



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA



ESTUDIO GEOLÓGICO Y GEOTÉCNICO PARA EL DISEÑO DEL EMBALSE CATEMU, REGIÓN DE VALPARAÍSO, CHILE

Memoria para optar al Título de Geólogo

Cristián Mauricio Mendoza Recabal

Profesor Patrocinante: Msc. Abraham Elías González Martínez

Profesores Comisión: Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra

Dr. Luis Arturo Quinzio Sinn

Concepción, 2019



Dedicado a mi querida familia.

ÍNDICE

Página

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. GENERALIDADES	1
1.2. OBJETIVOS	1
1.2.1. Objetivo General	1
1.2.2. Objetivos Específicos	1
1.3. UBICACIÓN Y ACCESOS	2
1.4. METODOLOGÍA	3
1.4.1. Gabinete I.....	3
1.4.2. Trabajo de Terreno	3
1.4.3. Gabinete II.....	5
1.5. AGRADECIMIENTOS	6
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. GENERALIDADES	7
2.2. SISTEMA DE CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA	7
2.2.1. Rock Quality Designation (RQD).....	7
2.2.2. Rock Mass Rating (RMR).....	9
2.3. ENSAYOS	10
2.3.1. Ensayo de Penetración Estándar (SPT).....	10
2.3.2. Ensayo de Compresión Simple o Uniaxial	11
2.3.3. Ensayo de Permeabilidad Lefranc	12
2.3.4. Ensayo de Permeabilidad Lugeon.....	13
3. ANTECEDENTES DEL PROYECTO	16
3.1. GENERALIDADES	16
3.2. EMBALSE CATEMU	16
3.2.1. Muro Presa	16
3.2.2. Obras Anexas.....	18
3.2.2.1. Túnel de Desvío	18
3.2.2.2. Evacuador de Crecidas	18
3.2.2.3. Entrega a Riego	18
3.2.2.4. Desagüe de Fondo.....	18
3.3. ZONAS DE EMPRÉSTITO	19
4. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	21

4.1. GEOLOGÍA REGIONAL	21
4.1.1. Rocas Estratificadas	21
4.1.1.1. Formación Veta Negra.....	21
4.1.1.2. Formación Las Chilcas	22
4.1.2. Rocas Intrusivas	24
4.1.2.1. Súper Unidad Illapel.....	24
4.1.3. Depósitos Cuaternarios	26
4.1.4. Estructuras	26
4.2. GEOMORFOLOGÍA	27
4.2.1. Generalidades	27
4.2.2. Geomorfología Local	27
4.2.2.1. Relieves de Acumulación y Erosión.....	27
5. MARCO GEOLÓGICO LOCAL	29
5.1. LITOLOGÍA	29
5.1.1. Rocas Volcánicas	29
5.1.1.1. Andesítas	29
5.1.1.2. Dacitas	30
5.1.1.3. Brechas	31
5.1.2. Depósitos no Consolidados	33
5.1.2.1. Depósitos Fluviales (Qf).....	33
5.1.2.2. Depósitos Aluviales (Qa).....	34
5.1.2.3. Depósitos de Conos de Deyección (Qc).....	35
5.1.2.4. Depósitos Coluviales y/o Residuales (Qe).....	36
5.2. ALTERACIONES	37
5.2.1. Argílica Intermedia	37
5.2.2. Sericítica	39
5.2.3. Cloritización.....	40
5.3. ESTRATIGRAFÍA	41
6. ESTUDIO GEOTÉCNICO Y ENSAYOS	44
6.1. GENERALIDADES	44
6.2. SONDAJES EN SITIO DE PRESA	46
6.2.1. SC-01.....	46
6.2.2. SC-02.....	47
6.2.3. SC-03.....	48
6.2.4. SC-04.....	50
6.2.5. SC-05.....	51
6.2.6. SC-06.....	52
6.2.7. SC-07.....	53
6.2.8. SC-08.....	54

6.2.9. SC-09.....	55
6.2.10. SC-10.....	55
6.2.11. SC-11.....	56
6.2.12. SC-12.....	57
6.2.13. SC-13.....	58
6.2.14. SC-14.....	59
6.2.15. SC-15.....	60
6.2.16. SC-16.....	61
6.2.17. SC-17.....	62
6.2.18. SC-18.....	63
6.2.19. SC-19.....	64
6.2.20. SC-20.....	65
6.2.21. SC-21.....	65
6.2.22. SC-22.....	66
6.3. ESTRUCTURAS.....	67
6.3.1. Estribo Derecho.....	67
6.3.2. Estribo Izquierdo.....	69
6.3.3. Valle del Estero Catemu.....	71
6.3.4. Lineamientos.....	71
6.4. GEOLOGÍA Y GEOTÉCNIA DE OBRAS ANEXAS.....	71
6.4.1. Túnel de Desvío.....	71
6.4.2. Evacuador de Crecidas.....	73
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	74
REFERENCIAS.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1. 1.	Mapa de ubicación del área de estudio.....	2
1. 2.	Equipo de perforación	5
2. 1.	Cálculo de RQD	8
2. 2.	Curva de esfuerzo-deformación.	11
2. 3.	Ensayo Lefranc a nivel variable	13
2. 4.	Ensayo de permeabilidad tipo Lugeon	15
3. 1.	Sección Embalse Catemu	17
3. 2.	Zonas de empréstito.....	20
4. 1.	Mapa geológico del área de estudio	21
4. 2.	Mapa geomorfológico de la Región de Valparaíso	28
5. 1.	Andesita tipo ocoíta en sondaje SC-11.....	29
5. 2.	Fotomicrografía de sondaje SC-10.....	30
5. 3.	Fotomicrografía de sondaje SC-02.....	31
5. 4.	Dacita en sondaje SC-04	31
5. 5.	Fotomicrografía de sondaje SC-04.....	32
5. 6.	Brecha volcánica en sondaje SC-18	32
5. 7.	Fotomicrografía de sondaje SC-15.....	33
5. 8.	Depósitos actuales del Estero Catemu.....	34
5. 9.	Planicie del valle del Estero Catemu	35
5.10.	Depósitos de conos de deyección	36
5.11.	Depósitos coluviales y/o residuales.....	37
5.12.	Fotomicrografía de sondaje SC-16.....	38
5.13.	Fotomicrografía de sondaje SC-19.....	39
5.14.	Fotomicrografía de sondaje SC-03.....	40
5.15.	Columnas estratigráficas en zona de embalse	42
6. 1.	Mapa de inundación	45
6. 2.	Valle del Estero Catemu	68
6. 3.	Vista hacia el estribo izquierdo	70
6. 4.	Lineamiento identificado en estribo izquierdo	72
7. 1.	Calicata en zona de inundación	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
2. 1. Clasificación de RQD.....	7
2. 2. Puntaje de resistencia	9
2. 3. Puntaje de RQD.....	9
2. 4. Puntaje de espaciamiento	10
2. 5. Puntaje de condición de estructuras	10
2. 6. Puntaje de condición de agua	10
2. 7. Grado de permeabilidad	14
2. 8. Clasificación Lugeon.....	15
6. 1. Prospecciones realizadas en el área de estudio	44
6. 2. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-01.....	46
6. 3. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-02.....	48
6. 4. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-03.....	49
6. 5. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-04.....	50
6. 6. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-05.....	51
6. 7. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-06.....	53
6. 8. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-07.....	54
6. 9. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-08.....	54
6. 10. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-09.....	55
6. 11. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-10.....	56
6. 12. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-11.....	57
6. 13. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-12.....	58
6. 14. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-13.....	59
6. 15. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-14.....	60
6. 16. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-15.....	61
6. 17. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-16.....	61
6. 18. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-17.....	62

*FT = Fuera de texto.

6. 19.	Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-18.....	63
6. 20.	Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-19.....	64
6. 21.	Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-20.....	65
6. 22.	Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-21.....	66
6. 23.	Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-22.....	67



RESUMEN

El estudio geológico y geotécnico para el diseño del Embalse Catemu consiste en la construcción de una presa de grava compactada con pantalla de hormigón o en su sigla en inglés CFGD (Concrete Faced Gravel-fill Dam). Se ubicará en la localidad de Cerrillos a 22 km al norte de la Comuna de Catemu, Región de Valparaíso, específicamente aguas abajo de la confluencia de los esteros Gómez y El Sauce.

El proyecto contempla una presa con una longitud de 1.200 m de largo, llegando a la cota de los 559 m s.n.m., esta construcción tendrá una capacidad aproximada de 175 millones de metros cúbicos para la contención de agua inundando un área de 500 hectáreas, que servirán para abastecer las necesidades de consumo y riego de la zona para el sector agrícola y ganadero.

Para llevar a cabo el proyecto Embalse Catemu, es necesario la construcción de una presa excavada en depósitos fluvio-aluviales del Estero Catemu, compuestos principalmente de gravas y bolones en matriz de limo y arcilla, que presentan una profundidad máxima de 164,00 m, determinados por los sondajes realizados en el medio del valle. Sus estribos, izquierdo y derecho, se emplazarán en rocas de la Formación Las Chilcas y el Miembro Ocoa de la Formación Veta Negra respectivamente, mientras que las obras anexas, el túnel de desvío y el evacuador de crecidas, estarán excavados en depósitos cuaternarios y rocas pertenecientes a la Formación Las Chilcas. Dichas construcciones requieren 10 millones de metros cúbicos de áridos para el relleno del muro y 110.000 metros cúbicos como agregados para hormigón, materiales que serán extraídos de la zona de inundación del embalse y posteriormente procesados para su uso.

En total se ejecutaron 22 sondajes con recuperación de testigos de diámetro HQ3 (66,1 mm), perforando un total de 1.942,80 metros. 20 de los sondajes se disponen en la zona de construcción de la presa y obras anexas, mientras que 2 de ellos, se ubican aguas arriba del Estero Catemu, estos se nombraron SC (Sondaje Catemu) y numerados hasta el 22. La finalidad de los sondajes fue determinar con precisión el horizonte suelo-roca en toda la extensión del valle que coincide con el eje de la presa, además de establecer el tipo y calidad de la roca clasificándola según los parámetros RMR (Rock Mass Rating) y RQD (Rock Quality Designation), determinar las permeabilidades del suelo y el macizo rocoso con ensayos de Lefranc-Mandel y Lugeon. Además, de forma adicional, se realizaron ensayos de penetración estándar (SPT) y en laboratorio se calculó la resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa.

Las litologías presentes se clasificaron según el diagrama QAP (Streckeisen, 1979) con el estudio de muestras de mano y la confección de 14 cortes transparentes vistos en microscopio de luz polarizada, estas rocas fueron contrastadas con las litologías descritas en los trabajos de Thomas (1958) y la carta geológica de Quillota y Portillo (Rivano, 1996). Las rocas presentes son principalmente rocas volcánicas como andesitas de tipo ocoíta, dacitas y brechas, pertenecientes al Miembro Ocoa de la Formación Veta Negra y a la Formación Las Chilcas que se encuentran cubiertas por depósitos cuaternarios.

Geotécnicamente las rocas del estribo derecho se presentan con una resistencia a la compresión simple entre los 100-250 Mpa, mientras que las rocas del estribo izquierdo su resistencia disminuye a 80 Mpa, ambas zonas van aumentando su resistencia a medida que la perforación se profundiza. Según los ensayos de permeabilidad realizados en suelo y roca, Lefranc-Mandel y Lugeon, en las zonas de construcción de la presa y apoyos laterales, las permeabilidades son bajas, disminuyendo aún más en tramos donde las discontinuidades se encuentran con rellenos de arcillas.

El estudio fotogeológico realizado en la zona, indica un gran lineamiento en la zona del estribo izquierdo, donde se encuentra un portezuelo, lugar en que las rocas volcánicas de la Formación Las Chilcas se presentan con zonas muy alteradas, valores bajos de RMR y altos contenidos de arcillas, por lo que es de gran importancia estudiar si existe un deslizamiento actual del macizo rocoso que podrían generar remociones en el futuro, ya que, se proyecta la construcción del túnel de desvío y el evacuador de crecidas en dicha zona.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

El presente trabajo es un estudio geológico y geotécnico de la zona de emplazamiento de la presa y obras anexas (túnel de desvío y evacuador de crecidas) del proyecto Embalse Catemu, el cual permitirá caracterizar los depósitos aluviales y el basamento rocoso, a través de 22 sondajes con recuperación de testigos, según los parámetros geotécnicos RQD y RMR para la futura etapa de diseño de ingeniería y construcción de la presa.

El embalse Catemu se ubicará a 22 km al norte de la comuna de Catemu, en la localidad de Cerrillos, provincia de San Felipe de Aconcagua, Región de Valparaíso. El eje de la presa se pretende construir en la cabecera del estero Catemu a 1 km aguas abajo de la confluencia de los esteros Gómez y El Sauce, donde el valle presenta un ancho de 1.200 m, el cual se encuentra limitado por unidades volcanoclásticas pertenecientes a la Formación Las Chilcas y el Miembro Ocoa de la Formación Veta Negra. El valle se encuentra relleno con depósitos fluvio-aluviales, con una potencia aproximada de 160 m, como se puede apreciar en los sondajes realizados en el centro del valle.

El proyecto Embalse Catemu consiste en la construcción de una presa de grava con losa de hormigón o CFGD de 65 m de altura, 1.200 m de ancho, cuyo coronamiento culminará a los 559 m s.n.m., teniendo una capacidad total aproximada de 175.000.000 m³ de agua destinadas a abastecer las necesidades de riego del sector agrícola, inundando una superficie aproximada de 500 hectáreas.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

- Realizar un estudio geológico y geotécnico para el diseño del Embalse Catemu en la zona de emplazamiento de la presa y obras anexas.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Hacer un mapa geológico del sitio de presa y área de inundación a escala 1:2.000.

- Realizar perfil geológico-geotécnico del eje del muro y zona de obras anexas (túnel de desvío y evacuador de crecidas).
- Descripción litológica de sondajes.
- Clasificación geotécnica según los parámetros geotécnicos RQD y RMR.

1.3. UBICACIÓN Y ACCESOS

El área de estudio se ubica en la Región de Valparaíso, provincia de San Felipe de Aconcagua, en la localidad de Cerrillos perteneciente a la comuna de Catemu, ubicada a 85 km al norte de la ciudad de Santiago y a 95 km del puerto de Valparaíso (Figura 1.1), circunscrito en la Hoja Geológica Quillota y Portillo (Rivano, 1996) entre los 32°39.79' lat. Sur, 70° 56.58' long. Oeste y los 32°40.70'S lat. Sur, 70° 55.59' long. Oeste.

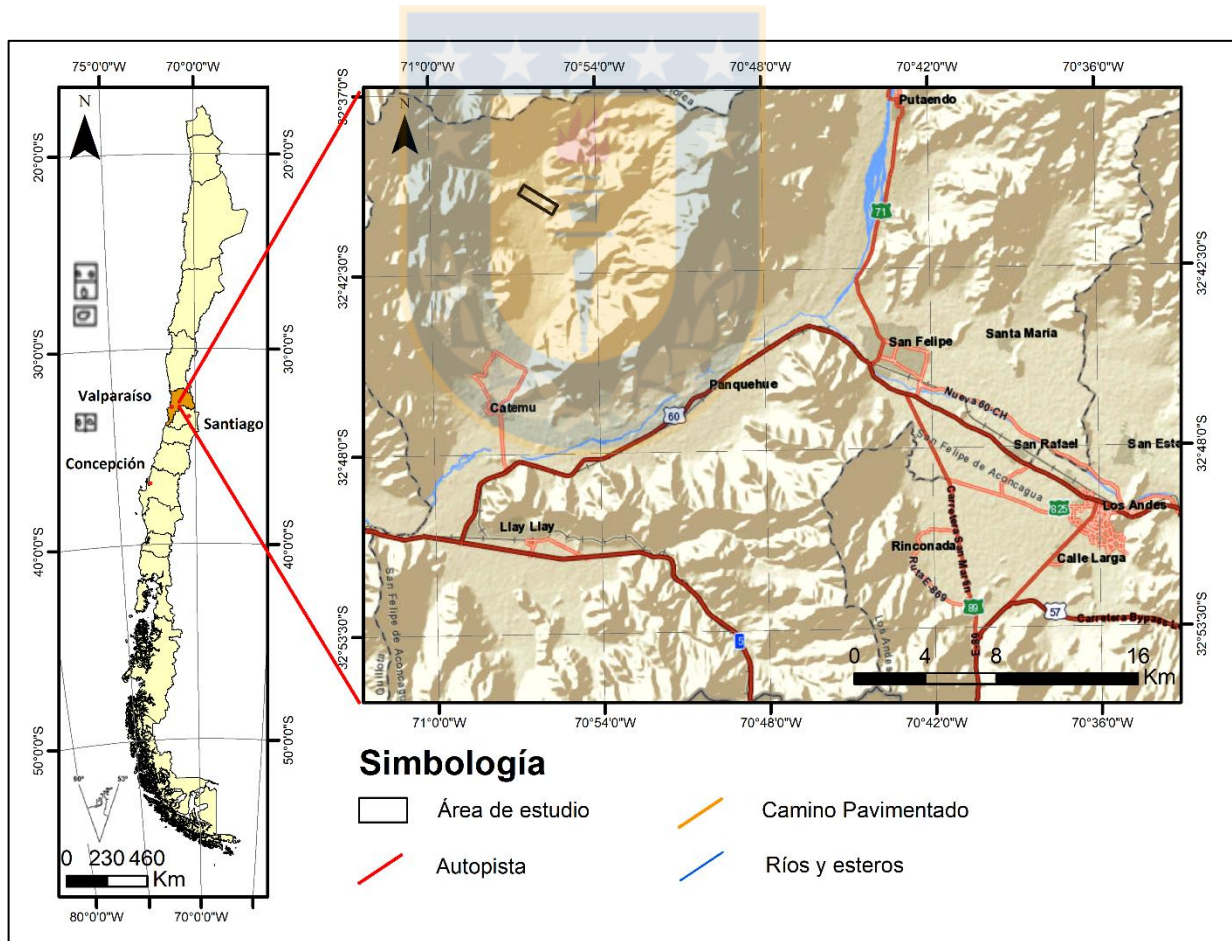


Figura 1.1. Mapa de ubicación del área de estudio. Mapa de ubicación y accesos con sus principales localidades.

Para acceder a la zona, viajando desde Santiago, se debe efectuar por la ruta 5 Norte hasta el enlace Las Vegas (Autopista del Aconcagua y Los Andes), continuar por la ruta 60 hasta llegar a la localidad de Chagres, posteriormente, a través de un camino pavimentado de una sola vía continuar en dirección a la comuna de Catemu. Por el camino principal de la comuna, seguir avanzando en dirección norte, pasando por la localidad de Nilhue, luego por la localidad de Cerrillos y finalmente avanzar 3 km por un camino de ripio hasta llegar a la confluencia de los esteros Gómez y El Sauce.

1.4. METODOLOGÍA

1.4.1. Gabinete I

Para la confección del presente trabajo, y con el fin de preparar las salidas a terreno durante los meses de enero y febrero del año 2017, se recopiló la información geológica y geográfica existente, de tal manera de estudiar los accesos al área de estudio, detectar puntos de interés de mapeo geológico, planificar la logística que implica la campaña de sondajes y optimizar los días de trabajo de campo. También se efectuó la interpretación imágenes satelitales obtenidas de Sasplanet, para determinar las principales direcciones de lineamientos en la zona de influencia del proyecto. Además, mediante la interpretación de la imagen ASTER, se detectaron puntos a monitorear en terreno para reconocer o descartar la presencia de fallas regionales en la zona.

1.4.2. Trabajo de Terreno

Se ejecutan las salidas a terreno durante los meses de enero y febrero del año 2017, en una camioneta Mazda año 2013 propiedad de MN Ingenieros. Durante esta etapa, se hizo un mapeo de detalle en el sitio de presa y área de inundación con escala 1:2.000, junto con planos de perfiles geológico-geotécnicos del eje del muro, eje del túnel de desvío y eje de evacuador de crecidas escala 1:2.000 (Mapa Geología de la Zona de Presa).

Se supervisó la campaña de sondajes, con recuperación de testigos, donde se describen en total 1942,8 metros distribuidos en 22 sondajes de diámetro HQ3 (61,1 mm, diámetro interior de la corona). Se ejecutan en terreno ensayos de penetración estándar (SPT) y ensayos de permeabilidad de rocas en las perforaciones (Lefranc-Mandel y Lugeon), además de la descripción geológica y geotécnica de las rocas según la evaluación de sus parámetros Rock Quality Designation o RQD (Deere, 1988) y Rock Mass Rating o RMR (Bieniawski, 1989), que son compilados y descritos en sus respectivos *log* geotécnicos.

La campaña de perforación se realizó con 3 equipos con recuperación de testigos:

- Equipo N°1:

- 01 Sonda Boart Longyear 38, montada sobre camión.
- 01 Bomba de Lodo FMC 535.
- 01 equipo completo para ensayos Lefranc - Mandel.
- 01 equipo completo para ensayos Lugeon (incluye bomba centrífuga).
- 01 Packer de 3 metros de 1" de diámetro.
- 01 Barril con doble tubo HQ3.
- 180 metros de barras HQR.
- 50 metros de barras HWT.

- Equipo N°2:

- 01 Sonda Boart Longyear 55, montada sobre camión.
- 01 Bomba de Lodo FMC 535.
- 01 equipo completo para ensayos Lefranc - Mandel.
- 01 equipo completo para ensayos Lugeon (incluye bomba centrífuga).
- 01 Packer de 3 metros de 1" de diámetro.
- 01 Barril con doble tubo HQ3.
- 180 metros de barras HQR.
- 50 metros de barras HWT.

- Equipo N°3:

- 01 Sonda Boart Longyear 38, montada sobre patines (Figura 1.2).
- 01 Bomba de Lodo FMC 535.
- 01 equipo completo para ensayos Lefranc - Mandel.

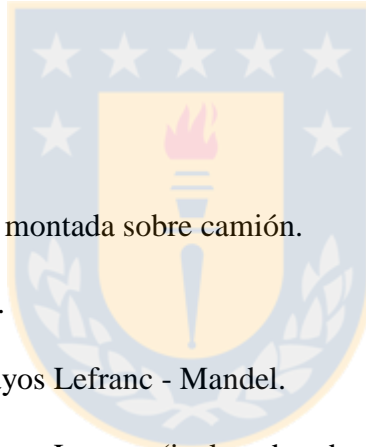




Figura 1.2. Equipo de perforación. Equipo de perforación marca Boart Longyear 38.

- 01 equipo completo para ensayos Lugeon (incluye bomba centrífuga).
- 01 Packer de 3 metros de 1" de diámetro.
- 01 Barril con doble tubo HQ3.
- 120 metros de barras HQR.
- 50 metros de barras HWT.

1.4.3. Gabinete II

En esta etapa se efectúa el procesamiento y análisis de datos obtenidos en la campaña de terreno. Las fotografías de los testigos de roca recuperados son editadas con el software GIMP 2 y compiladas en Microsoft PowerPoint 2013, las descripciones geológicas y geotécnicas junto con los ensayos realizados en terreno, son traspasadas a Microsoft Excel 2010 y posteriormente dibujadas en AutoCAD 2014.

Para la digitalización del mapa se utilizó el software ArcGis 10.4, mientras que para los perfiles geológicos de la presa y las obras anexas se utiliza el software AutoCAD 2014. Finalmente, el

informe se desarrolló en Microsoft Word 2013.

1.5. AGRADECIMIENTOS

Esta Memoria de Título fue realizada gracias al apoyo del Gerente General de GMECH Matías Oyarzo, quien me dio la oportunidad de efectuar mi práctica profesional en su empresa, entregándome sus conocimientos en geología y geotecnia, gracias por confiar en mí y hacerme parte de este proyecto. Igualmente agradecer a Camila Santana, Geóloga de GMECH, por su buena disposición y asistencia ante mis dudas. A MN Ingenieros por dar autorización para realizar este proyecto.

Agradecer a mis profesores y a todo el personal del Departamento de Ciencias De La Tierra, por sus conocimientos, enseñanzas y experiencias transmitidas durante estos 6 años de estudio. Mi aprecio sincero al profesor patrocinante de esta Memoria, Msc. Abraham González, gracias por su disposición a ser parte de este trabajo y a la motivación entregada para realizarlo. Grandes personas y amigos, mi equipo de trabajo la banda G4, fueron parte de este proceso con las largas y agotadoras noches de estudio.

A mi querida y hermosa familia, mis hermanos, Javier, Pablo, Contanza y sobrinos, gracias por confiar en mí. En especial mi eterna gratitud a mis padres, Luis y Mirian, por su amor, cariño y apoyo incondicional durante todos estos años. Un agradecimiento especial a Javiera por darme su fortaleza y enseñarme a que siempre se puede ser mejor.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. GENERALIDADES

Para el análisis y descripción geotécnica de los 22 sondajes realizados en la zona del embalse, se utilizaron los parámetros de clasificación geotécnica RQD y RMR junto con la ejecución de ensayos de permeabilidad Lefranc, Lugeon y Ensayos de Penetración Estándar (SPT), con el fin de determinar las características geomecánicas y las permeabilidades del suelo y el macizo rocoso en profundidad.

2.2. SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA

2.2.1. Rock Quality Designation (RQD)

Este método fue desarrollado por Deere en 1967 para estimar cuantitativamente la calidad del macizo rocoso, a través del análisis de testigos de sondaje recuperados en las perforaciones.

Se define entonces como el porcentaje de la sumatoria de todos los tramos de testigo que superan los 10 cm de largo (sobre el eje central de la roca), dividido por la longitud total que se está perforando (Figura 2.1). El diámetro mínimo de las perforaciones debe ser 48 mm y se utilizan solo trozos de testigo de material fresco, excluyéndose los que presentan un grado de alteración importante, para los que se considera un $RQD = 0\%$ (González de Vallejos y otros (2002).

El cálculo del RQD se obtiene, a partir de medidas de terreno mientras se realizan las perforaciones durante la campaña de sondajes, de esta manera se evita que se generen fracturas inducidas manualmente mientras son manipuladas y transportadas a los lugares destinados para el almacenaje de las muestras.

González de Vallejos y otros (2002), clasifica el macizo rocoso en diferentes grados de calidad de la roca, dependiendo de la medida y obtención del parámetro RQD (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Clasificación de RQD. Clasificación de la calidad del macizo rocoso según el índice RQD (González de Vallejo y otros, 2002).

