 2.0m, aplicación de schotcret de acuerdo a los parámetros geomecánicos. Instalación de drenes de alivio en zonas de flujo de agua subterránea.	Tipo de roca IV - III, Porfido cuarzo monzonitico, Granodiorita
T3	Instalación de pernos de anclaje sistemático y puntuales de 1.5 m, cimbras y aplicación de schotcret en sitios puntuales.	Tipo de roca IV - II, Granodiorita.
T4	Instalación de cimbras GWF25 a 1.5m de separación y aplicación de schotcret sección completa; relleno con bolsacret en zonas delesnables y sobre excavaciones.	Tipo de roca V - III, Granodiorita.
T5	Instalación de pernos de anclaje sistemático y puntuales de 1.5 m, cimbras y aplicación de schotcret en sitios puntuales.	Tipo de roca IV - II, Granodiorita.
T6	Instalación de pernos de anclaje sistemático y puntuales de 1.5 m, cimbras y aplicación de schotcret en sitios puntuales.	Tipo de roca IV - II, Granodiorita.
T7	Instalación de cimbras GWF25 A 1.5m de separación: Instalación de pernos de anclaje sistemático y puntuales de 1.5 m, cimbras y aplicación de schotcret en sección completa.	Tipo de roca V – II, Granodiorita.
T8	Instalación de cimbras GWF25 a 1.5m de separación y aplicación de schotcret sección completa; relleno con bolsacret en zonas delesnables y sobre excavaciones.	Tipo de roca V – III, Granodiorita brechada e intruida de Cz – Mz.
T9	Instalación de cimbras GWF25 a 1.5m de separación y aplicación de schotcret sección completa; relleno con bolsacret en zonas delesnables y sobre excavaciones.	Tipo de roca V – III, Granodiorita brachada e intruida de Cz – Mz.
T10	Instalación de cimbras GWF25 a 1.5m de separación y aplicación de schotcret sección completa; relleno con bolsacret en zonas delesnables y sobre excavaciones.	Tipo de roca V – III, Granodiorita
T11	Instalación de cimbras GWF25 a 1.5m de separación y aplicación de schotcret sección completa; relleno con bolsacret en zonas delesnables y sobre excavaciones.	Tipo de roca V – III, Granodiorita y Volcánico Paralaque.
T12	Instalación de pernos de anclaje sistemático y puntuales de 1.5 m, cimbras y aplicación de schotcret en sitios puntuales.	Tipo de roca IV - II, Volcánico Paralaque.
T13	Instalación de cimbras GWF25 A 1.5m de separación: Instalación de pernos de anclaje sistemático y puntuales de 1.5 m, cimbras y aplicación de schotcret en en sección completa.	Tipo de roca V – II, Volcánico Paralaque.
T14	Instalación de cimbras GWF25 A 1.5m de separación: Instalación de pernos de anclaje sistemático y puntuales de 1.5 m, cimbras y aplicación de schotcret en sección completa.	Tipo de roca V – II, Volcánico Paralaque.
T15	Instalación de cimbras GWF25 A 1.5m de separación: Instalación de pernos de anclaje sistemático y puntuales de 1.5 m, cimbras y aplicación de schotcret en sección completa.	Tipo de roca V – II, Volcánico Paralaque.

Fuente: Propia del tesista, 2013.

4.8. ESTUDIO COMPARATIVO DEL PROYECTO TUNEL DE DESVIO RIO ASANA CON OTROS PROYECTOS SIMILARES

Dentro del área geográfica de la Mina Toquepala, en el distrito de Ilabaya, provincia de Jorge Basadre, departamento de Tacna se han ejecutado dos túneles de 2.063 y 154 m de longitud, con una anchura funcional de 7,20 m para dar cabida a una faja transportadora y un carril de circulación de tráfico rodado. Esta actuación se enmarca dentro del proyecto de mejora tecnológica del sistema de transporte de mineral en el conjunto de la mina. El presente artículo expone las características constructivas y de diseño de ambos túneles.

Los túneles, ubicados en el entorno de mina, se encuadran dentro de una actuación de mejora de las infraestructuras de transporte en el conjunto de la misma, han sido excavados mayoritariamente en riolitas y andesitas de buena calidad geotécnica, con un índice RMR normalmente superior a 50 puntos excepto algunas zonas en el túnel largo asociadas a unidades intrusivas (Diatremas y/o chimeneas volcánicas, pórfidos, brechas de turmalina y diques).