RQD %	Calidad
< 25	Muy mala
25 – 50	Mala
50 – 75	Media
75 – 90	Buena
90 – 100	Muy buena

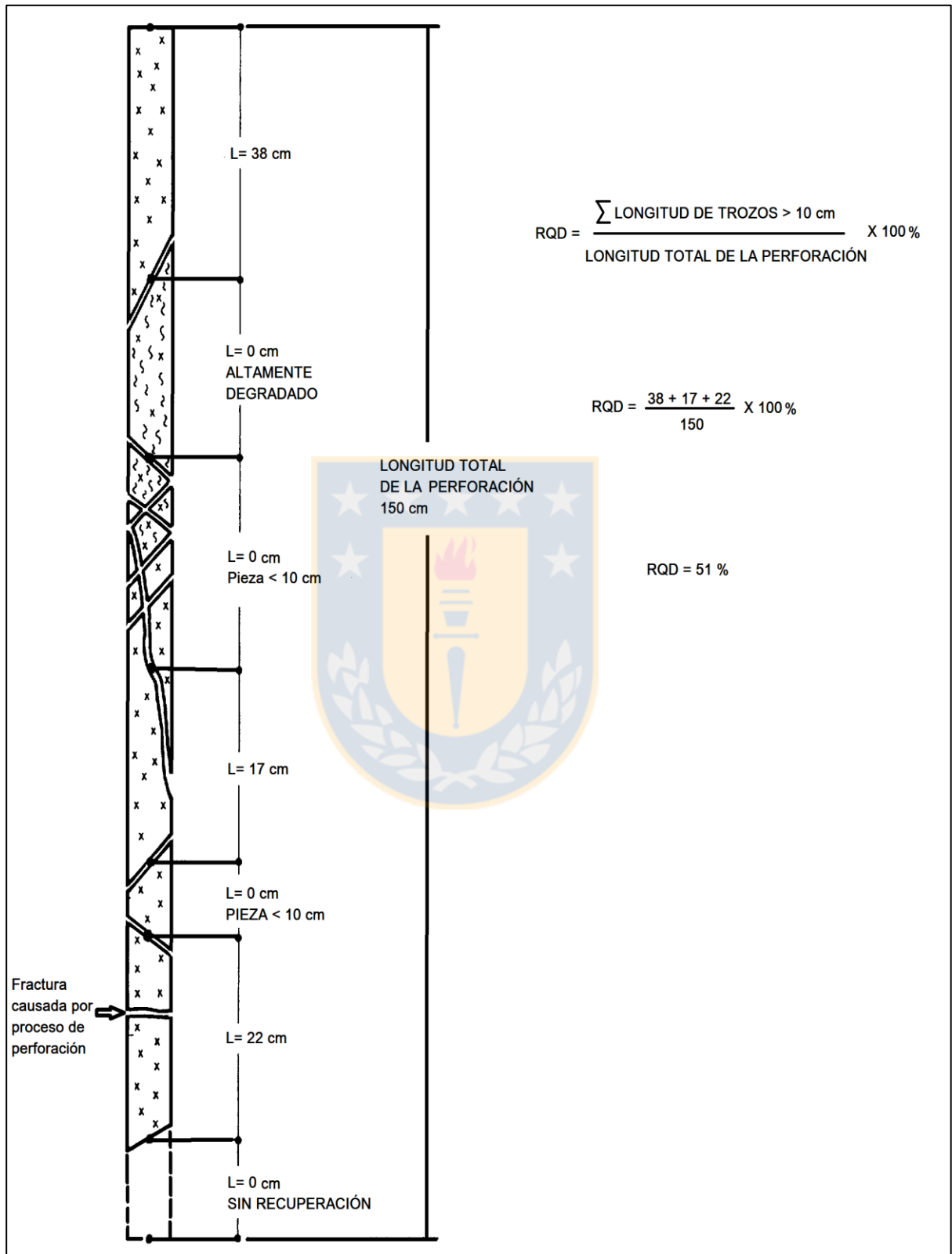


Figura 2.1. Cálculo de RQD. Procedimiento para medir y calcular RQD. Modificado de Deere (1989)

2.2.2. Rock Mass Rating (RMR)

Sistema de clasificación para determinar la calidad del macizo rocoso, desarrollado por Bieniawski (1976), se divide la roca en dominios estructurales, es decir, en zonas delimitadas por discontinuidades geológicas dentro de las cuales la estructura es prácticamente homogénea. La estructura del macizo comprende el conjunto de fallas, diaclasas, pliegues y demás características geológicas propias de una determinada región. El parámetro que define la clasificación es el denominado índice RMR (*Rock Mass Rating*), que evalúa la calidad del macizo rocoso a partir de cinco parámetros siguientes:

- Resistencia de la roca intacta (Tabla 2.2.)
- “Rock Quality Designation” o R.Q.D. (Tabla 2.3.)
- Espaciado de las discontinuidades (Tabla 2.4.)
- Condición de las discontinuidades (Tabla 2.5.)
- Condiciones hidrológicas (Tabla 2.6.).

Tabla 2.2. Puntaje de resistencia. Puntajes RMR para resistencia a la compresión simple estimadas de las rocas.

Resistencia (Mpa)	Puntaje RMR	Resistencia
< 1	0	Muy Baja
1 a 5	1	
5 a 25	2	
25 a 50	4	Baja
50 a 100	7	Moderada
100 a 250	12	Alta
> 250	15	Muy Alta

Tabla 2.3. Puntaje de RQD. Puntajes RMR para calidades de macizos rocosos asociadas al RQD.

Calidad del macizo rocoso asociada al RQD	% RQD	Puntaje RMR
Muy Mala	< 25	3
Mala	25 a 50	8
Regular	50 a 75	13
Buena	75 a 90	17
Excelente	90 a 100	20

Tabla 2.4. Puntaje de espaciamento. Puntajes RMR para espaciamentos de las estructuras “S”.

Descripción del espaciamento	S (mm)	Puntaje RMR
Muy junto o extremadamente junto	< 60	5
Junto	60 a 200	8
Moderado	200 a 600	10
Separado	600 a 2.000	15
Muy separado	> 2.000	20

Tabla 2.5. Puntaje de condición de estructuras. Puntajes RMR para condición de estructuras “Jc”.

Condición de las estructuras (Jc)	Puntaje RMR
Estructuras continuas, abiertas (>5 mm) o con rellenos blandos de salbanda arcillosa (>5 mm)	0
Estructuras continuas, pulidas o abiertas (1 a 5 mm) o con rellenos blandos de salbanda arcillosa (1 a 5 mm)	10
Estructuras algo rugosas, roca de caja muy alterada, estructuras abiertas (<1 mm) o con rellenos (<1 mm)	20
Estructuras algo rugosas, roca de caja algo alterada, estructuras abiertas (<1 mm) o con rellenos (<1 mm)	25
Estructuras muy rugosas, discontinuas, roca de caja fresca o sana, estructuras cerradas o selladas	30

Tabla 2.6. Puntaje de condición de agua. Puntaje RMR para la condición de agua “Wc”.

Condición de aguas (Wc)	Puntaje RMR
Completamente Seca	15
Húmeda	10
Mojada	7
Goteos	4
Infiltraciones de Agua	0

2.3. ENSAYOS

2.3.1. Ensayo de Penetración Estándar (SPT)

Ensayo *in situ* que se ejecuta al interior de los pozos de perforación durante la campaña de sondajes. Se puede conocer la resistencia a la penetración o valor N, el cual es correlacionable con otros parámetros geotécnicos como la densidad relativa, ángulo de rozamiento, carga admisible y los asentamientos en suelos granulares. Además de obtener una muestra alterada, para realizar ensayos de identificación en laboratorio (González de Vallejos y otros (2002)).

El procedimiento se efectúa limpiando las paredes y el fondo de la perforación, instalando allí el toma muestras. Este debe ser hincado en el fondo del terreno una profundidad de 60 cm contando el número de golpes necesarios para hincar tramos de 15 cm. Finalmente, la suma de golpes de los tramos centrales de 15 cm en el valor N o resistencia a la penetración estándar. Cuando se excede 100 golpes para avanzar una profundidad de 15 cm el resultado del ensayo se considera rechazo.

2.3.2. Ensayo de Compresión Simple o Uniaxial

En las rocas, a diferencia de los hormigones, las propiedades mecánicas no son uniformes para todo el macizo rocoso, por lo tanto, en los resultados de los ensayos de laboratorio se deben considerar condiciones heterogéneas y anisótropas de la roca.

La finalidad de este tipo de ensayo, es establecer una relación entre los esfuerzos y las deformaciones durante el proceso de carga y rotura. De esta forma se obtienen gráficamente curvas de esfuerzo-deformación (Figura 2.2), fundamentales para el estudio de las propiedades de las rocas.

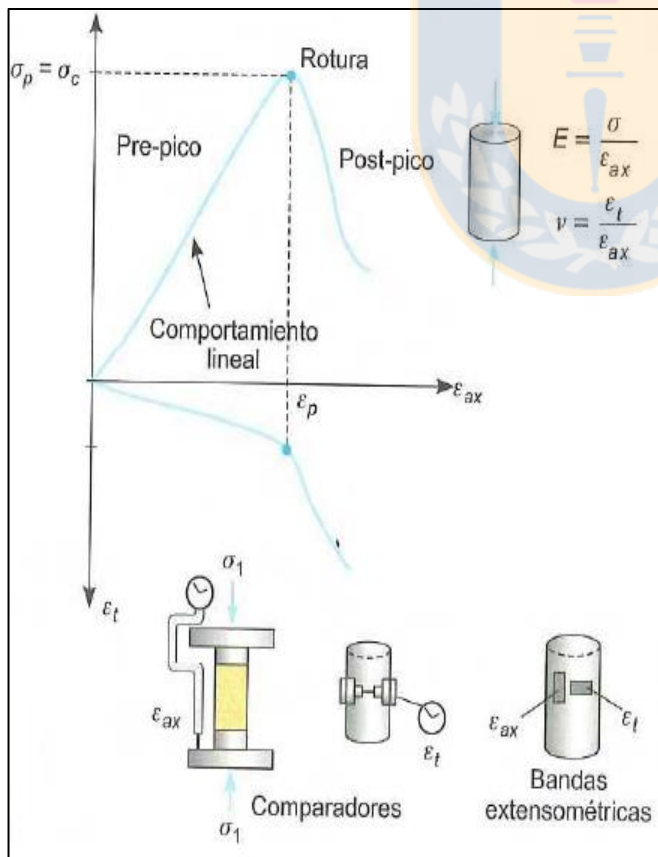


Figura 2.2. Curva de esfuerzo-deformación. (González de Vallejo y otros (2002)).

El ensayo de compresión simple o uniaxial, aplicado a testigos de sondajes, consiste en determinar la resistencia no confinada de la roca y sus constantes elásticas: Modulo de Young y Coeficiente de Poisson.

El procedimiento se realiza en un cilindro o testigo de roca al cual se le aplica fuerza axial hasta que se produce la rotura. Las deformaciones axiales que se van produciendo en la probeta se miden mediante comparadores o bandas extensiométricas. Finalmente, se obtienen las curvas esfuerzo-deformación, las que presentan una curva ascendente hasta alcanzar la resistencia máxima y una curva descendente que refleja la pérdida de resistencia (González de Vallejo y otros (2002)).

2.3.3. Ensayo de Permeabilidad Lefranc

En González de Vallejo y otros (2002) el ensayo de Lefranc se utiliza para medir el coeficiente de permeabilidad en suelos permeables o semipermeables, de tipo granular, situados por debajo del nivel freático, y en rocas muy fracturadas. El ensayo se efectúa en el interior de sondajes y puede realizarse durante la ejecución de la perforación o una vez finalizada ésta.

El procedimiento consiste en rellenar de agua el pozo y medir el caudal necesario para mantener el nivel constante (régimen permanente) o bien medir la velocidad de descenso del nivel de agua (régimen variable). La medida del caudal de admisión debe realizarse cada 5 minutos, manteniendo el nivel constante en la boca del pozo durante 45 minutos. Si la admisión es muy alta, debe medirse cada minuto durante los primeros 20 minutos, y después cada 5 minutos hasta llegar a los 45 minutos.

La realización del ensayo requiere que, antes de medir tiempos y caudales, se llene el sondeo de agua, observando que el aire es expulsado y que se estabiliza el nivel y la velocidad de descenso, lo que indica que se ha alcanzado el régimen permanente (Figura 2.3).

Los factores a considerar para la obtención del coeficiente de permeabilidad (k), están definidos por la siguiente expresión:

$$k = \frac{d_e^2 \ln(2L/d)}{8Lt} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

k : conductividad hidráulica,

h_1 y h_2 : altura del agua al principio y al final del ensayo,

- t : tiempo transcurrido entre la observación de los niveles h_1 y h_2 ,
 L : longitud de la zona filtrante,
 d : diámetro de la zona filtrante,
 d_e : diámetro de la entubación (igual a $2r$)

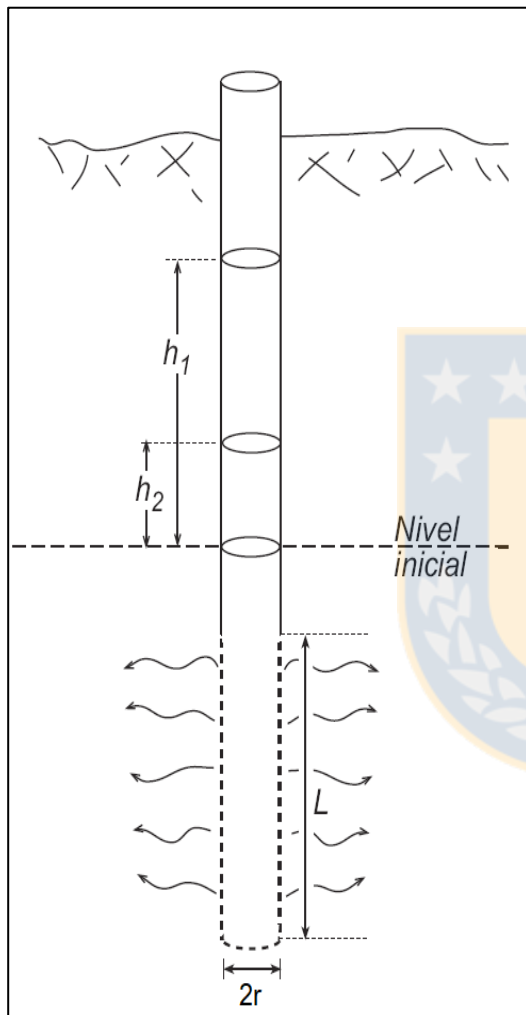


Figura 2.3. Ensayo Lefranc a nivel variable. Modificado de Sánchez (2011).

Para suelos y rocas de baja calidad geotécnica, se califica el grado de permeabilidad de suelos permeables o semipermeables según su conductividad hidráulica, mediante la clasificación de Whitlow (1994) (Tabla 2.7).

2.3.4. Ensayo de Permeabilidad Lugeon

Es el ensayo más usado para determinar la permeabilidad de un macizo rocoso en profundidad,

este se realiza al interior de un pozo de sondaje, el cual permite calcular semicuantitativamente la permeabilidad de los macizos rocosos en cualquier tipo de roca y estado de fracturación que se encuentre.

Tabla 2.7. Grado de permeabilidad. Clasificación del grado de permeabilidad (Whitlow, 1994).

Grado de permeabilidad	<i>k</i> (cm/seg)		
	Elevada		$k >$
Media	$10^{-1} <$	$k <$	10^{-3}
Baja	$10^{-3} <$	$k <$	10^{-5}
Muy baja	$10^{-5} <$	$k <$	10^{-7}
Prácticamente impermeable		$k <$	10^{-7}

Consiste en introducir agua a presión constante (10 kp/cm^2) en el pozo de sondaje, midiendo las admisiones durante un período de 10 minutos. Normalmente, se ensayan tramos de 5 m de sondaje, aislando el tramo de ensayo del resto del sondaje mediante dos obturadores o packer doble. Si el ensayo se realiza en el fondo del sondaje (últimos 5 m) sólo es necesario el empleo de un obturador o packer simple (Figura 2.4), correspondiendo en este caso al ensayo tal y como lo definió M. Lugeon en 1933 (González de Vallejo y otros (2002)).

La presión se aplica en escalones sucesivos de carga y descarga de 0, 1, 2, 5 y 10 kp/cm^2 respectivamente, manteniendo la presión en cada escalón durante 10 minutos. Siempre deben alcanzarse los 10 kp/cm^2 , excepto en rocas blandas en las que se puede producir fracturación hidráulica antes de llegar a dicha presión. Los valores de permeabilidad obtenidos a 5 y 10 kp/cm^2 no pueden extrapolarse linealmente para presiones mayores.

La unidad de medida del ensayo es el *lugeon*, que corresponde a una absorción de un caudal de agua de 1 litro por minuto, por cada metro de perforación, realizando el ensayo a una presión de 10 atmósferas durante 10 minutos. Una unidad lugeon equivale a un coeficiente de permeabilidad de 10^{-5} cm/s (Unidad Lugeon = $1 \text{ l/m} \cdot \text{min} = 10^{-5} \text{ cm/s}$).

Los resultados de este tipo de ensayo se presentan según una clasificación de permeabilidad a diferentes valores Lugeon obtenidos, además de las condiciones de las discontinuidades del macizo rocoso (Tabla 2.8)

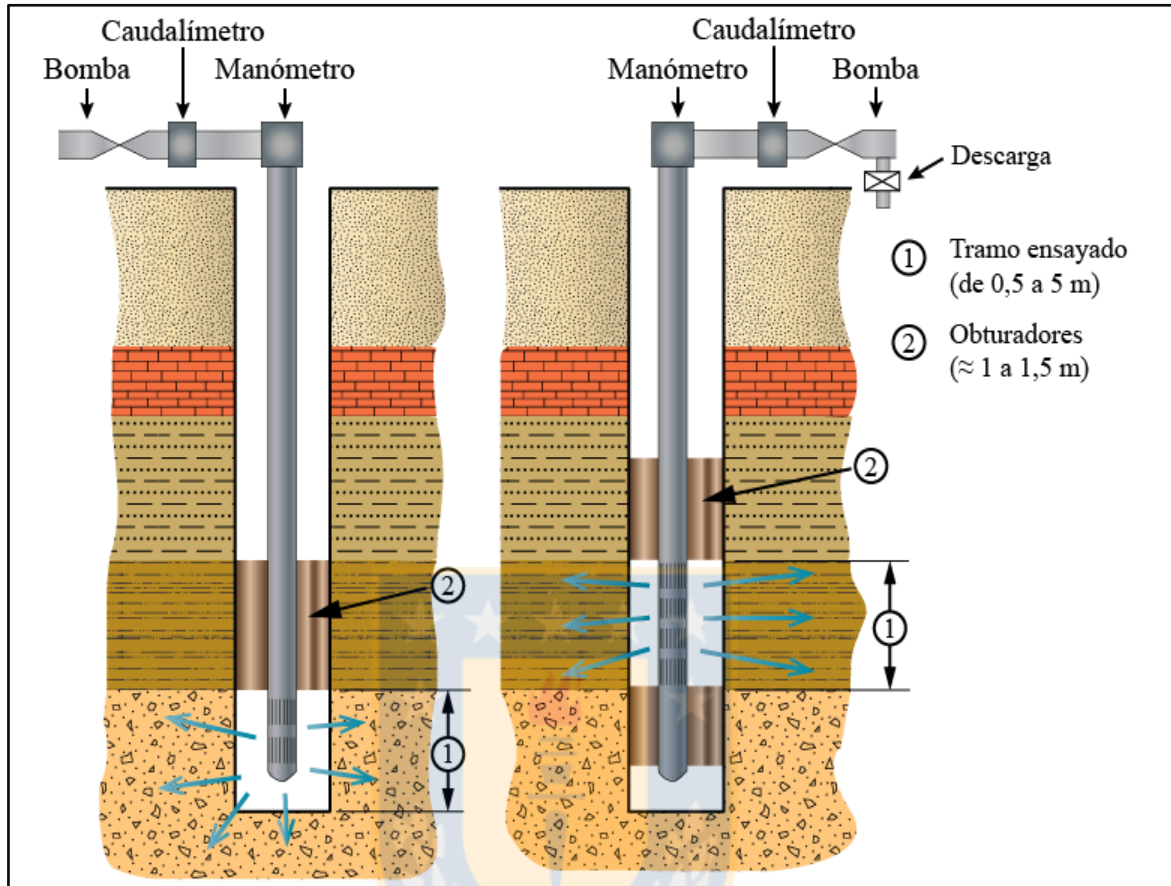


Figura 2.4. Ensayo de permeabilidad tipo Lugeon. Ensayo con obturador simple (Izquierda) y ensayo con obturador doble (Derecha). Tomado de Riquelme, 2015.

Tabla 2.8. Clasificación Lugeon. Clasificación de permeabilidad del macizo rocoso asociado a diferentes valores Lugeon (Modificado de Quiñones, 2010).

Clasificación	Rango de Lugeon	Rango de conductividad hidráulica (cm/s)	Condición de discontinuidades del macizo rocoso	Precisión de reporte (Lugeons)
Muy baja	< 1	$< 1 \times 10^{-5}$	Muy apretadas	< 1
Baja	1 – 5	$1 \times 10^{-5} - 6 \times 10^{-5}$	Apretadas	± 0
Moderada	5 – 15	$6 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-4}$	Pocas parcialmente abiertas	± 1
Mediana	15 – 50	$2 \times 10^{-4} - 6 \times 10^{-4}$	Algunas abiertas	± 5
Alta	50 – 100	$6 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-3}$	Muchas abiertas	± 10
Muy alta	> 100	$> 1 \times 10^{-3}$	Aperturas muy juntas o vacíos	> 100

3. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

3.1. GENERALIDADES

El valle del Río Aconcagua se caracteriza por presentar recursos de suelo y clima idóneos para el desarrollo rentable de la actividad agrícola y ganadera, en particular para la producción de fruta de exportación y consumo interno del país. Sin embargo, dichos recursos no son eficientemente aprovechados, por la incertidumbre en la disponibilidad de agua para riego debido a la insuficiente regulación del Río Aconcagua.

Tras evaluar distintas alternativas de emplazamiento de embalses, en base a criterios técnicos y agroeconómicos, se concluyó que el desarrollo agropecuario del valle del Aconcagua se vería posibilitado mediante la construcción de dos embalses de regulación: uno en la zona alta del valle y otro en la zona baja, denominado este último Embalse Catemu y del cual se realizó el estudio geológico y geotécnico.

3.2. EMBALSE CATEMU

El embalse Catemu, con capacidad útil de 175 hm³, permitiría el riego de una superficie de 52.927 ha y su costo asciende a 62.300 MM\$ (diciembre de 1997). Estaría ubicado en la cabecera del estero Catemu, a 1 Km aguas abajo de la confluencia de los esteros Gómez y El Sauce.

Este embalse será alimentado desde el río Aconcagua mediante un canal de 20m³/s de capacidad, con una longitud de 25,7 km (incluido túnel de 7,8 km), que captará las aguas en la segunda Sección del río, desde una bocatoma ubicada inmediatamente aguas abajo de la confluencia del Estero Seco con el Río Aconcagua.

Una descripción del proyecto de presa y sus obras anexas, se presenta a continuación.

3.2.1. Muro Presa

En la zona de presa, el valle presenta un ancho aproximado de 1.200 m y rellenos aluviales con una potencia de 164,00 m, seleccionándose una presa tipo CFGD como alternativa más adecuada para este sitio gracias a las buenas condiciones de fundación y amplia disponibilidad de rellenos para la construcción del embalse.

La impermeabilización del subsuelo se logrará mediante la construcción de una pared moldeada de

58 m de altura. Se controlarán además las filtraciones en la roca basal mediante una cortina trilineal de inyecciones.

La cota de coronamiento de la presa se fijó en 560,0 m s.n.m (presa de altura 65 m), embalsando un volumen total de 180 hm³, de los cuales 5 hm³ corresponden a volumen muerto (para vida útil de 50 años del embalse).

El ancho de coronamiento será de 8 m, correspondiendo al 11% de la altura máxima del muro. Se contempla la construcción de un muro parapeto de hormigón en dicho coronamiento.

Las dimensiones generales y forma del muro presa se pueden apreciar en la figura 3.1. El volumen total de los rellenos requeridos para su materialización corresponde a 10 millones de metros cúbicos. Además, la construcción de la presa y sus obras anexas requerirá de un volumen aproximado de 110.000 m³ de hormigón.

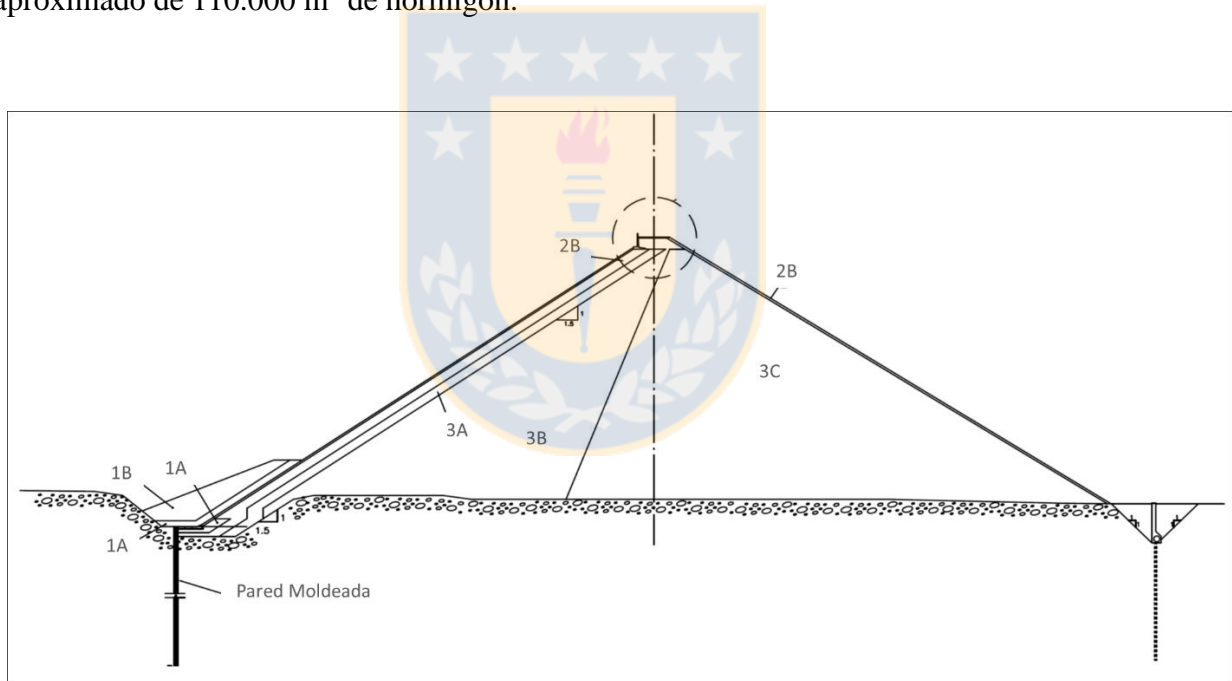


Figura 3.1. Sección Embalse Catemu. Sección transversal del muro presa del embalse Catemu (Edic, 2001).

De acuerdo al estudio y el diseño de la presa se emplearán 7 distintos tipos de rellenos diferentes, que serían:

- Rellenos 1A y 1B: se disponen en el pie de aguas arriba de la presa sobre el plinto y la pantalla de hormigón, en la zona de aguas muertas del embalse.

- Rellenos 2A y 2B: corresponden a los rellenos que se disponen sobre la losa de hormigón y parte del plinto del muro de presa.
- Rellenos 3A: materiales de transición entre los rellenos tipo 2B y 3C.
- Rellenos 3B y 3C: se disponen aguas abajo del relleno 3A, ocupando gran parte del cuerpo de la presa (90%).

3.2.2. Obras Anexas

El proyecto Embalse Catemu contempla dentro de sus obras la construcción del túnel de desvío y evacuador de crecidas, junto con obras de menor envergadura como son la entrega a riego y el desagüe de fondo.

3.2.2.1. Túnel de Desvío

La amplitud del valle en la zona de presa permite construir gran parte del muro sin necesidad de desviar las aguas del estero. A su vez, permite disponer de un túnel de menores dimensiones, con capacidad suficiente para desviar las aguas en el último tramo de construcción de la presa. El túnel será excavado en roca y dispuesto en el margen izquierdo del valle.

Para su diseño se considera un caudal de $65 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondiente a un periodo de retorno de 10 años.

3.2.2.2. Evacuador de Crecidas

El evacuador de crecidas se ubica en la ladera izquierda del valle y está compuesto por: vertedero lateral, canal colector, canal de conexión, rápido de descarga, dissipador de energía y canalón de entrega al estero Catemu.

El vertedero lateral posee una longitud de 20 m y su diseño considera un perfil tipo Creager.

3.2.2.3. Entrega a Riego

La entrega a riego considera un caudal de $30 \text{ m}^3/\text{s}$ y se realiza mediante una válvula mariposa de diámetro 2,0 m ubicada en la caverna y dos válvulas Howell-Bunger de diámetro 1,0 m ubicadas a la salida del túnel de desvío.

3.2.2.4. Desagüe de Fondo

El desagüe de fondo consiste en una conducción blindada rectangular de 1,0 m de ancho por 1,2 m

de altura. Se ubica en la misma caverna de válvulas que la entrega a riego. Se contempla además instalar dos compuertas gemelas, una de servicio y una de guardia.

El canal del desagüe de fondo es de 41 m³/s con el embalse a la cota máxima y la compuerta completamente abierta.

3.3. ZONAS DE EMPRÉSTITO

Estudios de factibilidad previos, determinaron que se requieren aproximadamente 10 millones de metros cúbicos de rellenos para la construcción del muro presa del Embalse Catemu. También se requieren de aproximadamente 110.000 m³ de material como agregados para hormigones, que serán usados en la construcción de obras como: pared moldeada, pantalla de hormigón y obras anexas.