Los túneles se construyeron siguiendo el NATM (Nuevo Método Austriaco), a sección completa con una sección de excavación de 35 m² y una longitud de pase variable de 1 a 6 m. Durante los trabajos de excavación de los emboquilles, se retiraron algunos materiales coluviales, materializándose los frentamientos de los túneles en andesitas y riolitas previa ejecución de paraguas de sostenimiento de 9,0 metros de longitud.

El sostenimiento de los taludes se ejecutó mediante bulones, drenes californianos y concreto proyectado para los taludes de tipo definitivo y únicamente mediante hormigón proyectado para los de carácter temporal.

La excavación del túnel largo se ejecutó mediante dos frentes de avance y comenzó en Septiembre de 2011. Las obras de excavación finalizaron en marzo de 2012, con un promedio de avance de en torno a 300 m/mes considerando los dos frentes. La excavación del túnel corto se llevó a cabo durante el mes de Abril de 2012.

4.8.1. DATOS GEOLÓGICOS

En la muestra cartográfica geológico-geotécnica realizada, los macizos rocosos presentes en el área de estudio están conformados por rocas ígneas de origen volcánico (riolitas y andesitas), e intrusivo (brechas de turmalina, diques y porfidos) que se encuentran cubiertas de manera parcial o total por depósitos cuaternarios tales como coluviales, aluviales y residuales.

A continuación se describen las unidades litológicas reconocidas en el área de estudio:

- **Riolitas Toquepala (KsTi-Ttr)**

Se trata de secuencias de roca volcánica de textura afanítica, de colores claros. Se presentan con formas de ondulaciones suaves y presentan brechas de matriz silícica con bandeamiento fino, a manera de flujo y cristales de feldespatos.

En el área de estudio se aprecian variaciones de esta unidad conforme a la textura y aspecto en el que se presenta, tales como; riolitas de aspecto tufáceo, riolitas de grano medio a grueso, riolitas de aspecto fluidal y riolitas porfídicas con granos de cuarzo y pirolusitas en fracturas, estas riolitas se encuentran como basamento rocoso predominante en forma de pseudo estratos con niveles delgados de andesitas gris oscuras. También son intruídas por diques, diatremas y pórfidos.

- **Andesita Toquepala (KsTi-Tta)**

Se trata de secuencias de rocas volcánicas de textura afanítica, de color gris oscuro a gris claro, se presentan en capas sub-horizontales conjuntas con las Riolitas Toquepala a manera de niveles, sus minerales esenciales son cristales de feldespatos y ferromagnesianos.

- **Rocas Intrusivas**

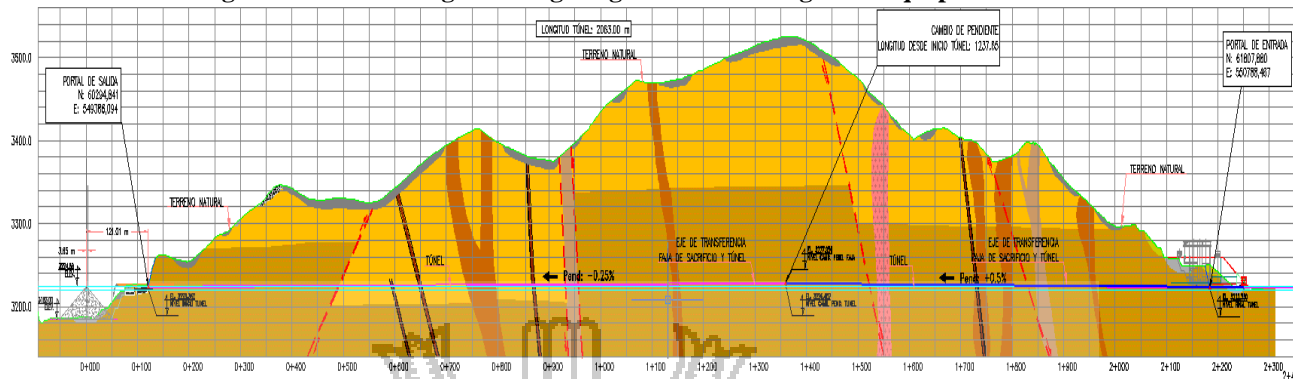
Formadas por intrusiones abisales, diques, brechas de turmalina, pequeños stocks, diatremas y cuellos volcánicos del Terciario inferior (Ti-de), correspondiente al segundo de tipo de intrusión con emplazamientos sucesivos de cuerpos menores, estas estructuras de intrusión contienen venillas, bandas y granos de turmalina e intruyen el basamento rocoso volcánico de riolita y andesita.