Evitando utilizar rellenos de zonas aprovechables para otros usos y de propiedad privada, se determinó que el sector más conveniente, desde el punto de vista geológico, económico y medio ambiental, corresponde a la zona de inundación del embalse.

El empréstito se extiende por la llanura aluvial, desde el pie de aguas arriba de la presa hasta la cota 510 m s.n.m. por el estero El Sauce y hasta el nivel 560 m s.n.m. por el estero Gómez, cubriendo una superficie aproximada de 310 ha, siendo limitado en su perímetro por los cerros que conforman el valle.

Según la exploración de 20 calicatas de 6 m de profundidad cada una, los depósitos aluviales están formados mayoritariamente por gravas gruesas y bolones de cantos subredondeados y subangulares, resistentes, densas y sanas. De acuerdo a la proporción de finos que presenta el depósito (mayor o igual al 30%), permitió dividir el yacimiento en 2 zonas (Figura 3.2).

La Zona 1 corresponde a una superficie de 255 ha, compuesta por gran porcentaje de grava gruesa con bolones, porcentaje medio de arena y porcentaje de finos limo-arcillosos de 2 a 10%, presenta materiales aptos como rellenos permeables, siendo también fuente para obtención de agregados para hormigón.

Para el caso de los rellenos masivos de la presa CFGD, los suelos de la Zona 1 pueden ocuparse sin tratamiento previo, dando origen a suelos poco compresibles y de alta resistencia al corte.

La Zona 2 con materiales de mayor contenido de finos, cubre una superficie de 55 ha. Se presentan

mayoritariamente gravas arcillosas con algunos bolones y abundante arena. Los finos son de baja plasticidad y están en proporción de 8% a 47%. Las características de estos materiales permiten que sean aptos como rellenos impermeables.

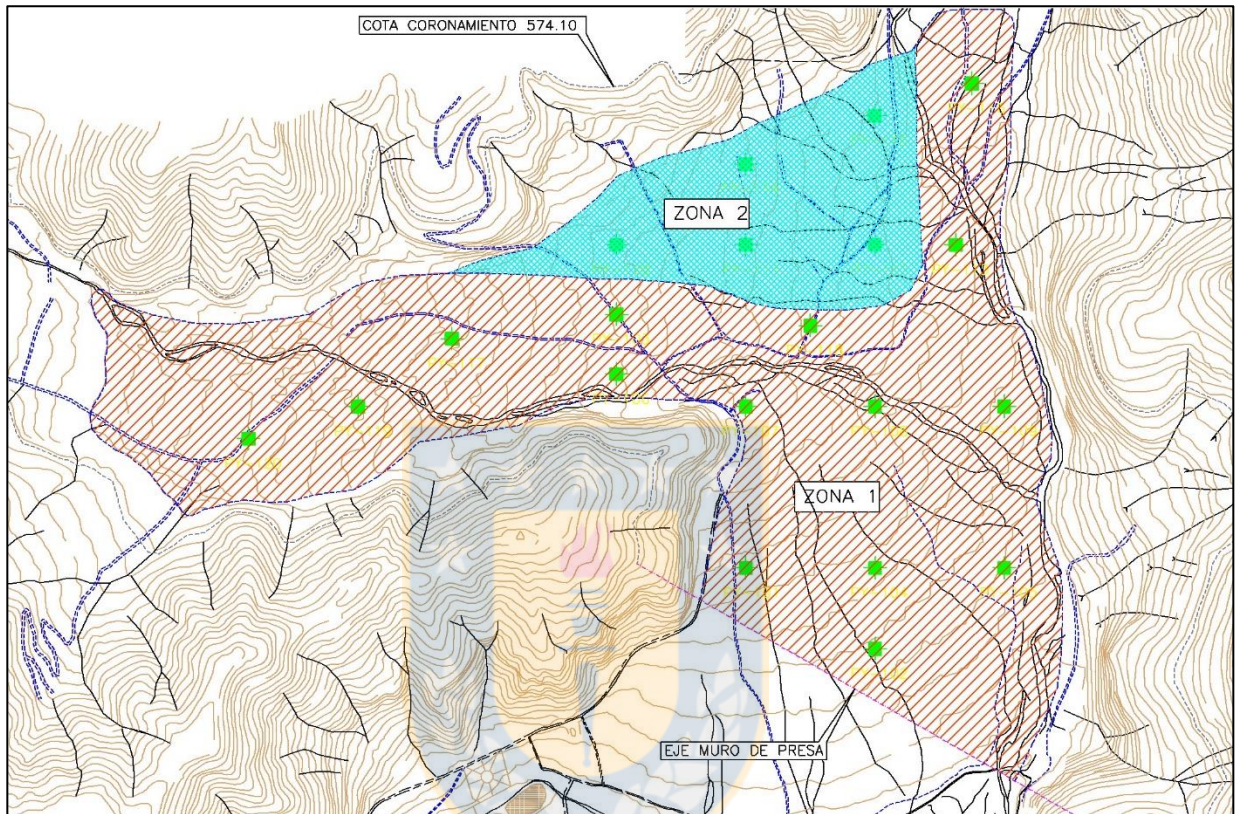


Figura 3.2. Zonas de empréstito. Zonas de disponibilidad de rellenos (Edic, 2001).

En ambas zonas en la superficie se presenta una capa vegetal o suelos mezclados con materia orgánica de espesor hasta 30 cm.

Se concluye que de la Zona 2 podría obtenerse un volumen de suelos de $2.500.000 \text{ m}^3$ para rellenos impermeables. Por otra parte, considerando los 6 m de profundidad de las calicatas, para la Zona 1 de superficie 255 ha, podría obtenerse un volumen $15.300.000 \text{ m}^3$ de material para rellenos. Si se considera los 10 m de espesor del aluvial (según observaciones en zona de presa), en la Zona 1 podría obtenerse un volumen de 25 Hm^3 , lo que garantizaría una cantidad 2,5 veces mayor al volumen teórico requerido.

4. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

4.1. GEOLOGÍA REGIONAL

La geología regional que se describe, se ubica entre las coordenadas UTM 19H 309.094 m E; 6.389.139 m S y 346.335 m E; 6.359.877 m S (Figura 4.1) circunscrita en la Hoja Geológica de Quillota y Portillo, la cual se encuentra situada en la Región de Valparaíso.

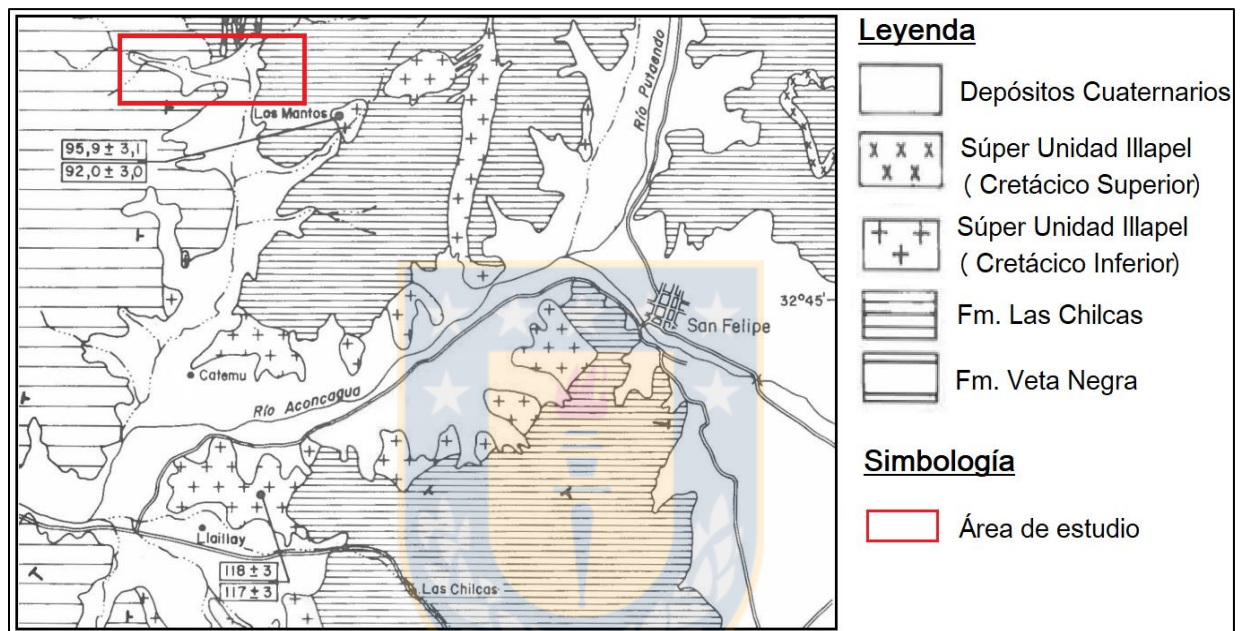


Figura 4.1. Mapa geológico del área de estudio. Unidades litológicas del área de estudio (Modificado de Thomas, 1958).

El sitio donde se ubicará el Embalse Catemu, se compone principalmente de estratos volcano-sedimentarios con intrusiones menores de edad cretácica y sedimentos recientes de origen aluvial que rellenan los valles del Río Aconcagua y el Estero Catemu. En conjunto las formaciones veta negra y las chilcas se disponen con orientación N y manteo hacia el este. Localmente se encuentran intruidas por rocas de la Súper Unidad Illapel de edad Cretácico Superior.

4.1.1. Rocas Estratificadas

4.1.1.1. Formación Veta Negra

Unidad volcánica que consiste en una gruesa capa de flujos básicos a intermedios, con intercalaciones sedimentarias subordinadas, emplazados en un ambiente continental, parcialmente

cubiertas por escombros de falda y/o suelos residuales de espesor en general menor a 1 m.

La Formación Veta Negra fue definida por Thomas (1958) aflorando en la región centro-oeste del área de estudio. Se divide en dos miembros: Miembro Purehue (inferior) conformado por rocas volcánicas y sedimentarias de color rojo, y el Miembro Ocoa (superior) formado casi completamente por andesitas de tipo ocoítas, con menores intercalaciones de tobas y areniscas.

Esta unidad sobreyace concordante a la Formación Lo Prado e infrayace de la misma manera a la Formación Las Chilcas con contacto gradual y transicional, extendiéndose en una franja norte sur a todo lo largo de la Hoja Quillota, poniéndose en contacto por intrusión con granitoides de la Súper Unidad Illapel.

El Miembro Purehue, se conforma por brechas, tobas y lavas andesíticas de color verde oscuro a marrón, mientras que en la parte superior estas rocas son intercaladas por capas potentes de areniscas rojas conglomerádicas. Su potencia en el extremo norte por la Cuesta La Dormida es de 1000 m y en su límite sur en Cabildo de 400 m, sin embargo, en la zona central, al norte del Valle del Aconcagua su potencia máxima varía entre los 2400 y 2600 m.

El Miembro Ocoa consiste en un conjunto muy uniforme de mantos efusivos de una andesita, caracterizada por la existencia de fenocristales de feldespato bastante concentrados y que aparecen en forma de astillas grandes. Este conjunto alcanza, en promedio, una potencia de 4.000 m y contiene muy pocas intercalaciones de otras rocas (Thomas, 1958).

Las edades radiométricas realizadas en plagioclasas de ocoítas han datado el volcanismo entre 105 Ma (Vergara y Drake, 1979) y 119 Ma (Aguirre, 1999), correspondientes al Albiano y Aptiano (Cretácico Inferior).

El ambiente que predominó durante la depositación era volcánico, esencialmente subaéreo, en donde las escasas intercalaciones sedimentarias y lutitas negras en la parte basal, sugieren una débil influencia marina, la cual habría desaparecido producto del colmatamiento a consecuencia del relleno de la cuenca marginal abortada por las volcanitas y todos sus derivados detríticos (Rivano, 1996).

4.1.1.2. Formación Las Chilcas

La Formación Las Chilcas es una unidad volcanoclástica que posee depósitos calcáreos, clastos

andesíticos y aglomerados volcánicos con intercalaciones de lavas andesíticas de composición ácida, que se encuentra en la vertiente oriental de la cordillera de la costa y en la depresión central de Chile. Se dispone en forma concordante al Miembro Ocoa de la Formación Veta Negra e infrayace a una formación volcánica con intercalaciones sedimentarias que Thomas (1958) denominó Formación Lo Valle

Fue definida formalmente por Thomas (1958), como una secuencia volcanoclástica que litológicamente está marcada por importantes y rápidos cambios de facies laterales y verticales; en la unidad se reconocen desde coladas andesíticas hasta calcilitas grises, pasando por aglomerados, tobas, conglomerados y paraconglomerados de diverso origen. Una de sus características más notables es su marcado color rojizo a pardo claramente predominante, así como su variabilidad litológica. En la parte inferior de la unidad se distinguen de preferencia niveles de rocas volcánicas con una distribución local y secuencias clásticas tobáceas que predominan ampliamente como sucede en el sector entre Cerro Negro, Llay-Llay y San Felipe (Rivano, 1996).

Al sur del Valle del Aconcagua aflora en los cerros que flanquean por el oeste a la depresión central, mientras que en la zona norte forma una franja con orientación norte-sur de más de 30 km de ancho.

Thomas (1958) estima en el área de Las Chilcas su mayor potencia, calculando un espesor de 6.000 m, los que podrían llegar hasta los 7.000 m sumando sus capas más profundas.

Según Rivano (1996), el espesor estimado en el sector de Cerro Negro y Llay-Llay para la parte inferior de la unidad es de 1.500 m como mínimo, en tanto que el espesor de la parte superior es estimado en unos 2.000 m, lo que da un total de 3.500 m aproximadamente para la Formación Las Chilcas.

De acuerdo a los diversos trabajos de mapeo geológico realizados al norte del valle de Aconcagua, se ha dividido esta formación en tres miembros: Pitipeumo (105 – 100 Ma), Tabón (100 – 93 Ma) y Ñilhue (92 – 90 Ma), y en base a dataciones radiométricas se estima una edad entre 105 – 100 Ma. Esta área tiene afloramientos de rocas estratificadas de edades desde el Cretácico Inferior hasta el Maastrichtiano e intrusivas del cretácico tardío hasta el Oligoceno, los denominados Estratos de Peralillo, aflorantes en el área de la localidad homónima, formados por areniscas, lutitas calcáreas,

limolitas, chert y calizas con numerosos ostrácodos, pelecípodos, gastrópodos y algas, también fueron correlacionados por Levi (1969) con la parte superior de la Formación Las Chilcas.

Rivano (1985) estima una edad Cretácico Inferior, gracias a resultados de dataciones radiométricas obtenidas en intrusivos de la Súper Unidad Illapel, el cual corta a esta formación en todo su espesor, dando como resultado edades de 118 a 80 Ma. Datos que se contraponen al hecho de que se encontraron en la parte inferior de los conglomerados, rodados de ocoítas y que establecieron una edad Cretácico Superior.

Gana y Wall (1997) establecieron que el techo de la Formación Las Chilcas constituye una importante superficie de erosión que involucraría gran parte del cretácico tardío, constituyendo un hiatus de casi 37 Ma; asimismo determinaron que entre los 72 y 71 Ma tuvo lugar el volcanismo y sedimentación de unidad inferior de la Formación Lo Valle en su localidad.

Selles y Gana (2001) presentaron datos de fósiles hallados en la sección calcárea de la Formación Las Chilcas en la zona norte del Río Maipo. Entre los fósiles mencionados se encuentran foraminíferos, ostrácodos y moluscos, los cuales podrían indicar una edad cretácica temprana para esta unidad.

En conclusión, la Formación Las Chilcas se habría depositado en un ambiente subaéreo continental, con recurrencias episódicas de influjos del ambiente marino costero somero, especialmente en su mitad inferior; todo era dominado por un volcanismo intermedio a ácido correspondiente a una etapa terminal del volcanismo del Cretácico Inferior marcada por una mayor participación de material piroclástico que en las etapas precedente (Rivano, 1996).

4.1.2. Rocas Intrusivas

4.1.2.1. Súper Unidad Illapel

De acuerdo a Rivano (1985), corresponden a intrusivos cretácicos que forman una ancha franja de rocas plutónicas de forma irregular y con dimensiones de batolitos a stock, se disponen con tendencia general N20°-30°W, coincidiendo con lineamientos y fallas regionales vistas en la Hoja de Quillota y Portillo.

Las rocas de la Súper Unidad Illapel, que se encuentran altamente meteorizadas en superficie, intruyen a las rocas estratificadas volcano-sedimentarias cretácicas de las formaciones veta negra

y las chilcas, frecuentemente asociadas a alteración hidrotermal por la parte norte, fuera del área de estudio.

Las unidades reconocidas dentro de la súper unidad son la Unidad La Campana, Unidad Chalinga, Unidad Quebrada Herrera y Unidad Chagres.

- Unidad La Campana

Tidy (1970), reconoce esta unidad en el sector del Cerro La Campana. Posee una superficie aproximada de 8 km² y se compone de gabro y dioritas en menor proporción, son de color gris y grano medio a grueso (1 a 4 mm).

La edad determinada con dataciones K-Ar en plagioclasa es de 66±8 Ma.

- Unidad Chalinga

Constituye aproximadamente el 90% de la Súper Unidad Illapel y es la unidad que está presente en el área de estudio, incluye desde gabros a monzogranitos, pasando por las granodioritas y dioritas cuarcíferas, leucocráticas a mesocráticas.

Principalmente su petrografía se compone de granodioritas de hornblenda y biotita, además de monzodioritas cuarcíferas con textura hipidiomórfica irregular con tamaño de grano grueso medio hasta fino.

Rivano (1985), realizando dataciones K-Ar a 8 muestras determina una edad entre los 134 y 85 Ma.

- Unidad Quebrada Herrera

Corresponde a un plutón cuyo afloramiento forma una franja de unos 3 km de largo, dispuesto en dirección norte sur, por un ancho de 0,7 a 1,5 km. Es un cuerpo monzonítico de color verde, de grano medio con textura equigranular presenta plagioclasas subhedrales y ortoclasa argilizada pervasivamente (Rivano, 1985).

- Unidad Chagres

Cuerpo de color rosado claro a anaranjado que aflora en las zonas altas frente a la refinería de cobre en Chagres y que aparece intruyendo a la Unidad Chalinga. Petrográficamente, corresponde a un

sienogranito hololeucocrático de grano fino a medio que se encuentra intruido por filones andesíticos subparalelos (Rivano, 1985).

4.1.3. Depósitos Cuaternarios

En la hoja de Quillota y Portillo, los depósitos cuaternarios están representados por una variedad de depósitos sin consolidar y que corresponden a una serie de fenómenos de ocurrencia local determinada por las condiciones climáticas y topográficas de la zona (Rivano, 1985).

Los depósitos no consolidados en el área a nivel regional se clasifican como sedimentos aluviales, coluviales y depósitos de relleno de valles que están relacionados a los cursos de agua, en este caso al Valle del Río Aconcagua y el Estero Catemu, además existen depósitos de conos de deyección asociados a desembocaduras de quebradas, los que suelen evolucionar año a año.

En el sitio de la presa los depósitos no consolidados cuaternarios son sedimentos aluviales del cauce actual del Estero Catemu, y los esteros Gómez y El Sauces; depósitos aluviales o aluvionales de planicie de inundación en el valle del Estero Catemu; depósitos coluviales de escombros de falda y conos de talud; depósitos de conos de deyección provenientes de quebradas laterales y depósitos de deslizamientos.

4.1.4. Estructuras

La estructura regional más característica presente en la zona, se encuentra localizada en la Formación Las Chilcas y corresponde a un homoclinal con dirección general NS a N15°E e inclinación que varía entre 10° y 20° hacia el este a excepción de algunos sectores en que los sedimentos clásticos del Miembro Ñilhue, debido a su alto grado de incompetencia y plasticidad, produce inflexiones, variando sus rumbos e inclinaciones. Por otro lado, se han establecido varios sistemas de fallas, de los que el más importante, por estar ligado a la mineralización, mantiene un rumbo N20°- 40°W con manteos entre 75° y 90°; un sistema NS- N20°E con manteo de 90°, aparece asociado a diques y controla desplazamientos en la vertical, y un sistema N35°-50°E con manteo de 85°E, con desplazamiento de los estratos (Dávila, 1992).

Fuera de la zona de estudio hacia el este, según (Rivano, 1985) se alza el bloque del Batolito de Panquehue generado por compresión, el cual se encuentra limitado al este y al oeste por fallas inversas de alto ángulo, la Falla de La Giganta y la Falla del Carbón, respectivamente. Ambas en dirección general NNW-SSE.

4.2. GEOMORFOLOGÍA

4.2.1. Generalidades

Rivano (1985) define el rasgo geomorfológico denominado mediana montaña, que es la zona donde se reemplaza el valle central y que está formado por una serie de cordones de cerros con orientación NE-SW que se desprenden de la cordillera principal para unirse a la cordillera de la costa.

Posee un ancho promedio de unos 25 a 30 km y alturas entre los 1.500 y 3.000 m s.n.m., decrecientes de este a oeste y de norte a sur, constituida por rocas sedimentarias, piroclásticas, volcánicas e intrusivos cretácicos.

4.2.2. Geomorfología Local

Considerando las divisiones físicas de Chile según Börgel (1983), el área de estudio pertenece a las cuencas transicionales semi-áridas (Figura 4.2), dispuesta con una orientación preferentemente NS.

El estero Catemu corresponde a un valle longitudinal que se compone por taludes subverticales abruptos que cortan las series sedimentarias de las formaciones veta negra al este y las chilcas por el oeste.

La geomorfología local de la zona está controlada principalmente por los cursos de agua que erosionan, transportan y depositan sedimentos, siendo el más importante en la región el Río Aconcagua. Este nace en el nevado de Los Leones, extendiendo su hoya hidrográfica por 7.640 km², con sus principales afluentes los ríos Juncal y Blanco, con un largo total estimado de 149 km de largo hasta desembocar en el mar en Concón.

4.2.2.1. Relieves de Erosión y Acumulación

Los cordones de erosión que limitan el Valle del Estero Catemu, se caracterizan por presentar altitudes por sobre los 600 m s.n.m., estos se componen por secuencias volcanoclásticas de las formaciones Las Chilcas y el Miembro Ocoa de la Formación Veta Negra, por el oriente y poniente respectivamente. Estos altos terrenos poseen un gran potencial de meteorización, los cuales son erosionados y transportados hacia el fondo del valle, mientras que en algunos sectores generan regolitos en las laderas de los mismos cerros.

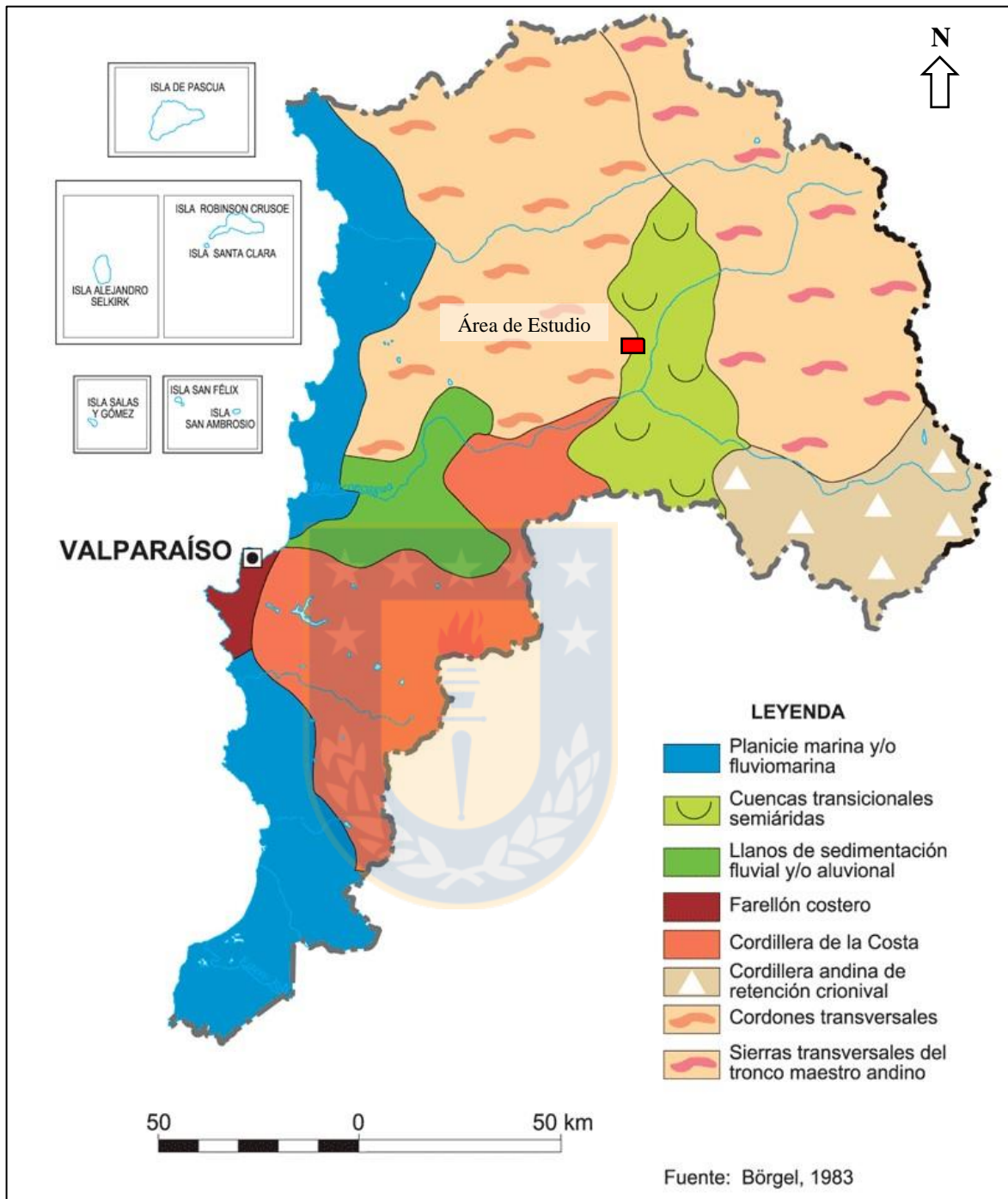


Figura 4.2. Mapa Geomorfológico de la Región de Valparaíso. Se destaca en rojo la ubicación del área de estudio. Modificado de Börgel (1983).

5. MARCO GEOLÓGICO LOCAL

5.1. LITOLOGÍA

5.1.1. Rocas Volcánicas

La caracterización litológica de estas rocas en terreno, es compleja debido a la meteorización y alteración que oblitera su composición y textura original en superficie. Sin embargo, gracias a la descripción geológica y geotécnica de 22 sondajes de diamantina (Anexo B) realizados en la zona del proyecto y descripción microscópica en luz transmitida de 14 secciones transparentes (Anexo C), se definen las siguientes unidades.

5.1.1.1. Andesitas

En el área de estudio se reconocen principalmente rocas volcánicas de composición andesítica, presentan textura porfídica con fenocristales de plagioclasa euhedrales a subhedrales con tamaños variables desde algunos milímetros hasta 2 cm de longitud, en una masa fundamental afanítica de color gris oscuro a marrón en zonas oxidadas, que puede variar de acuerdo al grado y tipo de alteración que en algunos casos oblitera la textura por completo de la roca, se recupera en el sondaje SC-11 andesita de tipo ocoíta (Figura 5.1).

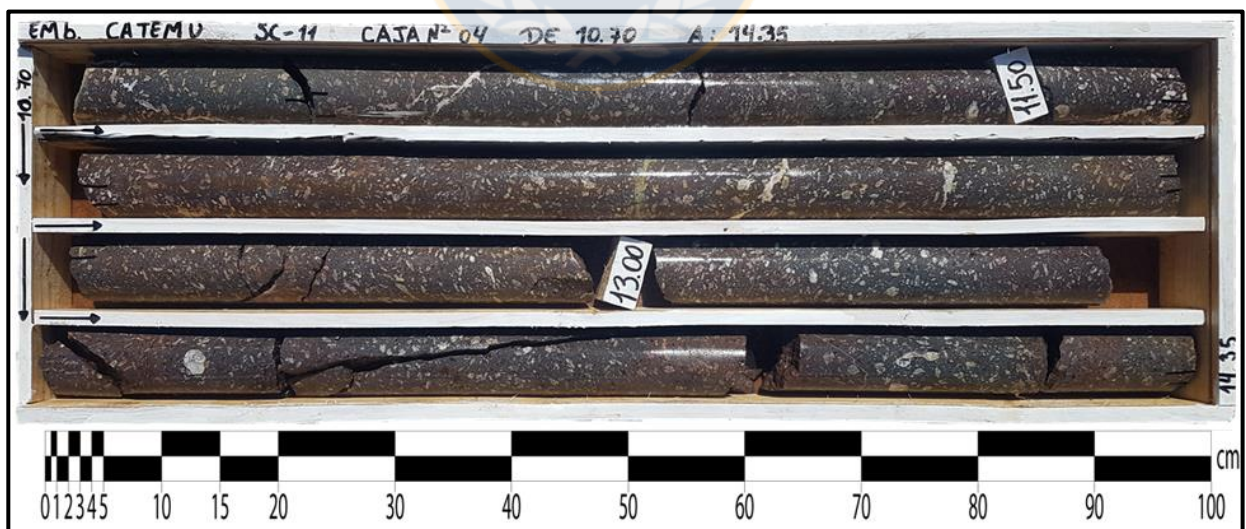


Figura 5.1. Andesita tipo ocoíta en sondaje SC-11.

Según el análisis petrográfico de muestra de mano y cortes transparentes, estas rocas se correlacionan con el Miembro Ocoa, parte superior de la Formación Veta Negra, que corresponden a rocas volcánicas de textura porfídica con grandes fenocristales de plagioclasa. Estas se clasifican

según el diagrama QAP de Streckeisen (1979) como andesitas, en este caso como andesitas de tipo ocoíta (Figura 5.2). Encontrándose principalmente en los sondajes ubicados entre el estribo derecho y en el centro del valle.

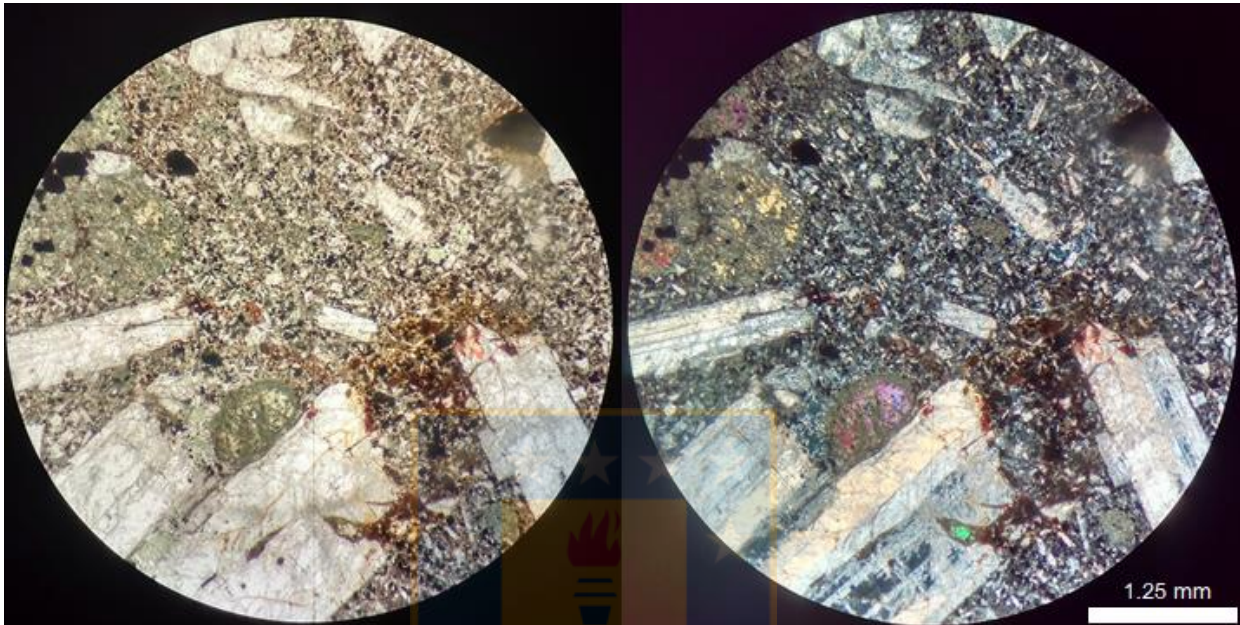


Figura 5.2. Fotomicrografía de sondaje SC-10. A la izquierda vista con nicoles paralelos y a la derecha con nicoles cruzados. Roca volcánica de composición andesítica con fenocristales de plagioclasas euhedrales alteradas a sericita junto a olivinos alterados y fracturados. En la masa fundamental se distinguen los microlitos de plagioclasas, opacos y vidrio volcánico.

Por otro lado, correspondiente al Miembro Purehue (miembro inferior) de la Formación Veta Negra, se correlacionan con las rocas encontradas en el sondaje SC-02 (Figura 5.3), clasificadas como andesitas de textura porfídica seriada amigdaloidal y vesicular en una masa fundamental hialopilítica.

5.1.1.2. Dacitas

Se reconocen rocas volcánicas de composición dacítica, macroscópicamente son de color gris claro a verde claro, con vetillas de calcita (Figura 5.4). Al microscopio, estas rocas presentan textura porfídica y vitrofídica seriada, con masa fundamental vítrea de composición media a ácida, en ocasiones desvitrificada, en general presentan vetillas rellenas de calcita y hematita de poco espesor, y contenido metálico de pirita (Figura 5.5).

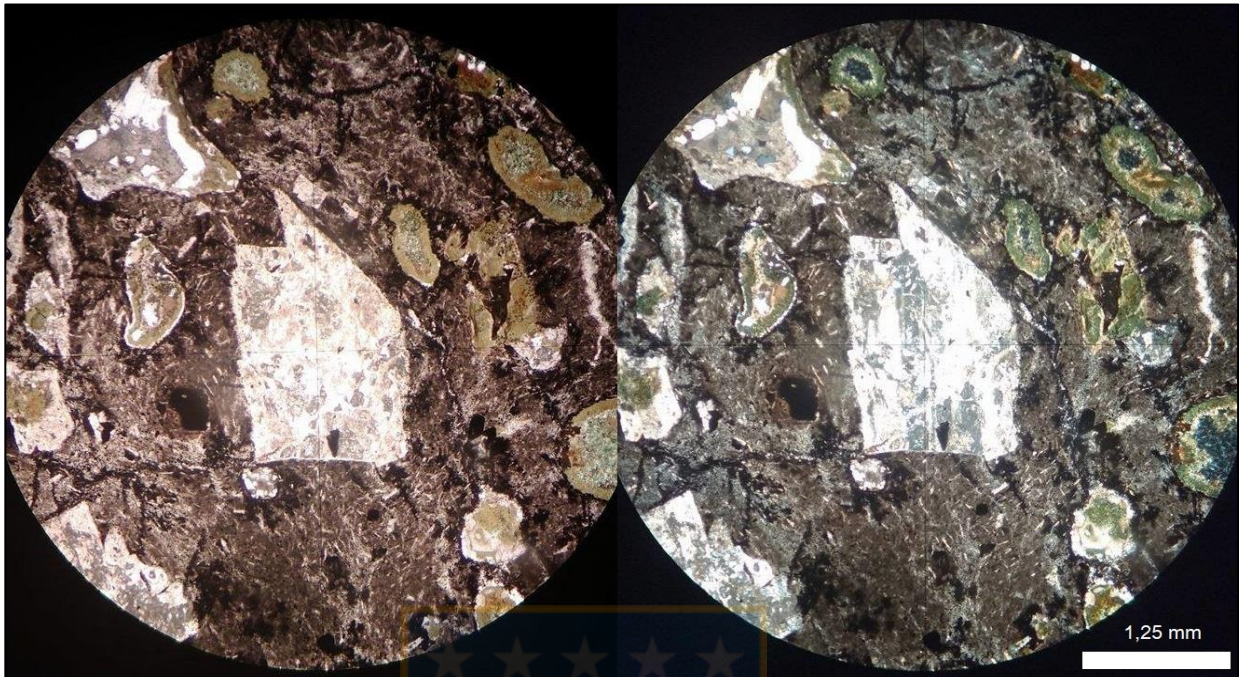


Figura 5.3. Fotomicrografía de sondaje SC-02. A la izquierda vista con nicols paralelos y a la derecha con nicols cruzados. Roca volcánica de textura porfídica seriada amigdaloidal y masa fundamental hialopilítica. Al centro, cristal subhedral de plagioclasa de 1,5 mm alterada a calcita y sericita. Las vesículas están rellenas principalmente con clorita y cuarzo. La masa fundamental está compuesta microlitos de plagioclasa.

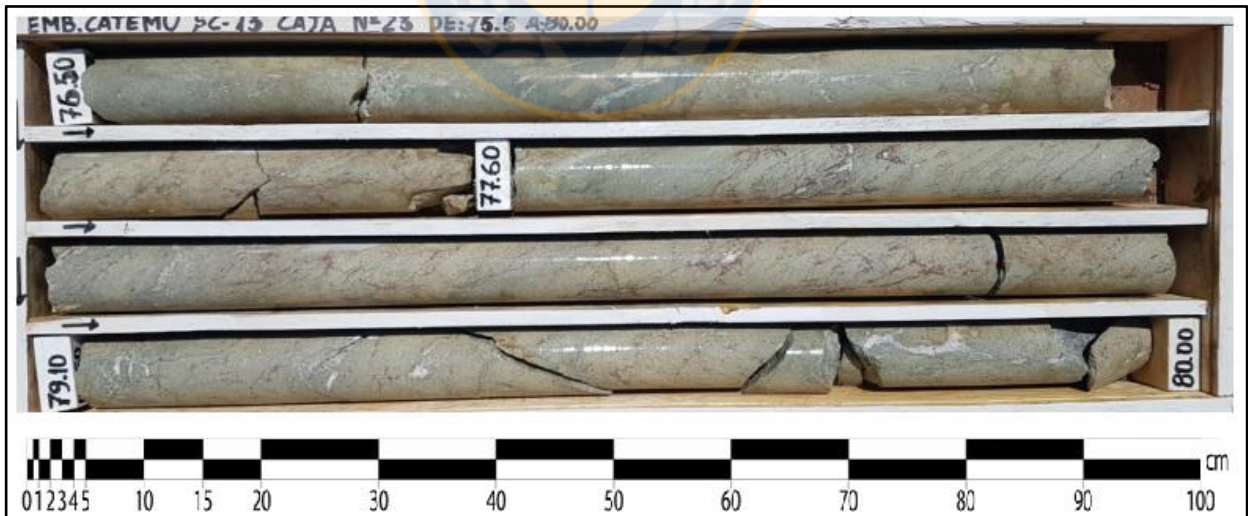


Figura 5.4. Dacita en el sondaje SC-04.

5.1.1.3. Brechas

Estas rocas son principalmente de composición andesítica, presentan clastos angulosos a subangulosos con tamaños que varían desde gravas a bloques en una matriz afanítica, de color

marrón principalmente y verde, el cual varía de acuerdo al grado de meteorización y alteración (Figura 5.6). Generalmente se encuentran fuertemente fracturadas.

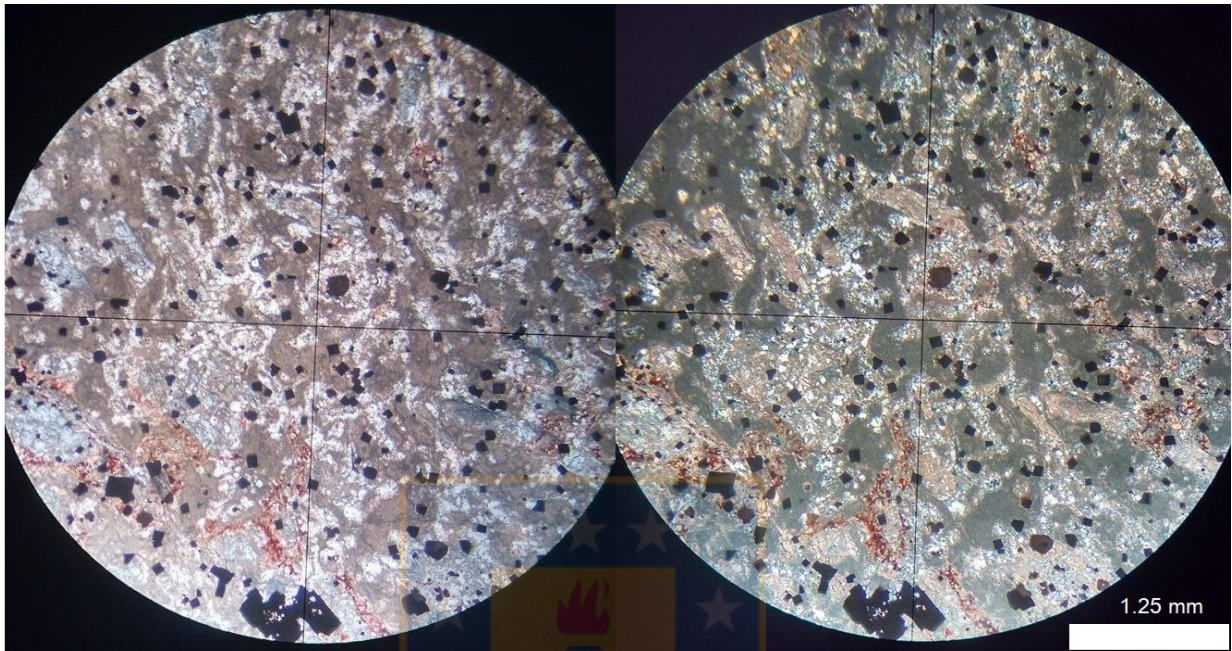


Figura 5.5. Fotomicrografía de sondaje SC-04. A la izquierda vista en nicols paralelos y a la derecha en nicols cruzados. Roca volcánica con textura porfídica. Los fenocristales de plagioclasa están totalmente alterados a calcita. La masa fundamental es felsofídica, con vidrio ácido desvitrificado. Está moderadamente alterado a limolita. Se destaca la abundancia de opacos, siendo un 10% cristales de pirita.



Figura 5.6. Brecha volcánica en sondaje SC-18.

Asociado a la descripción macro y microscópica, las rocas que afloran en el estribo izquierdo, al este del valle, pertenecen a la Formación Las Chilcas, específicamente a brechas e intercalaciones

de lavas andesíticas. Estas se describen como rocas volcánicas de textura vitrofídica seriada con fenocristales de plagioclasa subhedrales a anhedrales, altamente alterados a calcita y sericita con una masa fundamental compuesta por vidrio básico y con una pervasiva hematitización (Figura 5.7.)

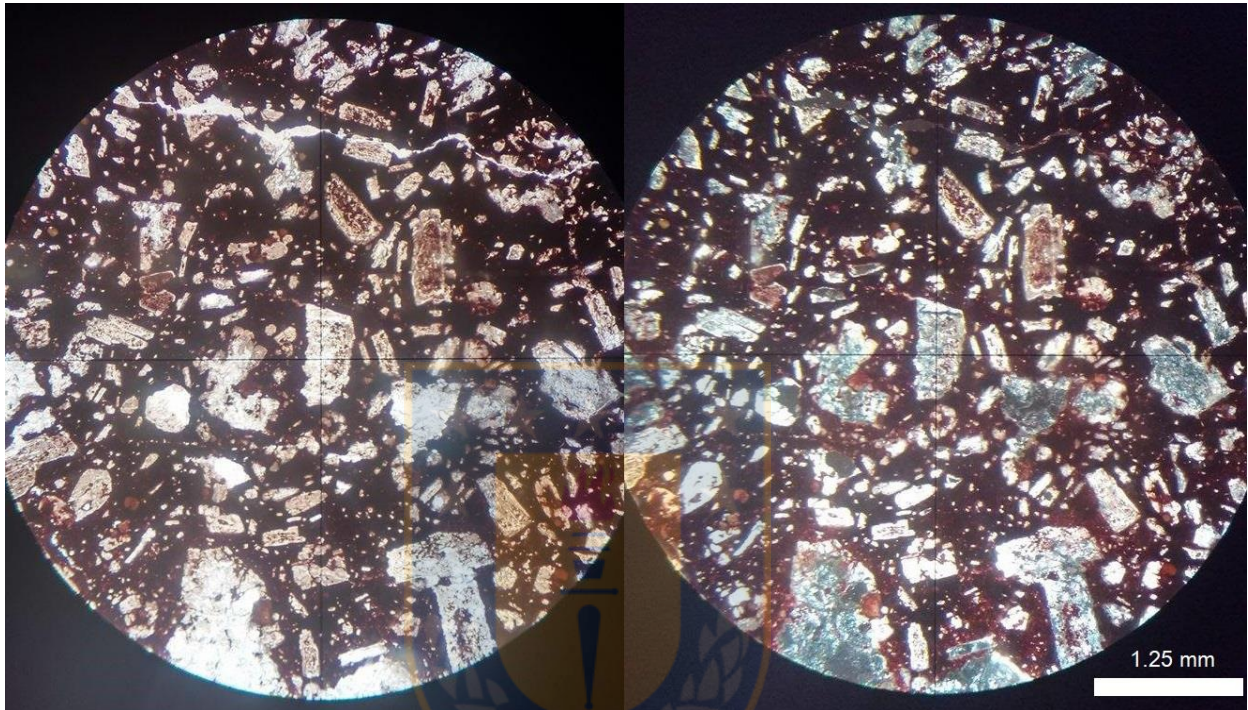


Figura 5.7. Fotomicrografía de sondaje SC-15. A la izquierda vista con nicoles paralelos y a la derecha con nicoles cruzados. Cristales de plagioclasa subhedrales y fragmentos de ellos alterados a calcita y sericita, en la parte superior es cortada por una vetilla rellena por cuarzo, en su totalidad la muestra presenta una hematitización pervasiva.

5.1.2. Depósitos no Consolidados

Los depósitos no consolidados o depósitos cuaternarios, corresponden principalmente a sedimentos aluviales, coluviales y conos de deyección. Según lo observado macroscópicamente, estos presentan clastos de composición polimíctica, con tamaños que varían de arena a bloques, angulosos a subangulosos y a veces se encuentran intercalados o alternados con porcentajes variables de sedimentos finos de limo y arcilla.

5.1.2.1. Depósitos Fluviales (Qf)

En el caso del cauce actual del Estero Catemu (Figura 5.8), los depósitos que allí se encuentran provienen de los esteros Gómez y El Sauce y consisten en gravas arenosas con bajas cantidades de

sedimentos tamaño limo, que incluyen además bolones subredondeados a subangulosos con tamaño máximo de 60 cm de diámetro. Son de baja compacidad a sueltos, y por lo tanto permeables. Se estima que el espesor promedio de los sedimentos actuales del cauce del Estero Catemu es de alrededor de 8 metros en su parte más profunda.



Figura 5.8. Depósitos actuales del Estero Catemu.

En el caso de cauces de quebradas laterales estos presentan un mayor contenido de partículas finas en la matriz, tienen una mayor compacidad y son menos permeables.

5.1.2.2. Depósitos Aluviales (Qa)

En la planicie del valle del Estero Catemu (Figura 5.9) el sustrato rocoso está cubierto por una gruesa cobertura de suelos fluviales y aluviales correspondientes a una alternancia de estratos y/o lentes de gravas areno-arcillosas y, en menor medida, arenas limo-arcillosas con gravas y bolones de diverso tamaño. Superficialmente esta gruesa capa de sedimentos contiene poca cantidad de materiales finos.

Los sedimentos que rellenan el valle del estero presentan una potencia máxima de 163,80 m y 159,35 m de profundidad, determinados a partir de los sondajes SC-06 y SC-07 respectivamente.



Figura 5.9. Planicie del valle del Estero Catemu.

5.1.2.3. Depósitos de Conos de Deyección (Qc)

El aporte de quebradas laterales de altas pendientes ha generado aquellos típicos conos de deyección que se forman en la zona de confluencia con planicies del valle que presentan una menor pendiente, estos corresponden a cauces de mayor importancia y desarrollo, lo cual aminora la velocidad de las aguas de transporte fluvial y aluvional, causando la depositación de los materiales transportados.

Los sedimentos consisten en gravas limosas y gravas limo-arcillosas con arenas y con bloques angulosos a subangulosos de hasta unos 3 m de tamaño máximo y en general menores de 1 m de diámetro en promedio (Figura 5.10.). También incluyen lentes de limos con contenidos de arcilla y grava, los que se asocian a episodios de corrientes de barro. Todos ellos son materiales de moderada a alta compacidad y de moderada a baja permeabilidad.

Se estima, basado en las observaciones de terreno por la zona lateral del estribo izquierdo, un espesor máximo de 8 m a 10 m de profundidad.



Figura 5.10. Depósitos de conos de deyección.

5.1.2.4. Depósitos Coluviales y/o Residuales (Qe)

Se encuentran en las faldas de los cerros adyacentes al Estero Catemu, cubriendo parcialmente los afloramientos de rocas volcánicas (Figura 5.11).

En general corresponden a arenas limo-arcillosas y, en menor medida, a gravas limo-arcillosas con bloques angulosos, son de alta compacidad y muy poco permeables. Superficialmente incluyen una cubierta de suelo vegetal con finas raíces.

En el caso de laderas de fuerte pendiente coronadas por cornisas o acantilados rocosos, incluyen conos de talud o acumulaciones de bloques con escasa matriz superficial, la cual aparece en profundidad. Estos materiales son más sueltos y son por ende más permeables.

El espesor máximo reconocido en el sondaje SC-18 es de 47,00 m.

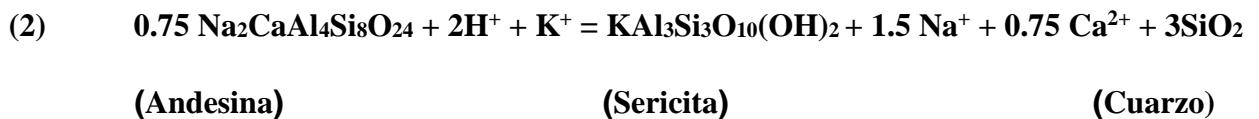
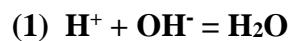


Figura 5.11. Depósitos coluviales y/o residuales. En la parte inferior derecha se observan los escombros en un corte de camino.

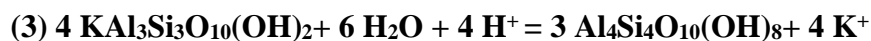
5.2. ALTERACIONES

5.2.1. Argílica Intermedia

Los afloramientos de rocas presentes en el área poseen distintos grados de alteración y meteorización, es posible reconocer que aquellas que están más en contacto con la superficie o con el nivel de agua freática, son más propensas a estar alteradas a arcillas, por efecto de la hidrólisis que se da lugar al estar estas rocas en contacto con agua, en la cual K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , y otros cationes se transfieren de minerales a la solución y el H^+ se incorpora en las fases sólidas remanentes. En términos químicos esto se puede representar con las siguientes reacciones:



Caolinización de la sericita:



Donde, la plagioclasa (andesina), al estar en contacto con el protón de hidrógeno, proveniente de la descomposición de agua, puede producir o transformarse en sericita y cuarzo. Esto en términos ópticos se traduce en una decoloración y trituración de la roca sea cual sea y posteriormente la sericita se altera a caolinita, lo que ocurre a temperaturas bajo los 300°C. Sobre 300°C la fase estable es pirofilita (Hedenquist, 1995).

Esta alteración es muy evidente y afecta fuertemente a las rocas que se encuentran bajo los depósitos de deslizamientos (Qd), en el estribo izquierdo, por ejemplo, en el sondaje SC-13 se reconocen rocas volcánicas de composición andesítica, muy fracturadas o trituradas, cuya textura original se encuentra obliterada y alterada pervasivamente a arcillas.

La Figura 5.12. corresponde a una roca volcánica de textura porfídica, seriada, con fenocristales de plagioclasa y cuarzo secundario en cúmulo. Las plagioclasas presentan una forma euhedral a subhedral, y poseen una alteración pervasiva a arcillas, e incipiente localmente a calcita. El cuarzo existente fue generado por el paso de fluidos posterior a la cristalización de la roca, y se presenta en forma de vetillas y diseminado en cúmulo. La masa fundamental presenta una textura hialopilitica, debido a la orientación subparalela de sus plagioclasas.

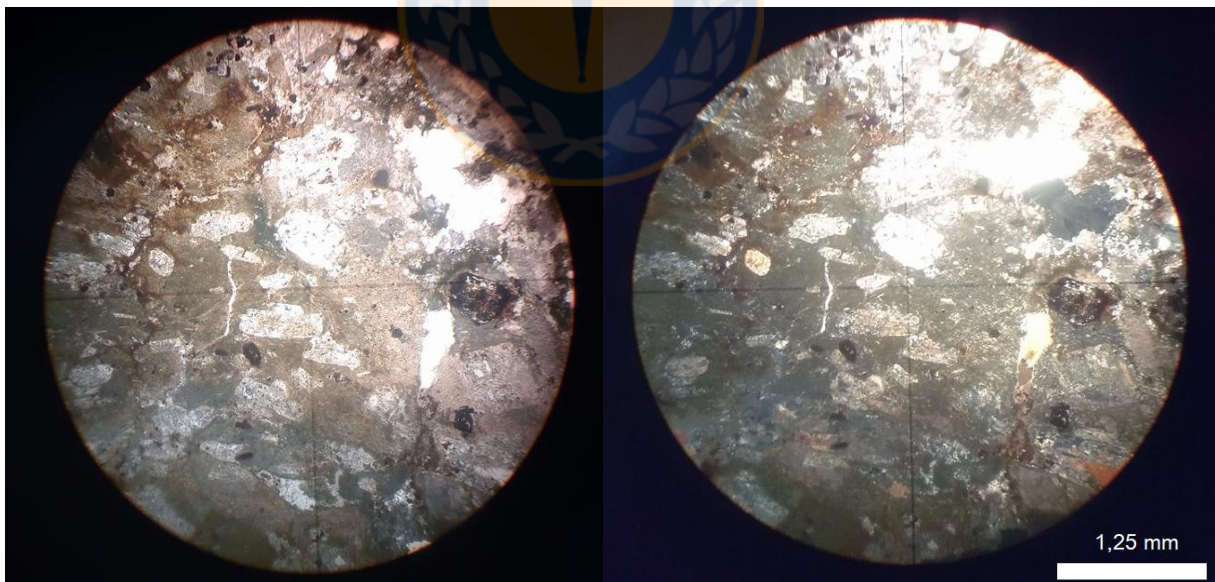


Figura 5.12. Fotomicrografía de sondaje SC-16. A la izquierda vista con nicoles paralelos y a la izquierda con nicoles cruzados. Se observan los fenocristales de plagioclasa altamente alterados a arcillas junto con cuarzo, la masa fundamental es de textura hialopilitica con disposición subparalela de las plagioclasas.

5.2.2. Sericítica

Según lo observado en cortes transparentes ambos feldespatos (plagioclasas y feldespato potásico) son transformados a sericita principalmente con cantidades menores de caolinita. Esta alteración es el resultado de una hidrólisis moderada a fuerte de los feldespatos, en un rango de temperatura de 300°-400°C y en un rango de pH 5 a 6.

La reacción de formación de sericita es la siguiente:

Sericitización del feldespato potásico:



La Figura 5.13. corresponde a una roca volcánica de textura porfídica seriada con fenocristales de plagioclasa euhedrales a subhedrales, altamente alterados a sericita y calcita, los fenocristales de piroxenos subhedrales alterados moderadamente a anfíbol. La Masa fundamental es de textura hialopilítica, con microlitos de plagioclasa orientados que se encuentran distribuidos de manera uniforme, el resto de la masa fundamental corresponde a vidrio volcánico de composición intermedia.