- **Depósitos Cuaternarios**

Se trata esencialmente de depósitos coluviales (Q-co) y residuales (Qr-rs) en forma de escombros en laderas y en depresiones cubriendo el basamento rocoso riolítico. También se encuentran depósitos de material removido de origen antropico. Como rellenos no consolidados (Qr-re) y material antropico de desmonte (Qr-ds).

La **Figura 33**, muestra el perfil geológico longitudinal del túnel largo donde se puede observar que la mayor parte del túnel se excavó en andesitas y riolitas. Asimismo se pueden observar diversas zonas de debilidad del macizo rocoso relacionadas con la formación de brechas y áreas de fracturación intensa.

Figura 33 – Perfil longitudinal geológico del túnel largo de Toquepala.



4.8.2. DATOS GEOTÉCNICOS

Con el objeto de partir de hipótesis realistas en cuanto al comportamiento tenso-deformacional del macizo rocoso de implantación de los túneles durante la fase de proyecto se desarrollaron sendos estudios geotécnicos mediante los cuales se obtuvo un modelo geotécnico del trazado de cada uno de los túneles.

La campaña de campo consistió en perforaciones diamantinas, calicatas y estaciones geomecánicas. Asimismo se efectuó un intenso programa de ensayos de laboratorio.

En la caracterización se prestó una especial atención al estudio detallado de la fracturación ya que condiciona en gran medida el comportamiento de la excavación en riolitas y andesitas para las intensidades de fracturación presentes en el área de implantación de los túneles.

La caracterización geomecánica del macizo rocoso se realizó mediante el análisis de toda la información recabada y mediante el empleo de la metodología de Hoek-Brown para obtener los parámetros resistentes y deformacionales del macizo rocoso en función del RMR. En la **Tabla 57**, se especifican las propiedades asignadas a la unidad de Riolitas (KsTi-Ttr) y Andesitas Toquepala (KsTi-Tta).

Tabla 57 – Propiedades geomecánicas del macizo rocoso

RMR _{cálculo}	E _m (MPa)	v	c (MPa)	φ (°)	γ (t/m ³)	h _{max} (m)
65	22.828		2.5	61	2.65	120
55	13.867		2.1	51	2.65	300
45	10.503	0,24	1.4	49	2.65	250
35	7.956		1.0	47	2.65	200
15	4.564		0.4	34	2.65	180

4.8.3. HIDROGEOLOGIA

No cabe esperar niveles de agua en los terrenos afectados por la excavación de los túneles. La presencia de agua no será importante y estará limitada a pequeñas zonas de humedad o goteo de agua por infiltración superficial directa.

4.8.4. DISEÑO DE LOS TÚNELES

En función de los requerimientos funcionales del túnel se establece la sección de excavación. A continuación, en base a la caracterización del terreno desarrollada se procede a la elección del método constructivo y al diseño de los sostenimientos.

a) Datos geométricos y funcionales

Los túneles, de longitudes de 2.063 y 154 m, poseen un ancho útil de 7,20 m destinado a albergar una faja transportadora y un carril de circulación de tráfico rodado. En la sección funcional de los túneles que presenta solera plana, hastiales rectos y techo abovedado mediante la combinación de tres arcos circulares. La altura máxima es de 5,30 m y la sección de excavación tiene 35 m².

En el túnel largo se han ejecutado siete anchurones de 13,0 m de profundidad y 6,50 m de ancho útil con el objeto de albergar instalaciones eléctricas, y que a su vez se podrá emplear como espacio de estacionamiento o para permitir invertir el sentido de circulación del tráfico rodado. Adicionalmente estos espacios se emplearon en la fase constructiva como depósitos temporales de material y para facilitar la maniobrabilidad de los equipos.