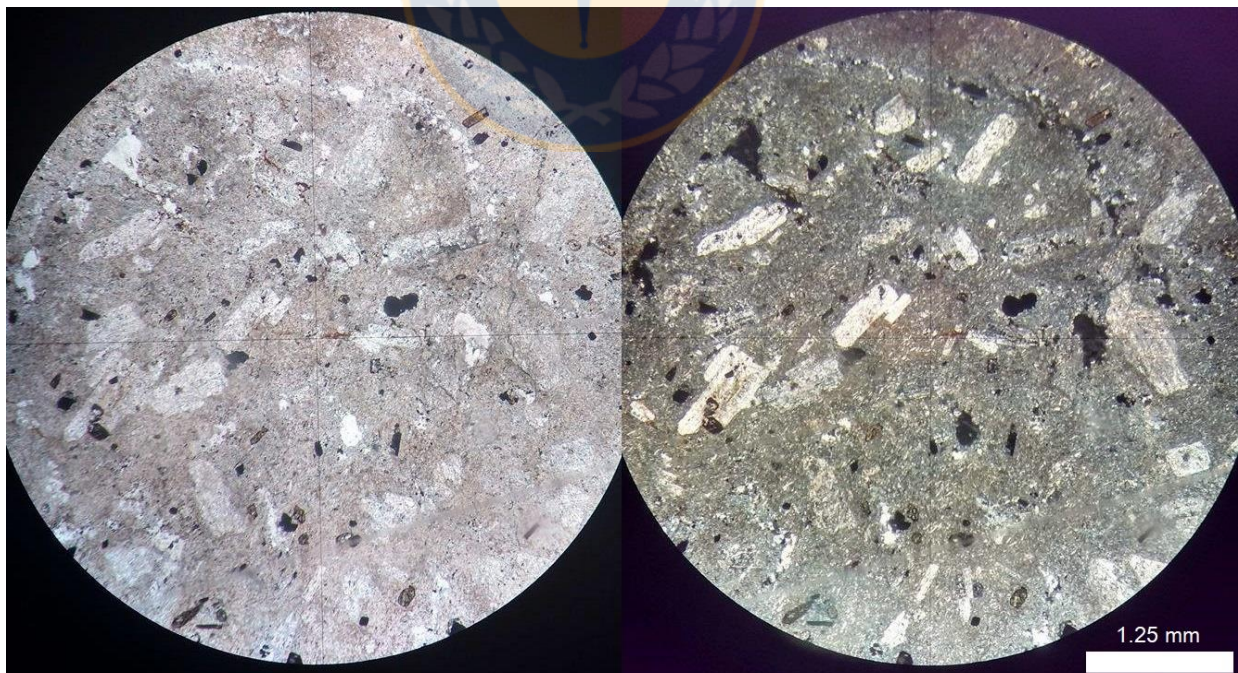


Figura 5.13. Fotomicrografía de sondaje SC-19. A la izquierda vista con nicoles paralelos y a la derecha con nicoles cruzados. Fenocristales de plagioclasa euhedrales alterados a calcita y sericita, en una masa fundamental de textura hialopilítica. Zonalmente presenta vetillas rellenas por cuarzo.

5.2.3. Cloritización

Es uno de los tipos más comunes de alteración. Puede desarrollarse por la alteración de silicatos férmicos o ferromagnesianos, con la introducción de agua y la remoción de algo de sílice. De todas formas, este tipo de alteración representa un grado bajo de hidrólisis de los minerales de las rocas y por lo mismo su posición en zonas alteradas tiende a ser marginal. La reacción más común es:



A nivel macroscópico esta alteración es identificada por un cambio en el color de la roca hacia uno más verdoso y en el área se encuentra más bien restringida en las rocas basales.

En el sondaje SC-03 (Figura 5.14.) estas se describen como roca volcánica de textura vitrofídica, seriada, con fenocristales de plagioclasas y biotitas. Los fenocristales de biotita poseen formas euhedrales y subhedrales, y han sido completamente obliteradas por una cloritización pervasiva. La masa fundamental se compone en su mayoría de vidrio de composición básica a media, con microlitos de plagioclasa tabulares.

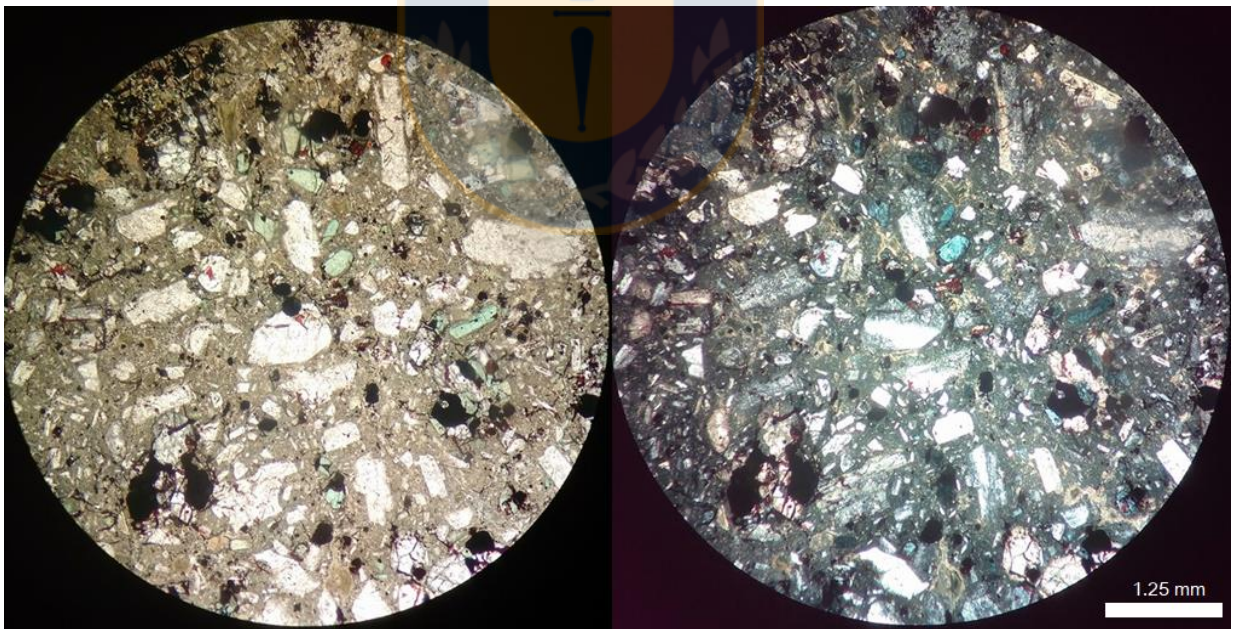


Figura 5.14. Fotomicrografía de sondaje SC-03. A la izquierda vista en nicoles paralelos y a la derecha en nicoles cruzados. Fenocristales de plagioclasa alteradas a sericita junto con biotitas cloritizadas de color verde. La masa fundamental corresponde a vidrio volcánico con presencia de vesículas rellenas por clorita.

5.3. ESTRATIGRAFÍA

Se realizaron tres columnas estratigráficas, localizadas en el estribo derecho, lecho del río y estribo izquierdo, con la finalidad de visualizar la disposición y espesores de las unidades presentes en el sitio de la construcción de la presa.

- En la columna N°1 del Estribo Derecho, (Figura 5.15) de más antiguo a más nuevo se reconoce:

?- 553 m s.n.m.: **Kvno**: Formación Veta Negra, Miembro Ocoa, rocas volcánicas de composición andesítica, color gris a pardo en zonas meteorizadas, con fenocristales de plagioclasa de 1 cm de longitud en promedio aproximadamente, euhedrales a subhedrales, en una masa fundamental afanítica, denominada como andesita tipo ocoíta.

553-554 m s.n.m.: **Qe**: Se reconoce una delgada capa de máximo 1,2 m de espesor en SC-10, de sedimentos finos no consolidados de arena, limo y arcilla principalmente (70%), con presencia moderada de gravas de composición polimíctica (30%), angulosas a subangulosas.

- Columna N°2 del Valle (Figura 5.15.) de más antiguo a más nuevo:

?- 336(?) m s.n.m.: **Kvno**: Formación Veta Negra, Miembro Ocoa, se reconocen las mismas andesitas tipo ocoítas descritas en la columna anterior. A los 336,00 m el contacto con las rocas de la Formación Las Chilcas es inferido.

336 (?) - 352 m s.n.m.: **Klc**: Formación Las Chilcas, las rocas corresponden a brechas volcánicas de composición andesítica, gris oscuras a verdosas, con clastos de composición polimíctica, de hasta 10 cm de diámetro, angulosos a subangulosos. La roca se encuentra moderadamente alterada a arcillas y clorita, tanto en la matriz como en los clastos.

352- 482 m s.n.m.: **Qa**: Depósitos no consolidados aluviales y/o aluvionales de la llanura o planicie de inundación del valle del Estero Catemu. Estos depósitos se encuentran con una buena gradación, desde 352 a 452 m s.n.m. se reconocen principalmente bloques (65%), gravas (30%) y finos (5%), desde 452 a 476 m s.n.m. en gravas (75%), bloques (20%) y finos (5%), finalmente desde 476 a 482 m s.n.m. se observa suelo residual compuesto por partículas areno-arcillosas (65%) y gravas (35%). Los clastos en esta unidad, son de origen volcánico y de composición polimíctica y en general son redondeados a subredondeados.

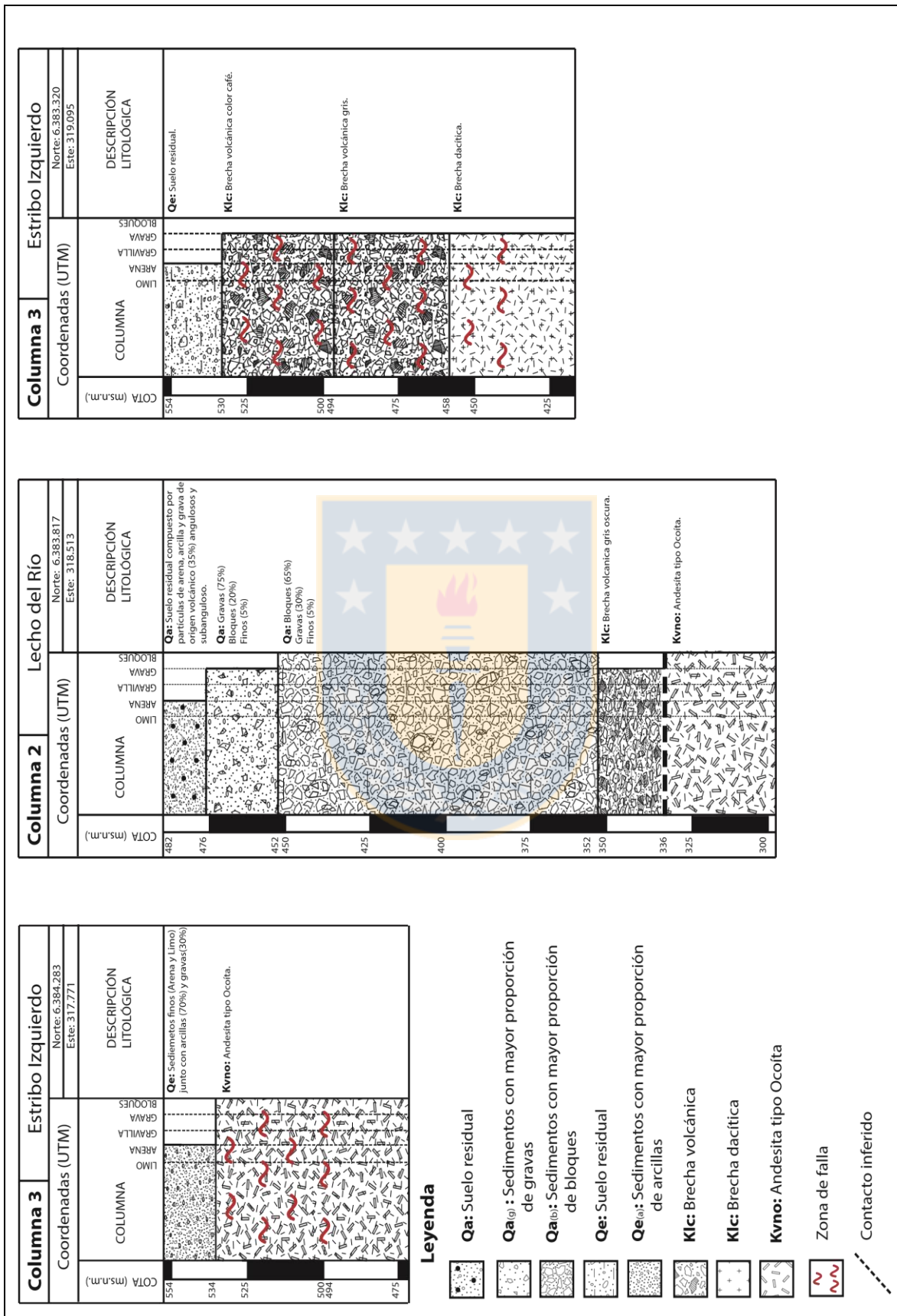


Figura 5.15. Columnas estratigráficas en zona de embalse. Columna izquierda (N°1), Columna del medio (N°2) y Columna derecha (N°3).

- Columna N°3 (Figura 5.15) del Estribo Izquierdo, de abajo hacia arriba:

?-458 m s.n.m.: **Klc**: Formación Las Chilcas. Se recupera una brecha volcánica de composición dacítica, color gris a verde claro, presenta clastos de composición polimítica de hasta 7 cm de diámetro, es cortada por vetillas de calcita de poco espesor y presenta pirita diseminada.

458- 494 m s.n.m.: **Klc**: Formación Las Chilcas. Roca posible brecha volcánica de color gris claro con líticos polimíticos de tamaño lapilli en base y tamaño bloque a techo. La roca presenta estructuras de flujo, pirita diseminada y vetillas de calcita.

494-530 m s.n.m.: **Klc**: Formación Las Chilcas. Posible roca volcánica de composición andesítica color café claro a oscuro. Se presenta muy fracturada con presencia de salbanda de falla y con la textura original obliterada e intensamente alterada a arcillas.

530- 554 m s.n.m.: **Qe**: Depósitos no consolidados de escombros de falda. Bloques y gravas de origen volcánico, composición polimítica, con tamaño promedio de 5 a 15 cm con bordes redondeados a subredondeados, con una mala selección, en una matriz de arcilla limo y arena, los clastos se encuentran fuertemente meteorizados y en ocasiones disgregados.

En el área del proyecto el contacto entre la Formación Veta Negra y la Formación Las Chilcas es inferido entre los sondajes SC-07 y SC-08.

Las rocas volcánicas de la Formación Las Chilcas corresponderían a la unidad basal que a su vez se correlacionan con las rocas de la Formación Cerro Morado en el sector de Cerrillos de Catemu, definidas como, brechas, tobas y andesitas.

6. ESTUDIO GEOTÉCNICO Y ENSAYOS

6.1. GENERALIDADES

Por los métodos de perforación destructivos (rotación y percusión) utilizados en las campañas de exploración realizadas entre los años 1999 y 2001, por parte de la Dirección de Obras Hidráulicas y EDIC Ingenieros, fue necesario preparar una nueva campaña de prospecciones con recuperación de testigos (Tabla 6.1), documentados en fotografías en el Anexo A, con el objetivo de definir con precisión el horizonte suelo-roca en la zona de presa del Embalse Catemu, así como, las zonas de falla presentes, junto con una clasificación geotécnica de los sondajes recuperados según los parámetros RQD y RMR.

Tabla 6.1. Prospecciones en el área de estudio. Nombre, ubicación, profundidad y ensayos.

SONDAJE	NORTE(m)	ESTE (m)	PROF. (m)	N° LUGEON	N° LEFRANC	SPT
SC-01	6.384.158,780	317.928,754	70	6	8	-
SC-02	6.384.098,295	318.029,020	120	4	20	1
SC-03	6.383.633,135	318.800,109	100	4	16	-
SC-04	6.383.546,089	318.944,424	80	12	4	-
SC-05	6.384.028,784	318.144,828	145,1	2	27	1
SC-06	6.383.944,185	318.285,927	170	1	33	1
SC-07	6.383.864,443	318.416,673	164	3	31	1
SC-08	6.383.791,786	318.537,526	131,1	1	27	1
SC-09	6.383.708,887	318.673,925	130	2	23	1
SC-10	6.384.133,726	317.755,627	50	3	7	1
SC-11	6.384.147,261	317.840,126	80	5	10	-
SC-12	6.383.486,589	318.988,024	80	11	5	1
SC-13	6.383.412,746	319.031,418	80	12	4	-
SC-14	6.383.342,040	319.072,893	50	6	3	-
SC-15	6.383.319,193	319.102,114	40	1	7	-
SC-16	6.383.505,289	319.047,224	40	3	5	-
SC-17	6.383.296,190	318.906,125	50	6	4	-
SC-18	6.383.225,977	318.975,182	57,3	8	4	-
SC-19	6.383.168,000	318.896,393	52,3	-	11	1
SC-20	6.383.127,793	318.841,485	58	1	11	1
SC-21	6.384.378,358	318.749,039	110	6	16	-
SC-22	6.385.108,000	318.486,000	85	-	17	1
		TOTAL	1942,8	97	293	13

En el área, en la actual campaña se proyectaron 22 sondajes geotécnicos en diámetro HQ3 (testigos de 61,1 mm de diámetro) con recuperación de testigos, todos orientados a reconocer la calidad y características de la roca de fundación de la presa y obras anexas como túnel de desvío y evacuador de crecidas, estos se llamaron “Sondaje Catemu” del 01 al 22, designados desde SC-01 al SC-22 y dibujados en sus respectivos “Log” geotécnicos (Anexo B).

En el presente informe se calcularon los valores de RQD, RMR y valores de permeabilidad para todos los sondajes realizados, con el fin de tener una proyección completa en profundidad de las áreas con diferentes calidades de roca y permeabilidades asociadas. Este cálculo incluyó a todas las perforaciones ejecutadas en el área de estudio durante la campaña de terreno (Figura 6.1).

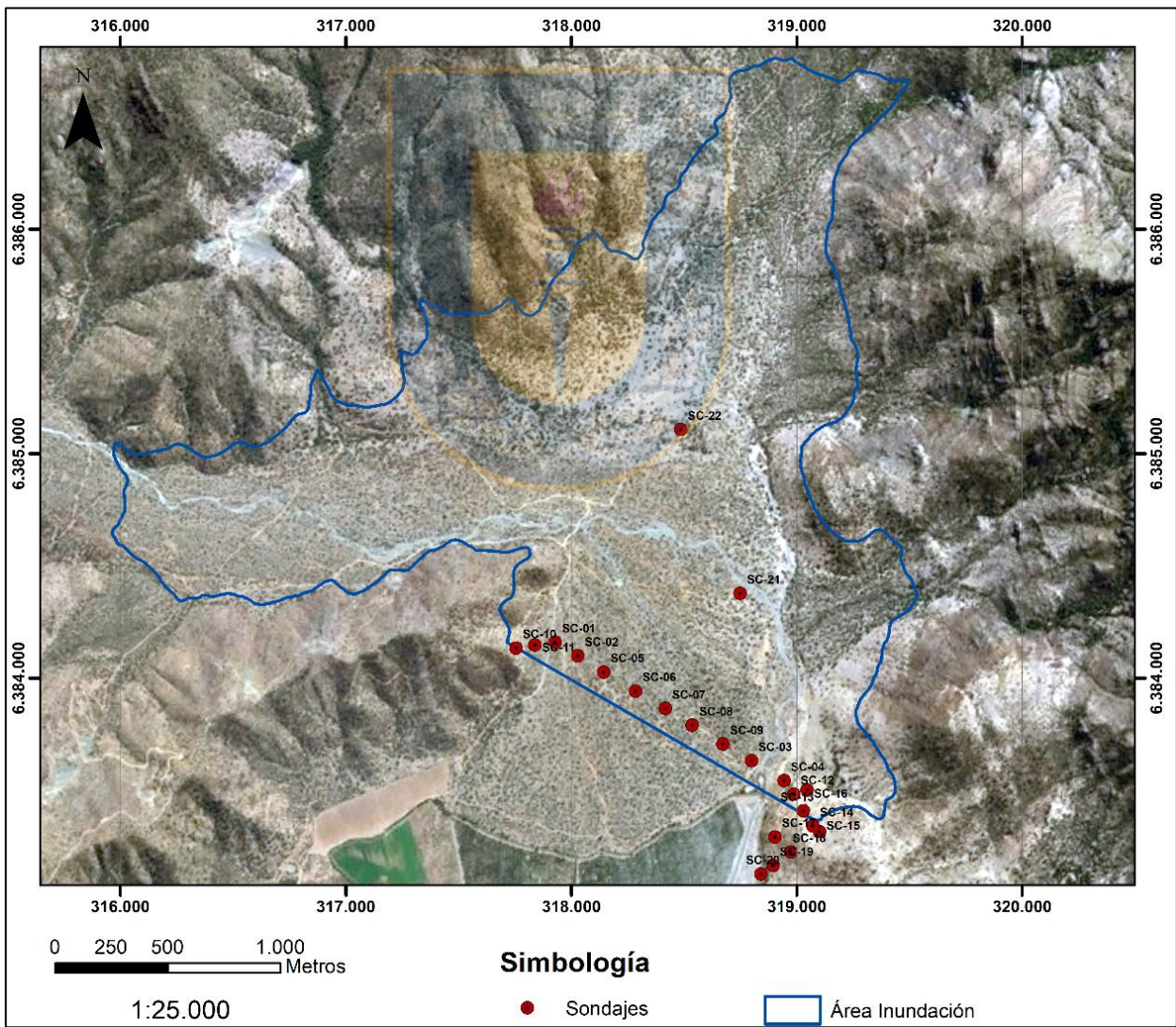


Figura 6.1. Mapa de inundación. Zona de prospección e inundación del Embalse Catemu.

6.2. SONDAJES EN SITIO DE PRESA

6.2.1. SC-01

Se ubica en la zona derecha del valle, llegando hasta una profundidad de 70,00 m. Su objetivo es reconocer la calidad del macizo rocoso para la fundación del plinto.

Hasta los 32,40 m de profundidad el material recuperado corresponde a suelo conformado por bloques y gravas en una matriz de limo, arena y arcilla con clastos de tamaño promedio de 5 a 7 cm llegando a los 25 cm de longitud son de composición andesítica de textura porfídica y clastos polimícticos en menor proporción. Desde los 32,40 m hasta el final de la perforación hay roca de composición andesítica con fenocristales de plagioclasa en masa fundamental gris oscura la cual varía los 42,40 m a una brecha volcánica, la cual está triturada y totalmente desintegrada asociándose a zona de falla. Las superficies de discontinuidad del macizo rocoso están alteradas y oxidadas producto de alteración y rellenas con material arcilloso.

El parámetro RMR varía desde 22 a 32 puntos, clasificándose la roca con “mala” calidad geotécnica para el tramo entre los 32,40 m de profundidad hasta el final de la perforación (Tabla 6.2), el índice de resistencia a la compresión simple esta entre 1 y 50 MPa.

Tabla 6.2. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-01.

Sondaje	Suelo/Roca	Tramo	RESIS	RQD	ESP	JC	AGUA	RMR	Clasificación
SC-01	Suelo	0,00 - 32,40							
	Roca	32,40 - 39,40	4	3	8	0	7	22	Mala
	Roca	39,40 - 48,90	2	8	10	0	7	27	Mala
	Roca	48,80 - 54,00	2	8	5	10	7	32	Mala
	Roca	54,00 - 60,65	1	8	5	10	7	31	Mala
	Roca	60,65 - 66,00	1	3	5	10	7	26	Mala
	Roca	66,00 - 70,00	2	3	8	10	7	30	Mala

El porcentaje RQD desde 32,40 m hasta los 39,40 m esta entre 0 % y 32 % con baja permeabilidad de 4,92 Unidades Lugeon (UL), luego el RQD hasta los 54,00 m sube a 47 % y a los 60,65 m sube a 60 %, en el último tramo el porcentaje varía entre 0 % y 33 %.

Se clasifica la permeabilidad según los ensayos Lefranc-Mandel realizados en la perforación como “media” desde los 4,4 m hasta los 15,5 m con valores de $1,28 \times 10^{-03}$ cm/s, $2,57 \times 10^{-02}$ cm/s y $1,38 \times 10^{-03}$ cm/s. Desde los 19,4 m hasta los 24,4 m la permeabilidad es “muy baja” con valor de

$4,52 \times 10^{-06}$ cm/s. Desde los 24,4 m hasta los 30,0 m la permeabilidad es “baja” con valores de $1,61 \times 10^{-04}$ cm/s y $1,21 \times 10^{-04}$ cm/s. Finalmente en el último ensayo Lefranc-Mandel desde los 33,0 m hasta los 35,0 m se obtiene una “muy baja” permeabilidad con $1,27 \times 10^{-06}$ cm/s. Según los ensayos Lugeon la permeabilidad del macizo rocoso desde los 39,40 m hasta los 70,00 m va aumentando de 4,92 UL a los 36,0 m, a 5,42 UL a los 46,0 m, mientras que en el tramo final a los 66,0 m se clasifica con permeabilidad “moderada” con 6,36 UL. Se destaca que en los ensayos Lugeon a los 41,0 m, 56,0 m y 61,0 m ocurre *bypass*.

En total se ejecutan 6 ensayos tipo Lugeon y 8 ensayos tipo Lefranc-Mandel para el cálculo de la permeabilidad del suelo y del macizo rocoso. Además, se toma muestra los 41,60 m de profundidad para calcular el índice de resistencia a la compresión simple dando como resultado 20,9 MPa.

6.2.2. SC-02

Se ubica en la zona derecha del plinto en el valle, alcanzando una profundidad de 120,00 m, es necesario para definir la calidad geotécnica del macizo rocoso.

Desde la superficie hasta los 88,10 m las muestras recuperadas corresponden a suelo compuesto por bolones y gravas con tamaño promedio de 5 a 20 cm, los cuales disminuyen hasta los 3 cm de longitud en el último tramo de perforación, poseen bordes redondeados a subredondeados y con una mala selección, en una matriz de arcilla, limo y arena.

La permeabilidad según los ensayos de Lefranc-Mandel desde los 4,5 m hasta los 10,0 m se clasifica como “media” con valores de $6,81 \times 10^{-03}$ cm/s y $3,46 \times 10^{-03}$ cm/s. Desde los 14,0 m hasta los 20,0 m se clasifica como “baja” con valores de $9,46 \times 10^{-04}$ cm/s y $4,23 \times 10^{-04}$ cm/s. Desde los 24,0 m hasta los 35,0 m los valores son de $4,69 \times 10^{-03}$ cm/s, $1,34 \times 10^{-03}$ cm/s y $4,82 \times 10^{-03}$ cm/s clasificándose como “media”. En el ensayo de los 39,0 m el pozo se secó. A los 44,0 m la permeabilidad es “baja” con valor de $3,21 \times 10^{-05}$ cm/s, desde los 49,0 m hasta los 65,0 m la permeabilidad es “media” y “baja” con valores de $1,66 \times 10^{-03}$ cm/s, $1,33 \times 10^{-04}$ cm/s, $1,93 \times 10^{-03}$ cm/s y $1,02 \times 10^{-04}$ cm/s. A los 69,0 m el ensayo se encuentra sin admisión. Desde los 74,0 m hasta los 75,0 m la permeabilidad es de $1,88 \times 10^{-08}$ cm/s “prácticamente impermeable”. Desde los 79,0 m hasta los 85,0 m la permeabilidad es “baja” con $2,06 \times 10^{-04}$ cm/s y $1,43 \times 10^{-04}$ cm/s. a los 89,0 m es de $1,16 \times 10^{-03}$ cm/s clasificándose como “media”. A los 93,5 m es “baja” con $1,79 \times 10^{-04}$ cm/s. y el último ensayo a los 104,0 m es sin admisión.

Desde los 88,10 m hasta los 107,20 m de profundidad se recupera roca volcánica de color rojizo y composición andesítica con masa fundamental afanítica y fenocristales de plagioclasa, a este tramo se le asocia una zona de falla donde macizo rocoso está fuertemente triturado, meteorizado y con generación de arcillas en las superficies de discontinuidad. Hasta los 120,00 m se hay roca volcánica de composición andesítica de color gris, con 25 % a 30 % de fenocristales de plagioclasa euhedrales y subhedrales en masa fundamental afanítica.

El parámetro RMR desde los 88,10 m hasta los 108,15 m posee una “mala” calidad geotécnica y con RQD de 0 % asociado a la zona de falla, posee una baja resistencia a la compresión simple de la roca entre 1 y 5 MPa y su permeabilidad es baja con 2,05 UL. Desde los 108,15 m hasta 120,00 m de profundidad el RMR sube a 55 puntos asociado a una calidad de la roca “regular” con resistencia a la compresión simple entre 50 a 100 MPa (Tabla 6.3), la permeabilidad disminuye de 17,21 UL en el inicio del tramo a 0,57 UL desde los 115,00 m hasta los 120,00 m. En el ensayo hecho a los 105,0 m de profundidad ocurre *bypass*.

Tabla 6.3. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-02.

Sondaje	Suelo/Roca	Tramo	RESIS	RQD	ESP	JC	AGUA	RMR	Clasificación
SC-02	Suelo	0,00 - 88,60							
	Roca	88,60 - 97,50	1	3	5	10	7	26	Mala
	Roca	97,50 - 108,15	1	3	5	20	7	36	Mala
	Roca	108,15-120	7	8	8	25	7	55	Regular

En total se ejecutaron 4 ensayos tipo Lugeon y 20 ensayos Lefranc-Mandel. En el ensayo SPT a los 69,40 m de profundidad el resultado es “rechazo” luego de penetrar solo 2,5 cm. A los 119,00 m de profundidad, la muestra extraída posee un índice de resistencia a la compresión simple de 66,4 MPa.

6.2.3. SC-03

Ubicado en la zona izquierda del plinto en el valle con una profundidad de 100,00 m, el cual es necesario para determinar la calidad geotécnica del macizo rocoso.

Desde la superficie hasta los 80,30 m se recupera suelo compuesto por bolones y gravas con tamaño entre los 3 y 15 cm llegando hasta los 20 cm de longitud, poseen bordes redondeados y subredondeados algunos subangulares y con mala selección, rodeados de una matriz de limo y

arcilla. Desde los 80,30 m hasta los 94,00 m se tiene una brecha volcánica de composición andesítica de color gris compuesta por líticos volcánicos y con presencia de vetillas de calcita, se reconocen fallas a los 84,00 m y 89,00 m de profundidad aproximadamente, donde el macizo rocoso está fracturado y oxidado en la superficie de las discontinuidades. Luego hasta el final del sondaje se encuentra roca volcánica de composición andesítica de color gris con fenocristales de plagioclasa en una masa fundamental afanítica.

El puntaje RMR obtenido desde los 80,30 m a 84,20 m es de 34 puntos y desde los 84,20 m hasta 90,10 m es de 47 puntos, asociado a una “mala” y “regular” calidad geotécnica respectivamente, con respecto a las permeabilidades estas son bajas con valores de 0,12 UL y 0,19 UL. Finalmente, hasta llegar a los 100,00 m el RMR aumenta a 69 puntos pasando a roca de “buena” calidad geotécnica (Tabla 6.4), con resistencia a la compresión simple de 100 a 250 MPa y con valor promedio RQD de 75 %, la permeabilidad es baja para este tramo con valor de 0,5 UL.

Tabla 6.4. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-03.

Sondaje	Suelo/Roca	Tramo	RESIS	RQD	ESP	ESTR	AGUA	RMR	Clasificación
SC-03	Suelo	0,00 - 80,30							
	Roca	80,30 - 84,20	4	8	5	10	7	34	Mala
	Roca	84,20 - 90,10	7	8	5	20	7	47	Regular
	Roca	90,10 - 100,00	12	17	8	25	7	69	Buena

La permeabilidad según los ensayos Lefranc-Mandel realizados desde los 4,0 m de profundidad es un pozo seco. A los 9,03 m la permeabilidad es “media” con $1,25 \times 10^{-03}$ cm/s. Desde los 14,0 m hasta los 20,0 m es “baja” con valores de $7,65 \times 10^{-04}$ cm/s y $7,32 \times 10^{-04}$ cm/s. A los 23,8 m la permeabilidad es “media” con $2,52 \times 10^{-03}$ cm/s. Desde los 29,0 m hasta los 45,0 m los valores son $2,41 \times 10^{-05}$ cm/s, $6,32 \times 10^{-05}$ cm/s, $1,38 \times 10^{-04}$ cm/s y $9,91 \times 10^{-04}$ cm/s clasificándose como “baja”. A los 49,0 m es “muy baja” con $4,21 \times 10^{-06}$ cm/s. Desde los 53,0 m donde hay una napa emergente hasta los 75,0 m los valores son $5,98 \times 10^{-05}$ cm/s, $3,43 \times 10^{-04}$ cm/s, $2,40 \times 10^{-04}$ cm/s, $2,35 \times 10^{-04}$ cm/s y $2,98 \times 10^{-04}$ cm/s clasificándose como “baja” y a los 83,5 m la permeabilidad es “media” con $5,69 \times 10^{-03}$ cm/s.

En total se ejecutan 4 ensayos de tipo Lugeon para macizo rocoso y 16 ensayos de Lefranc-Mandel para suelo y roca muy fracturada. En el tramo de los 84,80 m hasta los 85,20 m se realiza ensayo de compresión simple con resultado de 43,3 MPa.

6.2.4. SC-04

Con 80,00 m de profundidad, el sondaje se ubica en la zona izquierda del plinto en el valle, necesario para determinar la calidad geotécnica del macizo rocoso.

Hasta los 20,00 m el material recuperado es suelo compuesto por bloques y gravas en una matriz de limo, arena y arcilla, los clastos tienen en promedio 5 cm, llegando a los 15 cm de longitud, son de composición andesítica con textura porfídica y clastos polimícticos en menor proporción. Se ejecutan 4 ensayos Lefranc-Mandel, clasificándose desde los 3,5 m hasta los 10,0 m como “media” permeabilidad con valores de $6,41 \times 10^{-03}$ cm/s y $1,25 \times 10^{-03}$ cm/s, desde los 14,0 m hasta los 20,00 m es “baja con $7,65 \times 10^{-04}$ cm/s y $7,32 \times 10^{-04}$ cm/s.

Desde los 20,00 m hasta los 63,00 m se recupera roca de composición andesítica, textura porfídica con fenocristales de plagioclasa subhedrales, inmersos en masa fundamental afanítica color gris oscuro, clasificándose como “regular” de acuerdo al puntaje RMR, posee resistencia a la compresión simple entre 25 y 50 MPa y valores de RQD que varían entre 50 % y 90% (Tabla 6.5), existen zonas de falla entre los 40,00 m y 46,50 m donde la superficie de las discontinuidades se encuentran moderadamente oxidadas y ligeramente rugosas. Los resultados de permeabilidad para este tramo son de 1,02 UL; 4,37 UL; 3,19 UL; *bypass*; 0,24 UL; *bypass*; 0,1 UL; 0,07 UL y 0,07 UL.

Tabla 6.5. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-04.

Sondaje	Suelo/Roca	Tramo	RESIS	RQD	ESP	JC	AGUA	RMR	Clasificación
SC-04	Suelo	0,00 - 20,00							
	Roca	20,00 - 36,00	7	13	10	20	7	57	Regular
	Roca	36,00 - 48,00	4	17	8	10	7	46	Regular
	Roca	48,00 - 73,50	12	13	10	25	7	67	Buena
	Roca	73,50 - 80,00	4	8	8	20	7	47	Regular

Desde los 63,00 m hasta los 70,50 m se recupera roca volcánica de composición andesítica con bandeamiento y orientación de cristales, se clasifica como “buena” calidad geotécnica con RQD entre 55% y 93% y resistencia a la compresión de 50 a 100 MPa, la permeabilidad para el tramo según los ensayos es de 0,11 UL y 0,19 UL.

Finalmente, hasta terminar el sondaje se recupera brecha volcánica de composición dacítica gris

verdosa clara, compuesta principalmente por clastos angulosos de 5 a 8 cm de diámetro, alcanzando los 10 cm de longitud, tiene “regular” calidad geotécnica con RQD de 50% a 90%, resistencia a la compresión simple de 25 a 50 MPa y está moderadamente meteorizada, la permeabilidad es de 0,28 UL.

En el tramo de los 77,75 m hasta los 78,05 m se ejecuta ensayo de compresión simple con resultado de 31,0 MPa.

6.2.5. SC-05

Se ubica en la zona central del plinto en el valle, tiene una profundidad de 145,10 m. Está compuesto por suelo hasta los 117,60 m, principalmente conformado por bloques, gravas y arena, de carácter polimíctico, con tamaño promedio de 10 a 15 cm, incluso llegando a los 20 cm de longitud, los clastos tienen bordes redondeados y subredondeados, en una matriz fina de arcilla y limo en general con buena gradación. Los siguientes 27,50 m hasta el final de la perforación, se recupera roca volcánica de composición andesítica color gris a pardo rojizo en zonas meteorizadas, fenocristales de plagioclasa euhedrales y subhedrales en una masa fundamental afanítica cortada por vetillas de calcita.

En el tramo desde el horizonte suelo-roca hasta los 130,00 m la roca es de “mala” calidad geotécnica con resistencia a la compresión simple de menor a 25 MPa, RQD que varía entre un 25% a 50% con tres zonas de fallas a los 122,00m 125,00 m y 128,00 m, en donde la roca se encuentra triturada y con una leve pátina oxidada en la cara de las discontinuidades que a su vez son ligeramente rugosas, luego hasta los 139,10 m la roca presenta una calidad “buena” de acuerdo a su puntaje RMR de 71, un RQD de 75 a 90% y resistencia a la compresión simple de 50 a 100 MPa. El último tramo hasta los 145,10 m se presenta con una “buena” calidad geotécnica, RQD de 90% a 100% (Tabla 6.6) y resistencia a la compresión simple de 25 a 50 MPa, con una roca que se muestra fresca, sin alteración o meteorización.

Tabla 6.6. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-05.

Sondaje	Suelo/Roca	Tramo	RESIS	RQD	ESP	JC	AGUA	RMR	Clasificación
SC-05	Suelo	0,00 - 117,70							
	Roca	117,70-130,00	4	8	8	10	7	37	Mala
	Roca	130,00-139,10	12	17	10	25	7	71	Buena
	Roca	139,10-142,00	7	17	8	20	7	59	Regular
	Roca	142,00-145,10	12	20	10	30	7	79	Buena

La permeabilidad, de acuerdo a los ensayos Lefranc-Mandel efectuados dan como resultado $2,08 \times 10^{-03}$ cm/s y $3,36 \times 10^{-03}$ cm/s desde los 4,0 m hasta los 10,0 m, clasificándose como “media”. Desde los 14,0 m hasta los 50,0 m los valores son $2,78 \times 10^{-04}$ cm/s, $2,69 \times 10^{-04}$ cm/s, $1,77 \times 10^{-04}$ cm/s, $1,91 \times 10^{-04}$ cm/s, $6,82 \times 10^{-05}$ cm/s, $3,41 \times 10^{-04}$ cm/s, $2,10 \times 10^{-04}$ cm/s y $1,24 \times 10^{-05}$ cm/s clasificándose como “baja”. A los 54,0 m la permeabilidad es “media” con $1,14 \times 10^{-03}$ cm/s. Desde los 59,0 m hasta los 130,0 m se clasifica como “baja” con valores de $9,02 \times 10^{-04}$ cm/s, $1,96 \times 10^{-04}$ cm/s, $1,77 \times 10^{-04}$ cm/s, $2,29 \times 10^{-04}$ cm/s, $5,10 \times 10^{-04}$ cm/s, $2,16 \times 10^{-04}$ cm/s, $2,68 \times 10^{-04}$ cm/s, $2,38 \times 10^{-05}$ cm/s, $1,59 \times 10^{-04}$ cm/s, $2,79 \times 10^{-04}$ cm/s, $2,35 \times 10^{-04}$ cm/s, $3,94 \times 10^{-05}$ cm/s, $4,11 \times 10^{-05}$ cm/s, $1,19 \times 10^{-04}$ cm/s, $2,25 \times 10^{-04}$ cm/s. El último ensayo a los 139,0 m se clasifica como “baja” con $1,29 \times 10^{-04}$ cm/s. A los 140,5 m se realiza un ensayo Lugeon donde ocurre “*bypass*”.

En el tramo de los 142,30 m hasta los 142,50 m se realiza ensayo de compresión simple con resultado de 33,8 MPa.

6.2.6. SC-06

Se sitúa en la zona central del plinto, tiene una profundidad total de 170,00 m. Hasta los 164,00 m encontramos suelo compuesto por bolones, gravas y arena, de carácter polimíctico con tamaño promedio de 10 a 15 cm llegando hasta los 25 cm de longitud, presenta bordes redondeados y subredondeados con mala selección, en una matriz de arcilla y limo. Luego, hasta los 170,00 m la roca es volcánica de composición andesítica color gris, con 30% de fenocristales de plagioclasa euhedrales y subhedrales en masa fundamental afanítica cortada por vetillas de calcita.

El macizo rocoso posee un puntaje RMR de 62 clasificándose como “buena” calidad geotécnica (Tabla 6.7), un RQD entre 50% y 90% y resistencia a la compresión simple de 50 a 100 MPa. En cuanto a la permeabilidad, de acuerdo con los ensayos Lefranc-Mandel, desde los 3,5 m hasta los 15,3 m se clasifica como “media” con valores de $4,11 \times 10^{-03}$ cm/s, $2,81 \times 10^{-03}$ cm/s y $2,84 \times 10^{-03}$ cm/s. Desde los 19,3 m hasta los 40,4 m los ensayos son sin admisión. Desde los 44,0 m hasta los 65,0 m la permeabilidad es “baja” con valores de $1,21 \times 10^{-05}$ cm/s, $2,93 \times 10^{-05}$ cm/s, $3,02 \times 10^{-05}$ cm/s, $2,56 \times 10^{-04}$ cm/s y $3,34 \times 10^{-04}$ cm/s. Desde los 69,0 m hasta los 160,0 m los ensayos son sin admisión. Se realiza un ensayo Lugeon entre los 165,00 y 170,00 m, sin éxito ya que se produce un *bypass*.

En total se efectúan 33 ensayos de Lefranc-Mandel y 1 ensayo tipo Lugeon. Además de 1 ensayo

SPT a los 4,10 m dando como resultado rechazo.

Tabla 6.7. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-06.

Sondaje	Suelo/Roca	Tramo	RESIS	RQD	ESP	JC	AGUA	RMR	Clasificación
SC-06	Suelo	0,00 - 163,80							
	Roca	163,80-170,00	12	13	10	20	7	62	Buena

6.2.7. SC-07

Ubicado en la zona central del plinto en el valle con una profundidad de 164,00 m necesario para determinar el horizonte suelo-roca y obtener su calidad geotécnica. Desde la superficie hasta los 159,35 m se recupera suelo compuesto por bolones, gravas y arena de carácter polimícticos con tamaño promedio de 8 a 15 cm llegando hasta los 20 cm de longitud, presenta bordes redondeados y subredondeados, en una matriz de arcilla y limo.

La permeabilidad según los ensayos Lefranc-Mandel dan como resultado a los 4,0 m el ensayo es sin admisión, desde los 9,0 m hasta los 15,0 m los valores son $1,01 \times 10^{-02}$ cm/s y $1,61 \times 10^{-03}$ clasificándose como “media”, a los 19,0 m es “baja” con $6,47 \times 10^{-04}$ cm/s, a los 24,0 m el ensayo es sin admisión, desde los 29,0 m hasta los 40,0 m es “media” con $1,05 \times 10^{-03}$ cm/s, $3,47 \times 10^{-03}$ cm/s y $1,75 \times 10^{-03}$ cm/s, a los 44,0 m se “baja” con $6,91 \times 10^{-04}$ cm/s, a los 49,0 m es “muy baja” con $8,70 \times 10^{-06}$ cm/s, desde los 54,0 m hasta los 70,0 m es “baja” con valores de $1,62 \times 10^{-05}$ cm/s, $1,41 \times 10^{-04}$ cm/s, $1,11 \times 10^{-04}$ cm/s y $1,35 \times 10^{-05}$ cm/s, desde los 74,0 hasta los 80,0 m es “muy baja” con $5,89 \times 10^{-06}$ cm/s y $2,69 \times 10^{-06}$ cm/s, desde los 84,0 m hasta los 90,3 m el ensayo es sin admisión, desde los 94,0 m hasta los 100,0 m es “media” y “baja” con valores de $1,49 \times 10^{-03}$ cm/s y $1,82 \times 10^{-05}$ cm/s, desde los 100,3 m hasta los 160,0 m los ensayos son sin admisión.

Se recupera roca volcánica desde los 159,35 m hasta los 164,00 m, es de composición andesítica de color gris a pardo en zonas meteorizadas, presenta fenocristales de plagioclasa euhedrales y subhedrales con tamaño promedio 1 cm en una masa fundamental afanítica. El puntaje RMR obtenido para el tramo es de 30 (Tabla 6.8), lo que se asocia a una “mala” calidad geotécnica con roca triturada y resistencia a la compresión simple de 5 a 25 MPa y valor de RQD que no supera el 25%.

En total se realizan 31 ensayos de Lefranc-Mandel y 2 ensayos de Lugeon en los cuales no se logra levantar presión. En el tramo de los 162,30 m hasta los 162,50 m se ejecuta ensayo de compresión

simple con resultado de 25,0 MPa.

Tabla 6.8. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-07.

Sondaje	Suelo/Roca	Tramo	RESIS	RQD	ESP	JC	AGUA	RMR	Clasificación
SC-07	Suelo	0,00 - 159,35							
	Roca	159,35-164,00	2	3	8	10	7	30	Mala

6.2.8. SC-08

Ubicado en la zona central del plinto, se perfora hasta los 140,00 m de profundidad, encontrándose el horizonte suelo-roca a los 127,20 m. El material recuperado corresponde primeramente a suelo compuesto por bloques y gravas de origen volcánico, angulares y subangulares junto con sedimentos finos de tamaño arena, limo y arcilla. La permeabilidad de este tramo de acuerdo a los ensayos Lefranc-Mandel es desde los 4,0 m hasta los 50,0 “baja” y “muy baja” con valores de $6,85 \times 10^{-06}$ cm/s, $4,92 \times 10^{-05}$ cm/s, $6,66 \times 10^{-06}$ cm/s, $8,70 \times 10^{-06}$ cm/s, $5,25 \times 10^{-05}$ cm/s, $8,59 \times 10^{-06}$ cm/s, $1,81 \times 10^{-06}$ cm/s, $6,10 \times 10^{-06}$ cm/s y $1,21 \times 10^{-05}$ cm/s, desde los 53,76 m hasta los 135,0 m es “muy baja” con permeabilidades de $8,07 \times 10^{-06}$ cm/s, $7,73 \times 10^{-06}$ cm/s, $5,65 \times 10^{-06}$ cm/s, $3,22 \times 10^{-06}$ cm/s, $3,04 \times 10^{-07}$ cm/s, $8,75 \times 10^{-07}$ cm/s, $4,71 \times 10^{-07}$ cm/s, $3,71 \times 10^{-07}$ cm/s, $1,68 \times 10^{-06}$ cm/s, $8,59 \times 10^{-07}$ cm/s, $2,15 \times 10^{-06}$ cm/s, $8,71 \times 10^{-07}$ cm/s, $2,18 \times 10^{-06}$ cm/s, $1,49 \times 10^{-06}$ cm/s, $2,58 \times 10^{-06}$ cm/s, $3,65 \times 10^{-07}$ cm/s y $7,02 \times 10^{-06}$ cm/s.

La roca desde los 127,20 hasta los 140,00 m es brecha volcánica de composición andesítica de color gris oscuro a café claro con clastos polimícticos redondeados y subredondeados con tamaños de hasta 10 cm de diámetro con una moderada alteración a arcilla y clorita. Se presenta a lo largo de todo el sondaje con un puntaje RMR correspondiente a “regular” calidad geotécnica (Tabla 6.9), RQD 50% en promedio y resistencia a la compresión simple entre 25 y 50 MPa.

A los 8,60 m se realiza un ensayo SPT, cuyo N_{spt} es de 2 indicando una baja compacidad del suelo y resistencia a la compresión simple de 25 a 50 KPa. Con respecto a la permeabilidad de la roca, en el último ensayo de Lugeon ocurre *bypass*. En el tramo de los 139,60 m hasta los 140,00 m se realiza ensayo de compresión con resultado de 28,6 MPa.

Tabla 6.9. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-08.

Sondaje	Suelo/Roca	Tramo	RESIS	RQD	ESP	JC	AGUA	RMR	Clasificación
SC-08	Suelo	0,00 - 127,20							
	Roca	127,20-140,00	4	6	8	20	7	45	Regular

6.2.9. SC-09

Se ubica en la zona central del plinto, cuenta con 130,00 m de profundidad, recuperando suelo hasta los 113,00 m correspondientes a gravas y bloques de origen volcánico de composición andesítica, los clastos están fuertemente alterados a arcilla siendo estos angulares a subangulares con tamaños desde 3 cm a más de 20 cm de longitud. La permeabilidad con respecto a los ensayos Lefranc-Mandel tiene valores de $2,66 \times 10^{-03}$ cm/s, $1,11 \times 10^{-03}$ cm/s, $2,98 \times 10^{-03}$ cm/s, $3,17 \times 10^{-03}$ cm/s y $2,76 \times 10^{-03}$ cm/s desde los 4,2 m hasta los 25,0 m clasificándose como “media”, desde los 29,0 m hasta los 40,0 m es “baja” con $2,60 \times 10^{-04}$ cm/s, $3,11 \times 10^{-04}$ cm/s y $2,39 \times 10^{-04}$ cm/s, desde los 44,0 m hasta los 55,0 m los ensayos son sin admisión, desde los 59,0 m hasta los 65,0 m los valores son $2,62 \times 10^{-05}$ cm/s y $8,34 \times 10^{-05}$ cm/s clasificándose como “baja”, desde los 69,0 m hasta los 115,0 m los ensayos son sin admisión.

La roca recuperada entre los 113,00 m hasta los 130,00 m corresponde a una brecha volcánica, de composición andesítica, gris oscuro a café en zonas argilizadas con clastos de composición polimíctica de hasta 15 cm de longitud, el macizo rocoso presenta zonas de falla provocando fracturamiento de la roca la cual en las superficies de las discontinuidades tiene una pátina de óxido y además presentan generación de arcillas. El puntaje RMR de la roca está asociado a una “mala” calidad geotécnica (Tabla 6.10), RQD de 25 a 50% y resistencia a la compresión simple menor a 25 MPa. En cuanto a la permeabilidad de acuerdo a los ensayos Lugeon, ocurre *bypass* en ambos casos a los 120,0 m y 125,0 m.

Tabla 6.10. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-09.

Sondaje	Suelo/Roca	Tramo	RESIS	RQD	ESP	JC	AGUA	RMR	Clasificación
SC-09	Suelo	0,00 - 117,20							
	Roca	117,20-130,00	4	6	8	20	7	45	Regular

Se ejecuta ensayo SPT entre los 9,65 a 9,90 m de profundidad, donde ocurre rechazo. En el tramo de los 129,50 m hasta los 129,75 m se realiza ensayo de compresión simple con resultado de 36,8 MPa.

6.2.10. SC-10

Ubicado en el plinto derecho, cuenta con una profundidad de 50,00 m. El sondaje desde la superficie hasta 1,20 m está conformado por suelo compuesto por gravas con bordes

subredondeados y mala selección, en matriz de arcilla, limo y arena. Luego, hasta el final del sondaje, se recupera roca volcánica color gris de composición andesítica con 25% de fenocristales de plagioclasa euhedrales y subhedrales en masa fundamental afanítica. El macizo rocoso hasta los 15,00 m es de “regular” calidad geotécnica (Tabla 6.11) con resistencia a la compresión simple de 25 a 50 MPa y RQD que varía entre 25% y 50%. Desde los 15,00 m hasta los 28,80 m se observa una roca muy fracturada en una zona de falla con generación de arcillas, generalmente lavada y decolorada por la meteorización, posee “mala” calidad geotécnica de resistencia a la compresión simple de 1 a 5 MPa. La permeabilidad para este tramo según los ensayos Lefranc-Mandel tiene una “elevada” permeabilidad con $1,51 \times 10^{-01}$ cm/s a los 4,00 m. Desde los 9,0 m hasta los 25,0 m las permeabilidades son $2,37 \times 10^{-02}$ cm/s, $3,26 \times 10^{-03}$ cm/s, $1,87 \times 10^{-03}$ cm/s y $2,19 \times 10^{-03}$ clasificándose como “media”. Desde los 29,0 m hasta los 35,0 m es “baja” con $1,33 \times 10^{-04}$ cm/s y $6,15 \times 10^{-05}$ cm/s. Luego hasta los 34,00 m la roca es “regular” con un puntaje RMR de 58, posteriormente hasta los 45,00 m la roca se clasifica como “mala” calidad geotécnica y asociada zonas de fallas, finalmente hasta los 50,00 m la roca, según el puntaje RMR es clasificada como “regular” con RQD en promedio de 40% y resistencia a la compresión simple menor a 50 MPa. La permeabilidad según los ensayos Lugeon a los 35,0 m, 40,0 m y 45,0 m es de 0,0408 UL, *bypass* y 8,53 UL.

A los 23,50 m se realiza un ensayo SPT, donde ocurre “rechazo” al golpear 50 veces y penetrar 12 cm de longitud. En el tramo de los 47,00 m hasta los 47,20 m se realiza ensayo de compresión simple con resultado de 31,0 MPa.

Tabla 6.11. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-10.

Sondaje	Suelo/Roca	Tramo	RESIS	RQD	ESP	JC	AGUA	RMR	Clasificación
SC-10	Suelo	0,00 - 1,20							
	Roca	1,20 - 11,80	7	3	5	20	15	50	Regular
	Roca	11,80 - 15,00	7	8	8	20	15	58	Regular
	Roca	15,00 - 28,80	1	3	5	10	15	34	Mala
	Roca	28,80 - 34,00	7	8	8	20	15	58	Regular
	Roca	34,00 - 45,00	2	3	5	10	15	35	Mala
	Roca	45,00 - 50,00	7	8	8	20	7	50	Regular

6.2.11. SC-11

Se ubica en la zona baja del plinto derecho, con una profundidad de 80,00 m. Al inicio del sondaje se recuperan 0,5 m de suelo residual, luego hasta los 73,00 m aproximadamente la roca es volcánica

de color gris y marrón en zonas decoloradas por meteorización, de composición andesítica con 15% a 20% de fenocristales de plagioclasa euhedrales y subhedrales de 2 cm de longitud, en una masa fundamental afanítica con presencia de vetillas de calcita, en el primer tramo hasta los 16,50 m la roca tiene puntaje RMR de 75, clasificándose como “buena” (Tabla 6.12), con RQD de 70%, y resistencia a la compresión simple entre 50 y 100 MPa, luego hasta los 50,80 m, el macizo rocoso es clasificado como “regular” según su puntaje RMR de 55, después hasta los 63,50 m la roca es de “buena” calidad geotécnica, posteriormente hasta los 75,00 m aproximadamente se reconoce una extensa zona de falla donde la roca se encuentra muy fracturada y con generación de arcillas en la superficie de las discontinuidades, su puntaje RMR se 29 lo que la clasifica como “mala” calidad geotécnica. Los últimos 5,00 m de sondaje la roca corresponde a una brecha volcánica color gris rojizo de composición andesítica con clastos angulosos entre 2 cm y 7 cm en una matriz afanítica, su índice RMR es de 71, catalogándose como “buena”, presenta RQD entre 90% y 100%. Según los ensayos Lefranc-Mandel la permeabilidad a los 4,00 se encuentra sin admisión, desde los 9,0 m hasta los 15,0 m es “baja” con $5,83 \times 10^{-04}$ cm/s y $3,93 \times 10^{-05}$ cm/s, desde los 19,0 m hasta los 25,0 m es “media” con $2,13 \times 10^{-03}$ cm/s y $8,13 \times 10^{-02}$ cm/s. Desde los 29,0 m hasta los 50,0 m en los ensayos hay admisión franca. La permeabilidad asociada a los ensayos Lugeon en general es baja siendo su máximo valor de 5,25 UL. En el tramo de los 76,60 m hasta los 76,78 m se realiza ensayo de compresión simple con resultado de 27,8 MPa.