b) Método constructivo. Sostenimientos

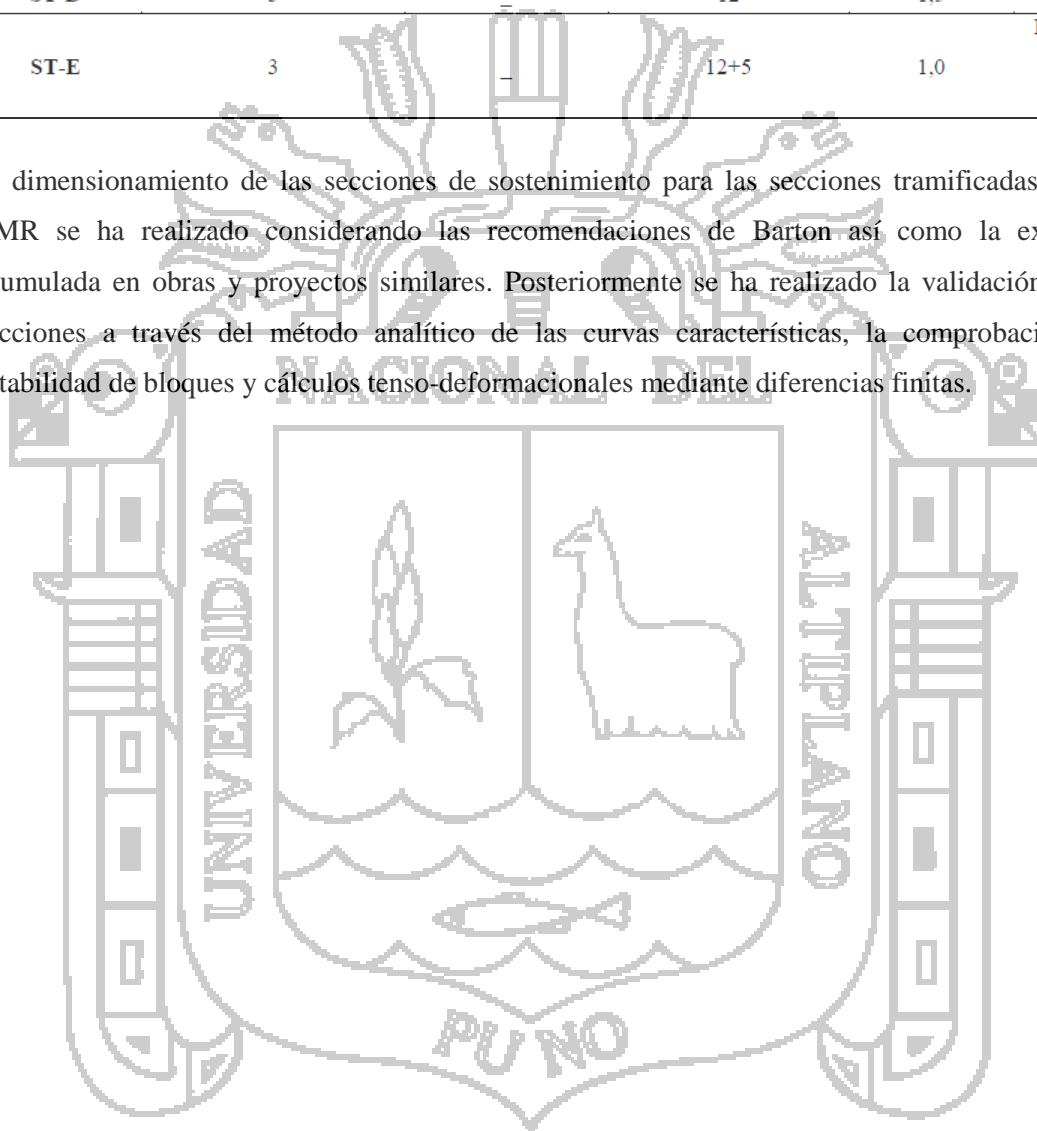
El método constructivo seleccionado fue el NATM (Nuevo Método Austriaco). La excavación se llevó a cabo mediante explosivos en las zonas de terreno más resistentes, y mediante medios mecánicos en los terrenos de peor calidad geotécnica. En todos los casos, debido a las dimensiones de la sección (35 m²), la excavación se materializó a sección completa. El sostenimiento se ejecutó mediante elementos flexibles como son el hormigón proyectado, bulones y marcos metálicos que se adaptan perfectamente a la filosofía constructiva del Nuevo Método Austriaco.