Tabla 6.12. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-11.

Sondaje	Suelo/Roca	Tramo	RESIS	RQD	ESP	JC	AGUA	RMR	Clasificación
SC-11	Suelo	0,00 - 0,50							
	Roca	0,50 - 16,50	12	13	10	25	15	75	Buena
	Roca	16,50 - 35,00	7	13	10	20	15	65	Buena
	Roca	35,00 - 50,80	12	3	5	20	15	55	Regular
	Roca	50,80 - 63,50	12	8	8	20	15	63	Buena
	Roca	63,50 - 75,00	4	3	5	10	7	29	Mala
	Roca	75,00 - 80,00	12	20	15	25	7	79	Buena

6.2.12. SC-12

Se ubica en la zona baja del plinto izquierdo, con el objeto de definir el grado de meteorización de la roca basal y sus características geotécnicas, llegando a una profundidad de 80,00 m. Hasta los 27,50 m, el sondaje está conformado por suelo compuesto por gravas y bolones con tamaño promedio de 3 a 10 cm con bordes subredondeados con mala selección, en una matriz de arcilla,

limo y arena. Su permeabilidad según los ensayos Lefranc-Mandel para el tramo es de $5,42 \times 10^{-04}$ cm/s a los 4,50 m clasificándose como “baja”, desde los 9,0 m hasta los 20,0 m es “muy baja” con valores de $9,97 \times 10^{-06}$ cm/s, $1,05 \times 10^{-06}$ cm/s y $2,66 \times 10^{-07}$ cm/s. A los 24,0 m es “prácticamente impermeable” con $9,63 \times 10^{-08}$ cm/s. Luego en el tramo desde los 27,70 m hasta los 40,00 m la roca es volcánica de color gris a marrón de composición andesítica con masa fundamental afanítica. Presenta un puntaje RMR hasta los 33,50 m de 67 clasificándose como “buena” (Tabla 6.13), luego hasta los 40,00 m la roca es “regular” con 54 puntos encontrándose una falla, donde el macizo rocoso está decolorado, con zonas oxidadas y generación de arcillas en las superficies de discontinuidad, finalmente hasta los 80,00 m, la roca es volcánica color gris, de composición andesítica con 15 a 20 % de fenocristales de plagioclasa euhedrales y subhedrales en una masa fundamental afanítica cortada por vetillas de calcita, el índice RMR es de 67 puntos, clasificando a la roca como “buena”, con RQD entre 90% y 100% y resistencia a la compresión simple entre 50 y 100 MPa, la roca fresca no tiene signos de meteorización o alteración. La permeabilidad en general es muy baja siendo el máximo valor de 5,63 UL a los 27,50 m y el mínimo de 0 UL desde los 40,0 m hasta los 65,0 m.

Tabla 6.13. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-12.

Sondaje	Suelo/Roca	Tramo	RESIS	RQD	ESP	JC	AGUA	RMR	Clasificación
SC-12	Suelo	0,00 - 27,50							
	Roca	27,50 - 33,50	7	20	8	25	7	67	Buena
	Roca	33,50 - 40,00	4	13	5	25	7	54	Regular
	Roca	40,00 - 80,00	12	20	8	20	7	67	Buena

Se ejecuta un ensayo SPT desde 5,50 a 5,95m, donde se produce rechazo. En el tramo de los 78,90 m hasta los 79,12 m se realiza ensayo de compresión simple con resultado de 45,5 MPa.

6.2.13. SC-13

Ubicado en la zona media del plinto izquierdo, el objetivo de esta perforación es definir el grado de meteorización de la roca basal y sus características geotécnicas, cuenta con una profundidad de 80,00 m. En el primer metro de perforación se recupera suelo residual, luego hasta los 38,50 m la roca corresponde a brecha volcánica color pardo a marrón con líticos polimícticos, en su mayoría andesíticos, de tamaño lapilli y bloque. Tiene un puntaje RMR de 38 catalogándose como “mala” (Tabla 6.14), RQD entre 25% y 50% y resistencia a la compresión simple entre 5 y 25 MPa, además

se reconocen fallas donde el macizo rocoso está fracturado, decolorado, oxidado y con generación de arcillas en las superficies de discontinuidad, además de estar cortado por vetillas rellenas de calcita. Luego hasta 67,10 m de profundidad la roca corresponde a brecha volcánica de color gris claro con líticos polimícticos de tamaño lapilli en base y bloque a techo, exhibe estructuras de flujo, piritas diseminadas y vetillas de calcita, tiene un puntaje RMR de 68 clasificándose como “buena”, el RQD varía entre 75% y 90% y resistencia a la compresión simple entre 25 y 50 MPa. Desde los 67,10 y hasta finalizar la perforación se recupera brecha volcánica de composición dacítica de color gris con vetillas de calcita y piritas diseminadas con las mismas características geomecánicas que la roca anterior.

Tabla 6.14. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-13.

Sondaje	Suelo/Roca	Tramo	RESIS	RQD	ESP	JC	AGUA	RMR	Clasificación
SC-13	Roca	0,00 - 38,60	2	8	8	10	10	38	Mala
	Roca	38.60 - 80,00	7	17	15	25	7	71	Buena

En cuanto a la permeabilidad según los ensayos Lefranc-Mandel, desde los 4,0 m hasta los 20,0 m las permeabilidades se clasifican como “baja” con valores de $2,84 \times 10^{-04}$ cm/s, $4,60 \times 10^{-04}$ cm/s, $3,07 \times 10^{-04}$ cm/s y $2,85 \times 10^{-04}$ cm/s. A los 20,0 m hay 5,71 UL y partir de los 25,00 m, la permeabilidad es baja con valor máximo de 3,63 UL, a los 40,0 m, y un valor mínimo de 0,03 UL a los 75,0 m de profundidad. En el tramo desde los 77,60 m hasta los 77,80 m se ejecuta ensayo de compresión simple con resultado de 43,8 MPa.

6.2.14. SC-14

Se ubica en la zona alta del plinto izquierdo con una profundidad de 50,00 m, necesario para determinar la calidad geotécnica del macizo rocoso. Desde la superficie hasta los 20,50 m se recupera suelo compuesto por bolones y gravas con tamaño promedio de 5 a 15 cm, con bordes redondeados a subredondeados y mala selección, en matriz de arcilla limo y arena. Luego hasta los 50,00 m se recupera posible brecha volcánica de color café a marrón oscuro, el macizo rocoso está muy fracturado con presencia de salbanda de falla y con la textura original obliterada alterada a arcillas, decolorada por meteorización en las superficies de discontinuidad, y asociada a una zona de falla que abarca desde los 25,80 m hasta los 36,60 m de profundidad.

El puntaje RMR obtenido en toda la extensión del sondaje es de 36 puntos catalogándose de “mala” calidad geotécnica (Tabla 6.15), con resistencia a la compresión simple de 1 a 5 MPa y RQD de 0%. Según los ensayos Lefranc-Mandel desde los 9,0 m la permeabilidad es “elevada” con $5,41 \times 10^{-01}$ cm/s. A los 14,0 m es “media” con $5,52 \times 10^{-03}$ cm/s y a los 19,0 m es “baja” con $7,43 \times 10^{-04}$ cm/s. Luego es variada desde una clasificación moderada con 9,83 UL a los 20,0 m y en profundidad disminuye la permeabilidad a baja con valores de 6,44 UL, a los 35,0 m, y 2,00 UL a los 40,0 m. En los ensayos de los 25,0 m y 30,0 m ocurre *bypass*.

Tabla 6.15. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-14.

Sondaje	Suelo/Roca	Tramo	RESIS	RQD	ESP	JC	AGUA	RMR	Clasificación
SC-14	Suelo	0,00 - 20,60							
	Roca	20,60 - 50,00	1	3	5	20	7	36	Mala

En total se ejecutan 6 ensayos Lugeon y 3 ensayos de Lefranc-Mandel en total. En el tramo desde los 33,20 m hasta los 33,38 m se realiza ensayo de compresión simple con resultado de 23,8 MPa.

6.2.15. SC-15

Se ubica en la zona alta del plinto izquierdo con una profundidad de 40,00 m para determinar la calidad geotécnica del macizo rocoso. Hasta los 32,60 se recupera suelo compuesto principalmente de partículas arena, arcilla, grava y bloques volcánicos de composición andesítica de hasta 30 cm de diámetro, son angulosos a subangulosos de baja compacidad, fuertemente meteorizados y alterados, en ocasiones disgregados completamente. Luego, hasta finalizar el sondaje, se reconoce una posible roca volcánica de textura parcialmente obliterada, es de color café amarillento claro a rojo azulado con fenocristales de plagioclasa y presencia de vetillas de calcita, intensamente meteorizada y argilizada. Además, se presentan unas fallas con generación de salbanda de falla a los 34,60 y 39,20 m de donde el macizo rocoso esta triturado y decolorado, con presencia de óxidos la generación de arcillas en las superficies de discontinuidad.

El puntaje RMR en el tramo desde los 32,60 m hasta los 40,00 m es 47, es decir, tiene “regular” calidad geotécnica (Tabla 6.16), con resistencia a la compresión simple menor a 50 MPa y RQD entre 50 y 70%.

Se realizan en total 7 ensayos de Lefranc-Mandel que muestran una permeabilidad de $3,49 \times 10^{-03}$ cm/s a los 4,00 m clasificándose como “media”, desde los 9,0 m hasta los 20,0 m es “baja” con

6,51x10⁻⁰⁴ cm/s, 4,63x10⁻⁰⁴ cm/s y 4,57x10⁻⁰⁴ cm/s. a los 24,0 m es “media” con 2,38x10⁻⁰³ cm/s. a los 29,0 m es “baja” con 6,92x10⁻⁰⁴ cm/s y a los 34,0 m es “media” con 1,23x10⁻⁰³ cm/s. A los 35,0 m de profundidad se realiza un ensayo Lugeon ocurriendo *bypass*. En el tramo desde los 39,75 m hasta los 40,00 m se realiza ensayo de compresión simple con resultado de 29,6 MPa.

Tabla 6.16. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-01.

Sondaje	Suelo/Roca	Tramo	RESIS	RQD	ESP	JC	AGUA	RMR	Clasificación
SC-15	Suelo	0,00 - 32,60							
	Roca	32,60 - 40,00	4	8	8	20	7	47	Regular

6.2.16. SC-16

Se ubica en la entrada del túnel de desvío, con una profundidad de 40,00 m. En toda su extensión el macizo rocoso corresponde a una posible brecha volcánica de textura parcialmente obliterada, de color pardo a marrón con líticos polimícticos, en su mayoría andesíticos de tamaño lapilli. La roca presenta índices de flujo, vetillas de calcita y moderada a alta alteración a arcillas. Hasta los 31,00 m aproximadamente, la roca según su puntaje RMR, es considerada “mala” con un RQD de entre un 25% a 50% (Tabla 6.17), resistencia a la compresión simple menor a 25 MPa, en este tramo se reconoce zona de falla desde los 19,10 m hasta los 25,10 m de profundidad y la roca está decolorada, fracturada con presencia de óxidos y generación de arcillas en las superficies de discontinuidad. Luego hasta terminar el sondaje, el macizo rocoso se clasifica como “regular” con un puntaje RMR de 54, RQD entre 50% y 80% y una resistencia a la compresión simple de 25 a 50 MPa.

Tabla 6.17. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-16.

Sondaje	Suelo/Roca	Tramo	RESIS	RQD	ESP	JC	AGUA	RMR	Clasificación
SC-16	Roca	0,00 - 30,90	4	8	8	10	10	40	Regular
	Roca	30,90 - 40,00	7	13	10	20	7	57	Regular

En cuanto a la permeabilidad de acuerdo a los ensayos Lefranc-Mandel Desde los 4,0 m hasta los 15,0 la permeabilidad es “baja” y “media” con valores de 2,32x10⁻⁰⁴ cm/s, 9,92x10⁻⁰³ cm/s y 2,27x10⁻⁰⁴ cm/s. Desde los 34,0 m hasta los 40,0 m es “baja” con valores de 4,30x10⁻⁰⁴ cm/s y 4,31x10⁻⁰⁴ cm/s. La permeabilidad con respecto a los ensayos Lugeon efectuados, es de 5,5 UL a

los 15,0 m, *bypass* a los 20,0 m y 23,73 UL a los 25,0 m de profundidad. En el tramo desde los 39,85 m y los 40m se realiza ensayo de compresión simple con resultado de 28,4 MPa.

6.2.17. SC-17

Con una profundidad de 50,00 m se ubica en la zona de salida del túnel de desvío. A lo largo de todo el sondaje se recupera roca volcánica de composición andesítica de color gris oscura con fenocristales de plagioclasa de 2 a 8 mm de longitud, presencia de vetillas de calcita y en su extremo final se encuentra moderadamente argilizada.

El puntaje RMR desde la superficie hasta los 12,60 m es de 65 puntos, corresponde a una calidad geotécnica “buena” (Tabla 6.18), con resistencia a la compresión simple entre 50 y 100 MPa y promedio de RQD de 50-60%, en este tramo se reconocen fallas a los 7,35 y 12,10 m de profundidad, el macizo rocoso está fracturado con zonas oxidadas y generación de arcillas en superficies de discontinuidad. Luego, desde los 12,60 hasta los 24,00 m la roca es de “regular” calidad geotécnica con resistencia a la compresión simple entre 25 y 50 MPa y promedio RQD entre 25 y 50%, posteriormente desde los 24,00 m hasta los 31,90 m la roca es de “muy buena” calidad con 81 puntos, la resistencia asociada se encuentra entre 100 – 250 MPa y el RQD entre 70% y 100%. Desde los 31,90 m hasta los 36,20 m tiene “regular” calidad con 47 puntos, se reconoce una falla entre los 34,00 y 36,00 m aproximadamente, donde la roca se encuentra fracturada, decolorada y en las superficies de discontinuidad hay generación de arcillas y zonas oxidadas, presenta una resistencia a la compresión simple menor a 50 MPa y un promedio RQD de 30%. Finalmente, hasta los 50,00 m la calidad aumenta a “regular” con 54 puntos, posee una resistencia a la compresión simple de 25 a 50 MPa y un promedio de RQD de 50 a 75%, en este último tramo también se reconoce una falla a los 41,50 con las mismas características mencionadas anteriormente.

Tabla 6.18. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-17.

Sondaje	Suelo/Roca	Tramo	RESIS	RQD	ESP	JC	AGUA	RMR	Clasificación
SC-17	Roca	0,00 - 12,60	7	8	10	25	15	65	Buena
	Roca	12,60 - 24,00	7	8	10	25	7	57	Regular
	Roca	24,00 - 31,90	12	17	15	30	7	81	Muy Buena
	Roca	31,90 - 36,20	4	8	8	20	7	47	Regular
	Roca	36,20 - 50,00	4	13	10	20	7	54	Regular

Sus permeabilidades según los ensayos Lefranc-Mandel desde los 4,00 m hasta los 15,00 m son sin admisión y a los 19,00 m la permeabilidad es “baja” con $2,92 \times 10^{-05}$ cm/s. Las permeabilidades de la roca son bajas con valores de 2,19 UL a los 25,0 m, 0,42 UL a los 30,0 m, 0,61 UL a los 35,0 m, ocurriendo *bypass* en el ensayo a los 20,00 m. A profundidad de 40,0 m y 45,0 m los valores son 1,95 UL y 2,7 UL, respectivamente.

En total se realizaron 6 ensayos Lugeon y 4 ensayos de Lefranc-Mandel. En el tramo desde los 45,75 m hasta los 46,00 m se realiza ensayo de compresión simple con resultado de 38,6 MPa.

6.2.18. SC- 18

Se ubica en la zona media del rápido de descarga, con una profundidad de 57,3 m. Su finalidad es caracterizar el suelo de fundación del cajón disipador y definir el perfil de roca basal. Hasta los 47,30 m comprende suelo compuesto por bolones y gravas de composición polimíctica con tamaños promedio de 7 cm llegando hasta los 20 cm de longitud, presentan bordes angulosos y subangulosos con mala selección, en una matriz fina de arcilla, limo y arena. Luego y hasta finalizar el sondaje se reconoce brecha volcánica decolorada marrón y verde, moderadamente meteorizada, de composición andesítica con clastos angulosos y subangulosos de tamaños en promedio de 3 cm llegando hasta los 10 cm, en una matriz de grano fino con presencia de dendritas de manganeso entre las discontinuidades.

Desde los 47,30 hasta los 57,30 m la roca es de “regular” calidad geotécnica con 57 puntos (Tabla 6.19), posee una resistencia a la compresión simple de 25 a 50 MPa, y RQD en promedio de 56%. La permeabilidad, de acuerdo con los ensayos de Lefranc-Mandel Desde los 4,0 m hasta los 20,0 m es “baja” con valores de $8,28 \times 10^{-04}$ cm/s, $2,41 \times 10^{-04}$ cm/s, $2,23 \times 10^{-04}$ cm/s y $7,14 \times 10^{-05}$ cm/s. Según los ensayos Lugeon realizados desde los 20,0 m de profundidad hasta los 52,3 m, las permeabilidades son bajas con valores máximos de 2,21 UL a los 40,0 m y 0,84 UL a los 45,0m. En el tramo de los 54,70 m hasta los 54,85 m se realiza ensayo de compresión simple con resultado de 39,4 MPa.

Tabla 6.19. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-18.

Sondaje	Suelo/Roca	Tramo	RESIS	RQD	ESP	JC	AGUA	RMR	Clasificación
SC-18	Suelo	0,00 - 47,30							
	Roca	47,30 - 57,30	4	13	8	25	7	57	Regular

6.2.19. SC-19.

Se ubica en la zona media derecha del rápido de descarga, con 52,3 m de profundidad. Su finalidad es caracterizar el suelo de fundación del cajón disipador y definir el perfil de roca basal. Hasta los 15,00 m aproximadamente, el sondaje está conformado por suelo color café rojizo oscuro, compuesto por fragmentos tamaños arena, grava y bolones de composición polimíctica, en una matriz fina de limo y arcilla de mala calidad geotécnica y alta permeabilidad. Luego hasta los 48,0 m se reconoce una posible brecha volcánica con clastos angulosos a subredondeados, que miden desde algunos milímetros hasta 10 cm, son composición polimíctica con algunos clastos muy meteorizados, fracturados y alterados a arcillas principalmente, se encuentran 2 zonas de falla desde los 22,50 hasta los 30,00 m y desde los 36,00 m hasta los 40,00 m de profundidad donde el macizo rocoso esta triturado, decolorado por meteorización y con generación de arcillas en las superficies de discontinuidad.

Desde los 15,00 m hasta los 25,75 m el puntaje RMR es de 47 clasificándose como “regular” (Tabla 6.20) con RQD entre 25 % y 70 % y resistencia a la compresión simple entre 25-50 MPa. Luego, hasta los 45,00 m disminuye su calidad geotécnica a 31 puntos clasificándose como “mala”. El último tramo desde los 45,00 m hasta los 52,30 m se recupera roca volcánica de composición andesítica gris oscuro con fenocristales de plagioclasa de hasta 5 mm de longitud en una masa fundamental afanítica, moderadamente meteorizada, con resistencia a la compresión simple de 25 a 50 MPa, valores de RQD que varían de 50% a 75% y con puntaje RMR de 52 clasificándose como “regular” calidad geotécnica.

Tabla 6.20. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-19.

Sondaje	Suelo/Roca	Tramo	RESIS	RQD	ESP	JC	AGUA	RMR	Clasificación
SC-19	Suelo	0,00 - 15,00							
	Roca	15,00 - 25,75	4	8	8	20	7	47	Regular
	Roca	25,75 - 45,00	1	8	5	10	7	31	Mala
	Roca	45,00 - 52,30	4	13	8	20	7	52	Regular

La permeabilidad es de $4,20 \times 10^{-02}$ cm/s a los 4,00 m clasificándose como “media”. Desde los 9,00 hasta los 25,0 m es “baja” y “media” con valores que varían de $2,13 \times 10^{-04}$ cm/s, $2,05 \times 10^{-04}$ cm/s, $3,39 \times 10^{-03}$ cm/s, $4,45 \times 10^{-03}$ cm/s, $5,32 \times 10^{-04}$ cm/s, $7,88 \times 10^{-04}$ cm/s, $3,30 \times 10^{-04}$ cm/s, $1,47 \times 10^{-03}$ cm/s, $1,63 \times 10^{-04}$ cm/s y $1,70 \times 10^{-04}$ cm/s.

Se ejecutó un ensayo SPT entre los 11,45 y 11,90 m obteniéndose un N (número de golpes) de 55, lo que clasifica a los sedimentos como de alta compacidad. Mientras que, en el tramo desde los 51,70 m hasta los 51,95 m se realiza ensayo de compresión simple con resultado de 27,8 MPa.

6.2.20. SC-20

Se ubica en la zona del dissipador de crecidas y la perforación llega hasta los 58,00 m de profundidad. Se encuentra el horizonte suelo-roca a los 52,55 m recuperándose suelo compuesto por sedimentos arena, limo y arcillas de baja compacidad junto con gravas y bolones de composición polimícticos de origen volcánico correspondientes principalmente a clastos de rocas andesíticas angulares y subangulares con tamaños hasta 30 cm de longitud.

La permeabilidad con respecto a los ensayos Lefranc-Mandel desde los 4,0 m hasta los 15,0 m es “media” con $1,27 \times 10^{-02}$ cm/s, $2,20 \times 10^{-03}$ cm/s y $1,57 \times 10^{-03}$ cm/s. Desde los 19,0 m hasta los 50,0 m es “baja” con valores de $3,88 \times 10^{-04}$ cm/s, $2,59 \times 10^{-04}$ cm/s, $4,35 \times 10^{-04}$ cm/s, $3,33 \times 10^{-05}$ cm/s, $2,82 \times 10^{-05}$ cm/s, $6,90 \times 10^{-04}$ cm/s y $1,35 \times 10^{-04}$ cm/s. El ensayo a los 54,0 m es sin admisión.

La roca recuperada desde los 52,55 m está triturada y corresponde a roca volcánica de composición andesítica gris oscura, la cual se presenta moderadamente argilizada en las caras de las discontinuidades. El puntaje RMR asignado está asociado a una “mala” calidad geotécnica de la roca (Tabla 6.21), RQD menor a 25% y resistencia a la compresión simple entre 1 y 25 MPa. Con respecto a la permeabilidad, en el único ensayo Lugeon realizado ocurre *bypass*. Por otro lado, a los 2,40 m se ejecuta ensayo SPT donde se produce rechazo.

Tabla 6.21. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-20.

Sondaje	Suelo/Roca	Tramo	RESIS	RQD	ESP	JC	AGUA	RMR	Clasificación
SC-20	Suelo	0,00 - 52,55							
	Roca	52,55 - 58,00	4	3	8	10	7	32	Mala

6.2.21. SC-21

Se ubica en la zona de inundación del embalse con una profundidad de 110,00 m. Hasta los 76,00 m de profundidad se recupera suelo compuesto por bolones, gravas y arena en una matriz de limo y arcilla, con tamaño promedio de 12 cm llegando hasta los 25 cm de longitud, poseen bordes subredondeados a redondeados de mala selección y baja compacidad, clastos de composición

andesítica y de carácter polimícticos. Desde los 76,00 m hasta los 110,00 m se reconoce roca volcánica de composición andesítica de color gris, con un 25% de fenocristales de plagioclasa euhedrales y subhedrales en una masa fundamental afanítica, con presencia de vetillas de calcita. A los 83,00 m; 87,30 m; 98,00 m; 105,00 m y 108,3 m de profundidad se observan zonas de fallas, donde el macizo rocoso está fracturado y oxidado por la meteorización, además exhibe generación de arcillas en superficies de discontinuidad.

La permeabilidad desde la superficie hasta los 40,0 m es “muy baja” y “baja” con valores de $5,08 \times 10^{-06}$ cm/s, $3,16 \times 10^{-05}$ cm/s, $9,97 \times 10^{-06}$ cm/s, $3,78 \times 10^{-05}$ cm/s, $1,34 \times 10^{-05}$ cm/s, $3,41 \times 10^{-05}$ cm/s, $1,46 \times 10^{-06}$ cm/s y $1,62 \times 10^{-06}$ cm/s. Desde los 44,0 m hasta los 50,0 m los ensayos son sin admisión. A los 54,0 m la permeabilidad es “baja” con $2,16 \times 10^{-04}$ cm/s. A los 59,0 m es sin admisión. A los 64,0 m “baja” con $1,85 \times 10^{-05}$ m. A los 69,0m es sin admisión. A los 74,0 m es “muy baja” con $5,17 \times 10^{-07}$ cm/s y a los 79,0 m el ensayo es sin admisión.

El puntaje RMR para el tramo de los 77,00 m hasta los 88,70 m es de 47 asociado a una “regular” calidad geotécnica (Tabla 6.22), resistencia a la compresión simple entre 25 y 50 MPa y permeabilidad baja de 2,8 UL, desde los 88,70 m hasta los 108,30 m aumenta el puntaje a 65 que se clasifica a una “buena” calidad con baja permeabilidad de 1,88 UL, llegando al final del tramo 0,12 UL. Desde los 108,30 m hasta los 110,00 m posee una “regular” calidad geotécnica con 44 puntos.

Tabla 6.22. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-21.

Sondaje	Suelo/Roca	Tramo	RESIS	RQD	ESP	JC	AGUA	RMR	Clasificación
SC-21	Suelo	0,00 - 77,00							
	Roca	77,00 - 88,70	4	8	8	20	7	47	Regular
	Roca	88,70 - 108,30	12	13	8	25	7	65	Buena
	Roca	108,30 - 110,00	4	3	5	25	7	44	Regular

6.2.22. SC-22

Se ubica en la zona de inundación del embalse, llegando hasta los 85,00 m de profundidad. Desde la superficie hasta los 81,20 m se recupera suelo compuesto por bolones, gravas y arena en una matriz de limo y arcilla, con tamaño promedio de 7 a 20 cm llegando hasta los 30 cm de longitud, poseen bordes subredondeados a redondeados de mala selección y baja compacidad, clastos de composición andesítica y de carácter polimícticos. Desde los 81,20 m hasta el final del sondaje se

encuentra roca volcánica de color gris de composición andesítica con 25 % de fenocristales de plagioclasa euhedrales y subhedrales en masa fundamental afanítica.

El puntaje RMR desde los 81,20 m hasta los 85,00 m es de 37 y se asocia a una “mala” calidad geotécnica de la roca (Tabla 6.23), tiene resistencia a la compresión simple de 5 a 25 MPa y RQD menor a 25%. La permeabilidad, de acuerdo con los ensayos de Lefranc-Mandel desde los 4,0 m hasta los 44,0 m es “baja” y “muy baja” con valores de $1,14 \times 10^{-04}$ cm/s, $7,80 \times 10^{-06}$ cm/s, $6,33 \times 10^{-06}$ cm/s, $8,65 \times 10^{-06}$ cm/s, $1,30 \times 10^{-05}$ cm/s, $6,68 \times 10^{-06}$ cm/s, $8,72 \times 10^{-06}$ cm/s, $1,10 \times 10^{-05}$ cm/s y $2,87 \times 10^{-06}$ cm/s. A los 49,0 m es “muy baja” con $7,79 \times 10^{-07}$ cm/s. A los 54,0 m es “prácticamente impermeable” con $7,85 \times 10^{-08}$ cm/s. A los 59,0 m en ensayo es sin admisión. A los 64,0 m es “prácticamente impermeable” con $6,86 \times 10^{-08}$ cm/s. Desde los 69,0 m hasta los 79,0 m los ensayos son sin admisión y a los 84,0 m es “prácticamente impermeable” con $6,77 \times 10^{-09}$ cm/s. Según los ensayos Lugeon la permeabilidad es baja con valores máximos de 2,21 UL.