Partiendo del modelo geotécnico de los macizos rocosos y a través de una metodología progresiva que emplea diversos criterios y procedimientos se definieron 5 diferentes tipos de sostenimiento. La **Tabla 58** muestra los datos principales referentes a cada tipo de sostenimiento. La aplicación de estos sostenimientos tal y como se muestra en dicho cuadro depende de la calidad geomecánica del macizo rocoso cuantificada mediante el RMR.

Tabla 58 – Secciones tipo de sostenimiento

SECCIÓN TIPO	Sostenimiento propuesto				
	Sellado (Hormigón proyectado) e (cm)	Bulones Mn 12, L=3,0m e _T x e _L (m)	Hormigón proyectado de sostenimiento (cm)	Cerchas LG 70/26/18 e (m)	Otros (si es necesario)
ST-A	3	2,5x2,0	–	–	–
ST-B	3	2,0x2,0	4	–	–
ST-C	3	2,0x1,5	7	–	–
ST-D	3	–	12	1,5	–
ST-E	3	–	12+5	1,0	Empiquetado Machón Sellado del frente

El dimensionamiento de las secciones de sostenimiento para las secciones tramificadas según el RMR se ha realizado considerando las recomendaciones de Barton así como la experiencia acumulada en obras y proyectos similares. Posteriormente se ha realizado la validación de estas secciones a través del método analítico de las curvas características, la comprobación de la estabilidad de bloques y cálculos tenso-deformationales mediante diferencias finitas.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- En Portal de Entrada las condiciones geológicas del proyecto se encuentran emplazadas en Granodiorita, Granodiorita lixiviada. En el Portal de salida se emplazan en tobas riolíticas soldadas de la unidad Volcánico Paralaque, las cuales corresponden a una roca competente, fresca, con un grado moderado de fracturamiento, esta roca se encuentra parcialmente cubiertas por depósitos coluviales. En el Portal Ventana de Construcción el macizo rocoso donde se emplaza se caracteriza por la presencia de pórfido dacítico, dacíticos-andesíticos, granodiorita y en menor medida brechas, todo estos cubiertos por una capa de material coluvial de 10m.
- En el Túnel Ventana de Construcción, cercanía al tajo se emplaza la unidad de granodiorita se encuentra brechada debido a la intrusión del pórfidos cuarzo monzoníticos. En el tramo del Túnel de Desvió se emplazan en la Unidad pórfido cuarzo monzonítico, Granodiorita brechada e intruida de pórfido Cz – Mz y la Serie Asana; donde el río Asana que recorre de este a oeste y el caudal medio anual en este punto del túnel de desvió es del orden de los 1.100 l/s.
- La clasificación geomecánica del macizo rocoso son: portal de entrada se ha estimado como mala con tipo de roca IV según (RMR) y muy mala con valores de (0.02 – 2.5) según (Q). Portal de Salida se ha estimado como regular a buena del tipo de roca III - II y como mala a regular con valores de (2.6 – 5.3). en el sector del Portal Ventana de Construcción se calificado como malo a regular con tipo de roca IV-III y se calificado como de calidad extremadamente mala a mala con valores de (0.06 – 1.02). En el sector de Túnel Ventana de Construcción es calificada como muy mala a regular con con tipo de roca V y III y se calificado como de calidad extremadamente mala a regular con valores de 0.08 – 5.72. Túnel de Desvió se dividen en 15 tramos donde se determinaron, las calidades de rocas varían de muy mala a buena con valores de 12 – 72 y con tipo de rocas V - II según RMR (Bieniawski). De acuerdo a Q (Barton) la calidad varía de extremadamente mala a buena con valores de (0.07 – 11.8).

RECOMENDACIONES

- Debido a la presencia de fallas de actividad reciente (activas), detectadas en la ribera Sur del río Asana, se recomienda mantener un sistema de monitoreo para las estructuras principales que se encuentren a lo largo de la traza del túnel y de la zona de emplazamiento de la barrera de desvío.
- Se recomienda que se desarrollen (calicatas o zanjas) para exploraciones en el sector de la quebrada Sarallenque y de Captación Millune, ya que corresponden a las zonas con menor nivel de información. Es necesario aclarar la disposición del contacto roca suelo y profundizar el estudio de las características de estos.
- Se recomienda instalar piezómetros en los pozos de los sondajes efectuados de modo de poder monitorear el nivel de agua, antes y durante la construcción del túnel, esta información permitirá estimar de mejor manera los niveles del agua subterránea y el efecto del túnel en la variación de este nivel.
- Se recomienda que durante la construcción del túnel un Geotecnista verifique las condiciones estructurales y de calidad del macizo rocoso, para ir ajustando las características geológicas y geotécnicas del trazado del túnel de desvío. En las cercanías de fallas o estructuras complejas se recomienda efectuar sondajes a la frente de túnel.
- Se recomienda efectuar mediciones del potencial de generación de aguas ácidas en los testigos de los sondajes (ensayos ABA y NAG), además de un monitoreo de la calidad de las aguas de los pozos de sondajes y en alumbramientos de agua en la zona del yacimiento.

BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS

- LFARO, S.J.M. 2000. Aplicación a nuevas técnicas en el estudio ingeniero geólogo de los macizos rocosos.
- BARTON N., CHOUBEY V., 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics* 12, p 1-54. International Society for Rock Mechanics. 1981. *Rock characterization, testing and monitoring - ISRM suggested methods*. Pergamon Press, Oxford, 211 p.
- BIENIAWSKI Z. T. 1979. "Geomechanic clasification of rock masses and its application to tunneling. Proc II Tnt Congress for rock Mechanic ISMR VOL II.
- BIENIAWSKI Z. T. 1989. "Engineering Rock Mass Classifications?" Wiley, New York.
- BIENIAWSKI Z. T. 1995, "Classifications of Rock Masses for Engineering: The RMR System and Future Trends" *Comprehensive Rock Engineering* (ed J.A. Hudson) Vol 3., N°. 22.
- BRADY, B Y BROWN, E. *Rock mechanics for underground mining*. Kluwer Ac. Publ.
- BRAJAS, M. Das., *Fundamentos de la ingeniería geotécnica*.
- CHACON, J. *Apuntes de Mecánica de Rocas*. Servicio de Reprografía. Facultad de Ciencias. 1999. 133 pp.
- DEERE, D.U., *Geologic Considerations,*" Chapter 1 of *Rock Mechanics in Engineering Practice*, K.G. Stagg and O.C. Zienkiewicz, Eds., Wiley, New York, 1968, pp. 1-20.
- DEERE, D.U. and DEERE, D.W., "The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice," *Rock Classification Systems for Engineering purposes*, ASTM STP 984, Louis Kirkaldie, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1988, pp. 91- 101.
- DEMPERS, G.D., 1994. *Optimal Usage of Exploration Core for Geotechnical Purposes*. IV CSMR / *Integral Approach to Applied Rock Mechanics*, Santiago, Chile, p 219-330.
- FERRER, M. y Gonzales de Vallejo, L. 1999. "Manual de Campo Para la Descripcion y Caracterizacion de mазisоs Rocosos en Afloramientos" disponible en el internet via: <http://www.igme.es/internet/RecursosMinerales/publicaciones/indice.aps?numero20>.
- Gonzalez de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2004). *Ingenieria Geológica*. Pearson Educación. Madrid.
- GONZALEZ D.V., L.I. 2003. *Ingeniería Geológica*, Pearson Educación, Madrid España, 2003, pp. 715.
- GOODMAN, R.E. JOHN WILEY, 1989. "Introduction to rock mechanics".
- GOODMAN, R. (1993) *Engineering Geology*. Wiley.