Tabla 6.23. Variación del puntaje RMR por tramo en el sondaje SC-22.

Sondaje	Suelo/Roca	Tramo	RESIS	RQD	ESP	JC	AGUA	RMR	Clasificación
SC-22	Suelo	0,00 - 81,20							
	Roca	81,20 - 85,00	2	3	5	20	7	37	Mala

En total se ejecutan 17 ensayos de Lefranc-Mandel y 1 ensayo de penetración estándar (SPT), entre los 27,00 y 27,10 m, donde se produce rechazo.

6.3. ESTRUCTURAS

6.3.1. Estribo Derecho

En el apoyo derecho (Figura 6.2) se aprecian sobre la superficie, rocas volcánicas que se clasifican como andesitas de tipo ocoíta, con fenocristales de plagioclasa de 2 cm de longitud en masa fundamental afanítica, es de color rojizo a marrón con patinas de óxido de hierro en zona alterada y color gris en roca fresca, el macizo rocoso se asocia al Miembro Ocoa de la Formación Veta Negra.

El sondaje SC-10 realizado en la parte superior del cerro, desde 1,20 m hasta 15,00 m de profundidad, se presenta de acuerdo a la clasificación RMR de Bieniawski (1979) como “regular” calidad geotécnica (50 y 58 puntos de RMR), sin embargo, desde los 15,00 m hasta los 28,80 m de

profundidad disminuye su calidad a “mala” (34 puntos de RMR) asociado a zonas de falla con generación de arcillas. Desde los 28,80 m hasta los 34,00 m la roca posee “regular” calidad con 58 puntos, desde los 34,00 m hasta los 45,00 m el puntaje disminuye a 35 puntos clasificándose la roca como “mala”. Finalmente, desde los 45,00 m hasta los 50,00 m aumenta su calidad a “regular” con 50 puntos.

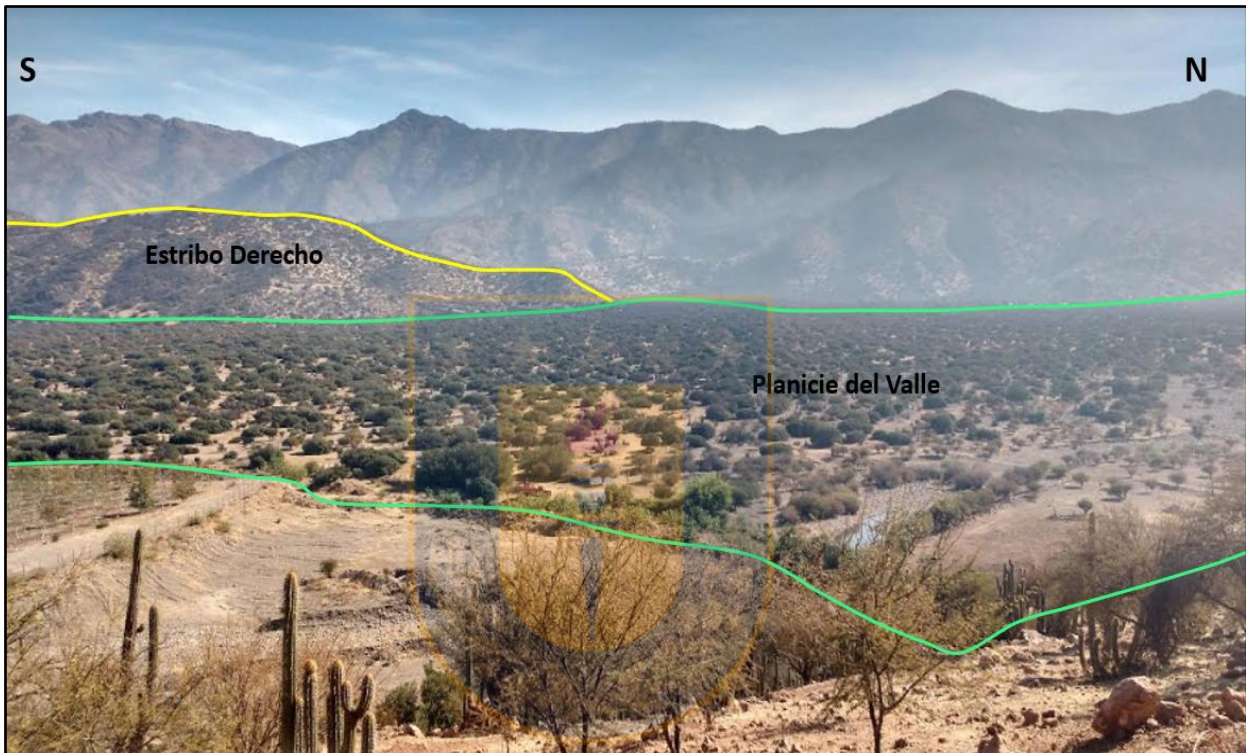


Figura 6.2. Valle del Estero Catemu. Estribo derecho y planicie del valle, desde el estribo izquierdo.

El macizo rocoso en el sondaje SC-11 se clasifica desde los 0,50 m hasta los 35,00 m como “buena” (con 75 y 65 puntos de RMR), desde los 35,00 m hasta los 50,80 m disminuye su puntaje a 55 clasificándose como “regular” calidad, desde los 50,0 m hasta los 63,50 m aumenta a “buena” calidad con 63 puntos, desde los 63,50 m hasta los 75,00 m se clasifica como “mala” calidad con 29 puntos asociado a zona de falla con generación de arcillas, finalmente desde los 75,00 m hasta los 80,00 m aumenta su puntaje a 79 clasificándose la roca como “buena”.

En general, la roca se encuentra con un rango aproximado de resistencia a la compresión simple de 100 y 250 MPa, con un bajo grado de meteorización y decolorada en algunas zonas de discontinuidades. Estas se encuentran con separación entre 0,06 m - 0,2 m y pasando los 60 cm en

zonas de mejor calidad, son rugosas con relleno blando de arcillas menor a 5 mm. Las zonas de falla de los sondajes SC-10 y SC-11 pueden estar asociadas a fallas de tipo normal que limitan el valle del estero Catemu.

Con respecto a los ensayos Lugeon realizados a lo largo de los sondajes, estos representan al macizo rocoso con una baja a media permeabilidad para el SC-11 con valores menores a 5,25 UL, mientras que el sondaje SC-10 posee una alta permeabilidad en el último tramo de roca, el cual es concordante con la roca fracturada, con valor de 17,06 UL.

En este estribo no se proyectan obras anexas a construir, como túnel de desvío o evacuador de crecidas, salvo el plinto del muro, geotécnicamente es una alternativa válida para el anclaje del estribo, siempre y cuando se considere una exhaustiva campaña de inyecciones en las zonas de falla y rocas de mala calidad geotécnica presentes en los sondajes.

6.3.2. Estribo Izquierdo

El estribo izquierdo (Figura 6.3) se encontrará fundado sobre rocas de la Formación Las Chilcas. Estas rocas volcánicas grises de tonos oscuros, claros y verdosos se presentan con una fuerte alteración hidrotermal y moderada meteorización con resistencias a la compresión simple estimadas que generalmente no superan los 50 MPa, evidenciado en los sondajes superiores SC-14 y SC-15, en donde la roca encuentra totalmente obliterada y con una clasificación RMR de “mala” y “regular” calidad geotécnica respectivamente.

Según la clasificación RMR los sondajes inferiores SC-12 y SC-13, varían de “mala” a “buena” calidad geotécnica a medida que aumenta la profundidad.

La permeabilidad de la roca asociada a los diferentes valores Lugeon varia de muy baja a moderada, disminuyendo la permeabilidad a medida que se profundiza en el macizo rocoso.

La morfología de este estribo muestra pendientes que varían entre un 15 a 50%, otro rasgo importante es que existe un portezuelo de menor altura detrás de este apoyo correlacionado a un lineamiento importante de rumbo NNW-SSE. De hecho, es posible apreciar una serie de tres a cuatro portezuelos bajos similares alineados en dirección NNW-SSE, tanto hacia el norte como hacia el sur de dicho portezuelo.

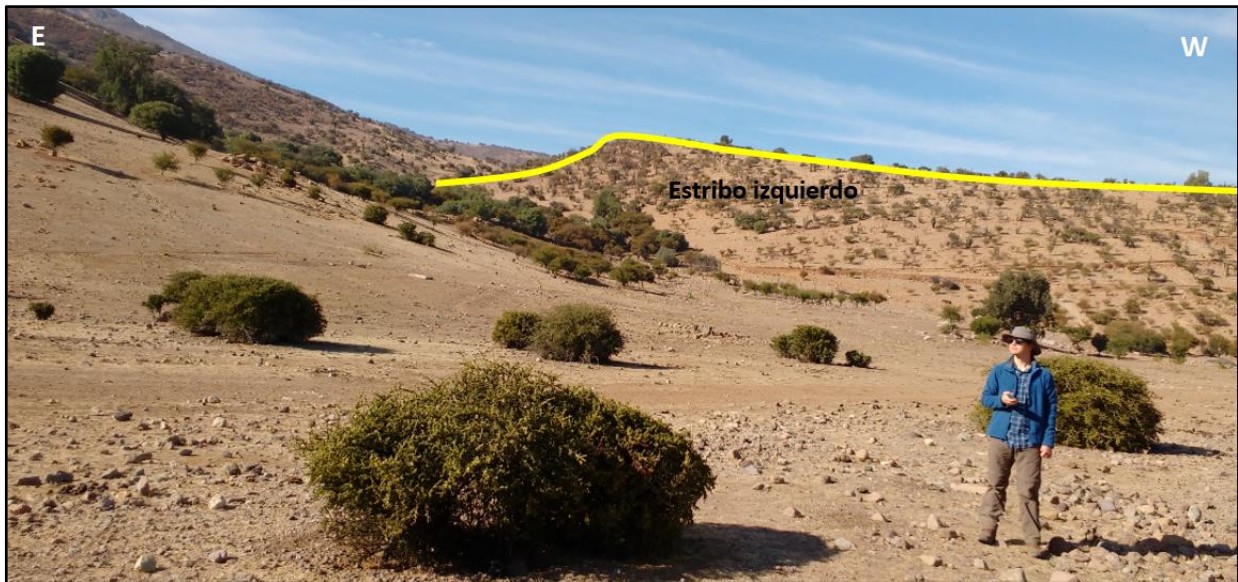


Figura 6.3. Vista hacia el estribo izquierdo.

Las unidades cuaternarias presentes en este apoyo, corresponden a escombros de falda (Qe) y depósitos de deslizamiento (Qd) hasta los 40 m de profundidad aproximadamente. Estos depósitos gravitacionales (Qd) se presentan caóticos, angulares en una matriz limo-arcillosa de tonos amarillentos y rojizos. Sobreyacen a la roca volcánica de baja calidad geotécnica de la Formación Las Chilcas.

Las zonas de falla identificadas en los sondajes superiores se asocian a una falla normal que limita el valle del Estero Catemu, la roca se presenta obliterada y muy fracturada con salbanda de falla especialmente en el sondaje SC-14, con rumbo aparente NNW-SSE.

Las diaclasas en los sondajes superiores se encuentran muy meteorizadas con generación de arcillas, poseen características rugosas y rellenos blandos mayores a 5 mm. Mientras que los inferiores la separación entre las diaclasas es mayor, aumentando el RQD y con características rugosas y relleno blando menor a 5 mm.

Es importante recalcar que parte del túnel se proyectará en la zona de falla y en el tramo de peor calidad geotécnica, incluso en la zona de remoción antigua (Qd), por lo cual es importante subrayar que el túnel de desvío debe diseñarse con la fortificación adecuada asumiendo tramos con suelos poco competentes con posibles arcillas expansivas.

6.3.3. Valle del Estero Catemu

En este sector el macizo rocoso se encuentra totalmente cubierto por depósitos fluvio-aluvionales constituido principalmente por bolones, gravas y arena en una matriz de limo y arcillas. Tienen una potencia variable desde los bordes hacia el centro del valle, encontrándose la roca a una profundidad de 159,35 m en el sondaje central SC-07 y cercano al estribo izquierdo y derecho a una profundidad de 19,00 m y 32,50 m respectivamente.

El macizo rocoso en profundidad se clasifica como andesita de color gris a pardo con fenocristales de plagioclasa en una masa fundamental afanítica correlacionable con el Miembro Ocoa de la Formación Veta Negra.

Las permeabilidades de la roca en las faldas del estribo izquierdo son bajas con valores desde 0,05 UL llegando hasta 1,9 UL y en las faldas del estribo derecho hasta 2,2 UL.

Superficialmente se observa una pendiente hacia el sureste en dirección al estribo izquierdo, asociado al cauce del río ubicado en este sector.

6.3.4. Lineamientos

De acuerdo a la interpretación fotogeológica, se han encontrado estructuras de rumbo principales NW-SE y NE-SW absolutamente coherentes con aquellas estructuras mayores indicadas en planos geológicos de carácter más regional como en la Hoja de Quillota y Portillo. En efecto, durante el actual estudio fue posible constatar mediante imágenes satelitales, la ocurrencia de fallas con tales orientaciones, siendo la más importante aquella de dirección NW-SE, identificada a través de un extenso lineamiento que pasa inmediatamente al este del portezuelo, en el apoyo izquierdo y que une dicho portezuelo con otros más hacia el norte y hacia el sur (Figura 6.4).

6.4. GEOLOGIA Y GEOTECNIA DE OBRAS ANEXAS

6.4.1. Túnel de Desvío

El análisis geológico y geotécnico en esta obra ubicada en el estribo izquierdo, se realiza mediante el estudio de las prospecciones realizadas en el lugar, correspondiente a la información obtenida de los sondajes:

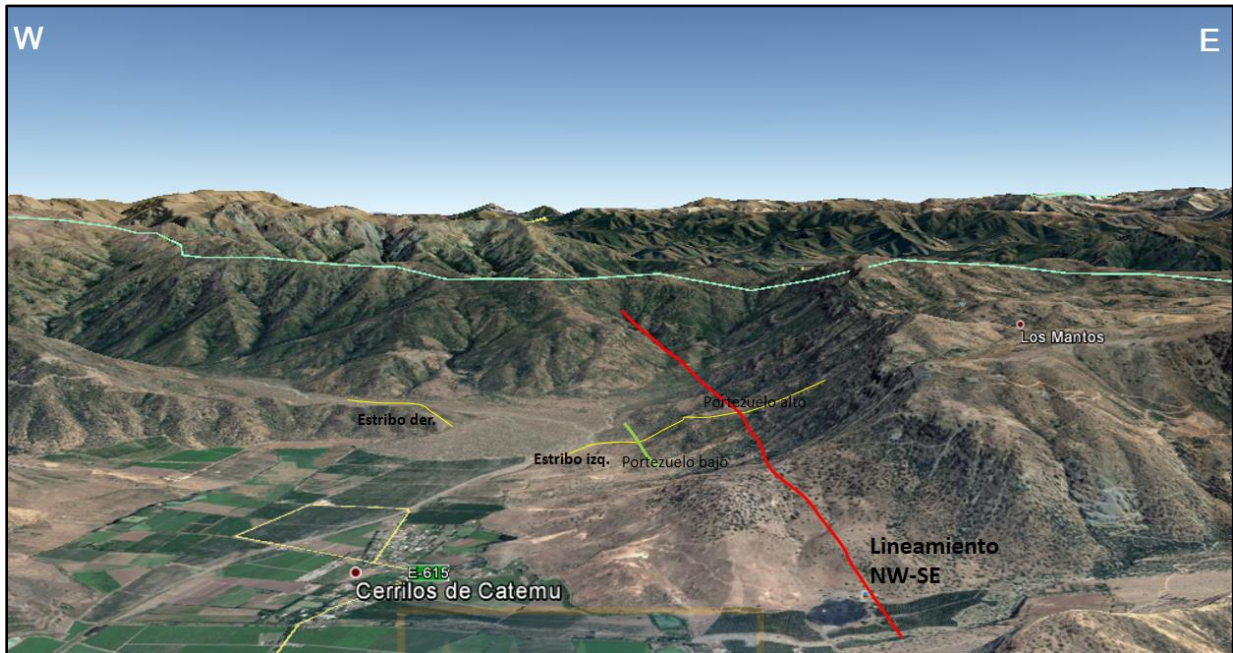


Figura 6.4. Lineamiento identificado en estribo izquierdo. Correspondiente a una potencial falla de rumbo NW-SE.

-SC-16

-SC-17

El portal de entrada del túnel de desvío como se puede observar en el perfil geológico del mapa (Anexo A), se deberá excavar en depósitos cuaternarios no consolidados correspondientes a escombros de falda y conos de talud principalmente (Qe), se encuentra el nivel de agua subterránea (NAS) a 13,00 m aproximadamente según la proyección de la información obtenida en el sondaje SC-17. Posteriormente, el túnel se proyectará en toda su extensión (328,00 m de longitud) en rocas de la Formación Las Chilcas (Klc) afectadas por alteración hidrotermal. A los 100,00 m desde el portal de entrada se identifica rocas de “regular” calidad geotécnica no superior a 50 MPa de resistencia a la compresión simple, la sobreyacen sobre el techo del túnel, rocas de “muy buena” calidad geotécnica y bajo el piso del túnel se encuentran rocas de “regular” calidad geotécnica. Desde los 200,20 m aproximadamente, el túnel se excavará en rocas con resistencia a la compresión simple estimada de 7,5 a 15,0 MPa. A los 280,00 m aproximadamente, donde se ubica el sondaje SC-13, el túnel se proyecta 39,00 m aprox. Bajo la superficie, encontrándose el nivel de agua subterránea (NAS) a los 24,1 m de profundidad. La roca presente es de “mala” calidad geotécnica

y bajo el piso del túnel su calidad aumenta a “buena”. El portal de salida se excavará en rocas de “regular” calidad geotécnica y el nivel de agua subterránea (NAS) asociado al sondaje SC-16 se encuentra a 19,00 m.

6.4.2. Evacuador de Crecidas

Las prospecciones mediante las cuales se analiza con mayor detalle, esta obra ubicada en el estribo izquierdo, son los sondajes:

-SC-15

-SC-18

-SC-19

-SC-20

El vertedero se fundará, como lo muestra el perfil geológico en el mapa (Anexo A), en suelo y en menor cantidad en roca. Presenta una longitud de 365,00 m. Para su fundación será necesario excavar la sobrecarga correspondiente a depósitos aluviales de la planicie de inundación (Qa), de escombros de falda (Qe) y a la roca volcánica de la unidad “K1c”, recuperadas de los sondajes descritos SC-15, SC-18, SC-19, y SC-20.

Desde la entrada donde se proyecta el sondaje SC-15, la obra se emplazará a 550,00 m s.n.n. en depósitos no consolidados de escombros de falda (Qe) sobre el nivel freático, que se encuentra a una profundidad de 23,10 m.

A los 210,00 m desde la entrada, donde se proyecta el sondaje SC-18, el vertedero se excavará en el mismo suelo mencionado anteriormente, pero en este caso el nivel de agua se encuentra sobre la proyección de la excavación a 3,3 m de profundidad desde la superficie.

A 100,00 del fin del túnel, en el sondaje SC-19, el vertedero se excavará en rocas de “regular” calidad geotécnica, correspondiente a rocas volcánicas de la Formación Las Chilcas. El nivel de agua subterráneo se encuentra a 14,10 m de profundidad.

El tramo final del vertedero, se deberá excavar en depósitos no consolidados aluviales de la planicie de inundación (Qa) encontrándose el nivel freático a 3,47 m de profundidad desde la superficie.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las obras del Embalse Catemu serán construidas, en la zona del estribo izquierdo (plinto, túnel de desvío y evacuador de crecidas), en rocas de la Formación Las Chilcas y Depósitos Cuaternarios, mientras que, en el estribo derecho, el plinto será fundado sobre rocas pertenecientes del Miembro Ocoa de la Formación Veta Negra.

Dadas las condiciones geológicas, geomorfológicas y geotécnicas del área de emplazamiento del Embalse Catemu y la compacidad del suelo que aumenta a una mayor profundidad y la calidad del macizo rocoso, que por lo general, se presenta competente con una resistencia a la compresión simple de $\sim \leq 80$ MPa para el estribo izquierdo y entre 100 a 250 MPa el apoyo derecho, se considera que el terreno presenta condiciones favorables para la edificación de obras, con los correspondientes resguardos constructivos de soporte para el emplazamiento de las fundaciones de las diversas estructuras.

Estudios anteriores realizados por EDIC Ingenieros detectaron posibles depósitos de deslizamientos enterrados en escombros de falda recientes en el estribo izquierdo, al igual que en el presente informe, el estudio geológico y geotécnico de la zona este del valle y de los sondajes SC-14 y SC-15, se determinó la existencia de un lineamiento que coincide con el portezuelo visto en el capítulo 6.3.4. que podría ser indicativo de remoción o movimiento de la ladera, además el material recuperado son rocas volcánicas con textura obliterada y gran cantidad de arcillas producto de una intensa actividad hidrotermal, estas presentan una baja resistencia a la compresión simple (0,25 a 0,5 MPa) y se clasifican según el parámetro geotécnico RMR como baja calidad de roca, por lo cual se debe considerar la existencia de arcillas y movimiento del macizo rocoso, ya que, en el estribo izquierdo se tiene proyectado construir el túnel de desvío y evacuador de crecidas.

Se recomienda realizar en la zona del estribo izquierdo, estudios que demuestren si existe movimiento en la zona central del macizo rocoso por donde pasa el lineamiento y se encuentra el portezuelo, además en la misma zona utilizar técnicas de laboratorio para determinar la existencia y porcentaje de arcillas expansivas que afecten la zona de construcción de obras anexas.

La profundidad de la cubierta aluvial de acuerdo a los sondajes proyectados en la planicie del valle es de 160 m aproximadamente según los sondajes SC-06 y SC-07, a diferencia de lo que exponían estudios anteriores realizados por EDIC Ingenieros y la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH),

donde definieron el horizonte suelo-roca a una profundidad máxima de 125 m. Esta diferencia de 35 m, se presenta debido a que el número de prospecciones realizadas por la campaña anterior fueron menores y se utilizaron métodos de muestreos destructivos, como son los sondajes de percusión, por lo que el horizonte suelo-roca en la zona central del valle se definió de manera errónea.

El sitio donde se proyecta el Embalse Catemu tiene una adecuada disponibilidad de material de construcción que son de preferencia suelos granulares, permeables o semipermeables. Para relleno de la presa tipo CFGD o presa de grava con losa de hormigón proyectada en la zona de estudio, es necesario una cantidad aproximada de material fino y grueso de 10 millones de metros cúbicos. De igual manera para los agregados de hormigón existe una buena fuente de suelos granulares gruesos y medios, que no presenten finos o que estos sean escasos que serán removidos de la zona de inundación del embalse, por lo que, es conveniente del punto de vista económico. Sin embargo, para satisfacer las calidades y granulometrías de los materiales de relleno se debe contemplar el tratamiento previo a través de tamizaje (Figura 7.1).



Figura 7.1. Calicata en zona de inundación.

Según los ensayos de permeabilidad realizados en suelo y roca, Lefranc y Lugeon respectivamente, se puede concluir que se emplazará el muro de la presa y sus apoyos en zonas que muestran una baja permeabilidad y altos contenidos de arcilla, factor que favorecería a la obra del diseño de la presa, debido a que se disminuyen los costos de impermeabilización de esta.

Dada la gran cantidad de sondajes diamantinos ejecutados en el sector (22), no se consideró necesario realizar prospecciones geofísicas, ya que, los datos de niveles de agua subterránea y el horizonte suelo roca fueron determinados con precisión en terreno a través de las perforaciones.



REFERENCIAS

- BIENIAWSKI, Z. T. 1989. Engineering Rock Mass Classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. Ed. John Wiley & Sons: 251 pp. Pennsylvania.
- BIENIAWSKI, Z. T. 1976. Rock mass classification of jointed rock masses. Exploration for Rock Engineering. Ed. Balkema: 97-106. Cape Town.
- BÖRGEL, R. 1983. Geomorfología. Colección geográfica de Chile. Instituto Geográfico Militar: 373 pp. Santiago.
- DEERE, D. 1966. Engineering classification and index properties for intact rock. Universidad de Illinois: 327 pp. Chicago.
- DEERE, D. 1989. Rock Quality Designation (RQD) After Twenty Years. U.S. Army Corps of Engineers Contract Report GL-89-1. Waterways Experiment Station: 100 pp. Vicksburg
- DEERE, D. & DERE, W. 1988. The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice. Ed. L. Kirkaldie: 91-101. Philadelphia.
- GANNA, P. & WALL, R. 1997. Evidencias geocronológicas $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y K–Ar de un hiato Cretácico Superior-Eoceno en Chile Central (33° – $33^{\circ}30\text{pS}$). Revista Geológica de Chile, Vol. 24, 145-163. Santiago.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, J.; FERRER, M.; ORTUÑO, L. & OTEO, C. 2002. Ingeniería Geológica. Ed. Prentice Hall: 712 pp. Madrid.
- HEDENQUIST, J. & WHITE, N. 1995. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. *Society of Economic Geologists Newsletter*. Vol. 23: 9-13. Londres.
- MN INGENIEROS. 2017. Estudios técnicos complementarios Embalse Catemu, Valle del Aconcagua, Región de Valparaíso. Estudio geológico – Geotécnico. (Inédito). 81 pp. Santiago.

- MN INGENIEROS. 2017. Estudios técnicos complementarios Embalse Catemu, Valle del Aconcagua, Región de Valparaíso. Informe Etapa 1. (Inédito). 85 pp. Santiago.
- EDIC IINGENIEROS Ltda y Geotecnia Consultores. 2001. Embalses de Regulación para el Río Aconcagua, Estudio de Factibilidad. (Inédito). 106 pp. Santiago.
- PIRACES, R. & MAKSAEV, V. 1977. Geología de la Hoja Quillota, Escala 1:250.000, IV y V Región. Instituto de Investigaciones Geológicas: 232 pp. Santiago.
- QUIÑONES, C. 2010. Lugeon test interpretation, revisited. En: Proceedings of the 30th annual USSD conference, Sacramento, California. Actas I: 405-414. Sacramento.
- RIQUELME, J. 2015. Estudio geológico y geotécnico para factibilidad de diseño del Embalse Empedrado, Región del Maule, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 77 pp. Concepción.
- RIVANO, S. 1985. Geocronología K-Ar de las rocas intrusivas entre los 31° - 32 ° Latitud Sur. Chile. Revista Geológica de Chile. N°24. 63-74. Santiago.
- RIVANO, S. 1996. Geología de las Hojas Quillota y Portillo. Servicio Nacional de Geología y Minería: 202 pp. Santiago.
- RIVANO, S., SEPÚLVEDA, P., BORIC, R., ESPÍÑEIRA, D. 1993. Hojas Quillota y Portillo, V Región (1:250.000). Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, N°. 73: 232 pp. Santiago.
- SÁNCHEZ, F.J. 2011. Medidas puntuales de permeabilidad (“slug tests”). Universidad de Salamanca: 13 pp. Salamanca.
- SELLÉS, D., & GANA, P. (2001). Geología del área Talagante-San Francisco de Mostazal: Regiones Metropolitana de Santiago y del Libertador General Bernardo O'Higgins (1:100.000). Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, N°74: 29 pp. Santiago.

- STRECKEISEN, A. (1979) Classification and Nomenclature of Volcanic Rocks, Lamprophyres, Carbonatites, and Melilitic Rocks: Recommendation and Suggestion of the IUGS, Subcommittee on the Systematic of Igneous Rock. *Geology*, Vol. 4, 331-335. Stuttgart.
- THOMAS, H. 1958. Geología de la Cordillera de la Costa entre el valle de La Ligua y la cuesta de Barriga. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín N°2, 86 pp. Santiago.
- VERGARA, M. & DRAKE, R. 1979. Edades K/Ar en secuencias volcánicas continentales post-neocomianas de Chile Central: su depositación en cuencas intermontanas restringidas. Asociación Geológica Argentina. Vol. N°32: 42-52. Buenos Aires.
- WHITLOW, R. 1994. Fundamentos de Mecánica de Suelos. Ed. Continental: 589 pp. Ciudad de México.