- HOEK, E., BROWN, E.T. 1980. "Underground excavations in rock", Institution of mining and metallurgy, London, 1980, Versión en español por Mc Graw Hill, México.
- HOEK, E., BROWN, E.T. 1980. "Excavaciones Subterráneas en Rocas", Institution of mining and metallurgy, London, 1986, Versión en español por Mc Graw Hill, México. 634 pp.
- HOEK, E., BRAY, L. 1981. "Rock Slope Engineering", Institution of mining and metallurgy, London, 3rd ed.
- HERNAN GAVILANES J. y BYRON ANDRADE HARO, 2004 Introducción a la Ingeniería de Tuneles (caracterización, clasificación y análisis geomecánico de macizos rocosos). Asociación de Ingenieros de Minas del Ecuador.
- HOEK E., 1994. Strength of rock and rock masses, *ISRM News Journal*, 2(2), 4 16.
- HOEK E., KAISER P.K. y BAWDEN W.F. 1995. Support of Underground excavations in Hard Rock, p. 215, Balkema, Rotterdam.
- HOEK, E., MARINOS, P., y BENISSI, M. 1998. Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Atens Schist Formation. *Bull Engg. Geol. Env.* 57(2), 151-160.
- Hoyos Patiño, F., 2002, Geotecnia, diccionario básico, Hombre Nuevo Editores, Medellín.
- IGME (1987). Manual de Ingeniería de Taludes. Capítulo 5: Caracterización Geotécnica de materiales, pp 117- 152.
- Javier Alonso Rodríguez, Caracterización de macizos rocosos, (Abr. 2007)
- LEIVA G., VALDES R., ARAVENA Y., VILLARROEL R., 2000. Caracterización Geotécnica-Estructural, Mina Radomiro Tomic, Actas 9º Congreso Geológico Chileno, Volumen 1, p 261-265.
- L. GONZÁLEZ DE VALLEJO, M. FERRER, L. ORTUÑO y C. OTEO (2002). *Ingeniería geológica*. Prentice Hall. Madrid, 715 p.
- MERCEDES, F., Y GONZALEZ DE VALLEJO, L. (2007). Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- MERINO L. 2001. "Mecánica de Roca Aplicada a la Minería" INGEROC – Lima.
- MOSQUERA, F. 1988. "Petrografía: Rocas Igneas, Metaforficas y Sedimentarias". FIGEMPA – U.C. Quito.
- M. FERRER y L. GONZÁLEZ DE VALLEJO (1999). Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos. IGME, Madrid, 107 p.

- ROMANA, M. El papel de las clasificaciones geomecánicas en el estudio de la estabilidad de taludes. En “Alonso,E.; Corominas,J., Chacón, J., Oteo,C. y Pérez,J. , 1997, IV Simp. Nac. Taludes y Laderas Inestables, Granada”, vol III, pp. 955-1011.
- ROMANA, M. Clasificaciones Geomecánicas. Editores J.B.Serón y E.Montalar. STMR. Madrid, 185 pp.
- RAMÍREZ O. P., Alejano M. L. 2008. “Mecánica de Roca: Fundamentos e Ingeniería de Taludes” Gráficos Monterreina S.A. Madrid, España. 728 pp.
- ROCSCIENCE INC. 2002. “RocLab User’s Guide”. Disponible en la Internet via: <http://www.Rockscience.com>.
- SERRANO, A. (2001). Mecánica de las Rocas. Colegio de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Servicio de Publicaciones. Colección Escuelas. 2 vol. Madrid.
- URSA Engineering. 2002. “Rock Mass Quality”. Disponible en la internet via: www.ursaeng.com/RMR.pdf.
- VILLARROEL, R., 1994. Metodología para el Levantamiento Geotécnico de Sondajes en Fotografías, CODELCO - CHILE, Gerencia de Exploraciones, Calama, Inedito GLNI-134/94, 40 p.
- VILLARROEL R., MERINO L., LEIVA G., SANCHEZ G., 2001Metodologia de caracterización geotécnica a partir de testigos de sondajes de diamantina en rocas alteradas y su aplicación en minería a tajo abierto y subterránea. Actas, Vol1, p. 189-200: V Congreso Nacional de Taludes y Laderas Inestables, Madrid.
- <http://petro.uniovi.es/Docencia/iga/1MacizosRoc07.pdf>

ANEXOS

1. PLANOS Y PERFILES

1. PLANO DE UBICACIÓN
2. PLANO GEOLOGICO
3. PERFIL GEOLOGICO GEOTECNICO PORTAL DE ENTRADA DEL TUNEL
4. PERFIL GEOLOGICO GEOTECNICO PORTAL DE SALIDA DEL TUNEL
5. PERFIL GEOLOGICO GEOTECNICO PORTAL VENTANA DE CONSTRUCCION
6. PERFIL GEOLOGICO GEOTECNICO TUNEL VENTANA DE CONSTRUCCION
7. PERFIL GEOLOGICO GEOTECNICO TUNEL DE DESVIO RIO ASANA

2. MAPEO DE CELDAS GEOTECNICAS

3. REGISTRO GEOLOGICO – GEOTECNICO DE SONDAJES

4. RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO

5. PARAMETROS DEL MACIZO ROCOSO

6. RESULTADOS DE CALIDADES GEOTECNICAS DE LOS DIFERENTES SONDAJES