



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



**ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN
MASA EN EL ÁREA DEL EMBALSE RALCO, COMUNA DE
ALTO BIOBÍO, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE**



Memoria para optar al Título de Geólogo

Emilio Francisco Vergara Herrera

Profesor Patrocinante: Dr. Jorge Andrés Quezada Flory

Profesores Comisión: Dra. Verónica Pineda Mascayano

Msc. Abraham Elías González Martínez

Concepción, 2020

Dedicado a Mario, Cecilia y Max



ÍNDICE

Página

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. FORMULACIÓN DEL PROYECTO	1
1.1.1. Ubicación y accesos	2
1.1.2. Antecedentes de remociones en masa en el área	3
1.1.2.1. Diciembre del 2006	3
1.1.2.2. Junio del 2019	3
1.2. OBJETIVOS	1
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3. METODOLOGÍA DE TRABAJO	5
1.4. CLIMA	8
1.5. LIMITACIONES	9
1.6. TRABAJOS ANTERIORES	10
1.7. INFORMES ENEL	11
1.8. AGRADECIMIENTOS	13
2. GEOMORFOLOGÍA	14
2.1. GENERALIDADES	14
2.2. GEOMORFOLOGÍA LOCAL	16
2.2.1. Unidades Geomorfológicas	18
2.2.2. Análisis de Relieve	20
2.2.2.1. Elevación	20
2.2.2.2. Orientación de laderas	21
2.2.2.3. Pendientes de laderas	22
2.2.2.4. Redes de drenaje	22
3. MARCO GEOLÓGICO	25
3.1. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	25
3.1.1. Generalidades	25
3.1.2. Rocas estratificadas	25
3.1.2.1. Formación Cura-Mallín	25
3.1.2.2. Formación Trapa-Trapa	27
3.1.2.3. Formación Cola de Zorro	27
3.1.2.4. Volcanes y Flujos Lávicos	28
3.1.2.4. Depósitos No Consolidados	28
3.1.3. Rocas intrusivas	28
3.1.3.1. Stocks de Granodiorita-Diorita	28
3.1.3.2. Stocks de Riodacita	29
3.1.3.3. Stocks y Filones Andesítico-Basálticos	29
3.2. MARCO GEOTECTÓNICO REGIONAL	30
3.2.1. Generalidades	30
3.2.2. Características de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui	30
3.3. MARCO GEOLÓGICO LOCAL	33

3.3.1. Formación Cura-Mallín	33
3.3.1.1. Miembro Río Queuco	33
3.3.1.1. Miembro Malla-Malla	34
3.3.2. Formación Trapa-Trapa	35
3.3.3. Rocas Intrusivas	35
3.3.3.1. Cuerpo Diabásico Principal	36
3.3.3.1. Cuerpos Menores de Pórfidos Andesíticos	37
3.3.4. Depósitos Recientes	37
3.3.4.1. Depósitos Fluviales	38
3.3.4.2. Depósitos Glaciales	38
3.3.4.3. Depósitos de Remociones en Masa	39
4. FUNDAMENTOS DE REMOCIONES EN MASA	41
4.1. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS ASOCIADOS AL RIESGO	41
4.2. REMOCIONES EN MASA	43
4.2.1. Tipos de remociones en masa	43
4.2.2. Factores condicionantes y desencadenantes	47
4.2.2.1. Factores condicionantes	47
4.2.2.1. Agentes desencadenantes	49
5. METODOLOGÍA	53
5.1. CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA	53
5.1.1. Índice de Calidad de la Roca (RQD)	53
5.1.2. Número de Familias de Discontinuidades (Jn)	54
5.1.3. Número de la Rugosidad de las Discontinuidades (Jr)	54
5.1.4. Número de Alteración de las Discontinuidades (Ja)	55
5.1.5. Número de la Condición Geológica y Ambiental (J _{wice})	55
5.1.6. Factor de Reducción por Condiciones de superficie, esfuerzos y orientación de discontinuidades (SRF_{slope})	57
5.1.7. Valoración de Q	58
5.2. CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA	60
5.2.1. Geología Local	60
5.2.2. Evaluación del parámetro Q_{slope} en el área	60
5.3. ÁLGEBRA DE MAPAS	62
6. ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD	64
6.1. RECLASIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE FACTORES CONDICIONANTES Y DETONANTES	64
6.1.1. Geología y Geotecnia	64
6.1.2. Geomorfología	65
6.1.1. Estructuras y Redes de Drenaje	69
6.2. ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD	71
6.3. EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN ESTRUCTURAL Y SUS ALCANCES	75
6.3.1. Sitio C-01	75
6.3.2. Sitio C-02	75
6.3.3. Sitio C-03	77

6.3.4. Interpretación de los datos obtenidos	77
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	79
7.1. CONCLUSIONES	79
7.2. RECOMENDACIONES	81
REFERENCIAS	82
ANEXOS	



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Mapa de ubicación del área de estudio	2
1. 2. Mapa de ubicación de puntos visitados en la etapa de terreno	7
1. 3. Puntos de control de las inspecciones mensuales realizadas por ENEL	11
2. 1. Unidades geomorfológicas de la Región del Biobío	14
2. 2. Imagen del Rio Biobío aguas abajo	18
2. 3. Geomorfología presente en el área de estudio	19
2. 4. Mapa de Elevación del área de estudio	20
2. 5. Mapa de orientación de las laderas del área de estudio	21
2. 6. Mapa de ángulo de pendientes del área de estudio	23
2. 7. Mapa de las redes de drenaje más importantes del área de estudio	24
3. 1. Mapa geológico regional entre los 37°S y los 39°S	26
3. 2. Mapa geotectónico de Chile	31
3. 3. Lutitas pertenecientes al Miembro Malla-Malla de la Formación Cura- Mallín	34
3. 4. Afloramiento de lavas andesíticas pertenecientes a la formación Trapa- Trapa	36
3. 5. Dique desplazado por falla de tipo dextral	37
3. 6. Depósitos fluviales antiguos	38
3. 7. Depósitos glaciales	39
3. 8. Mapa geológico del área de estudio	40
4. 1. Partes de una remoción en masa	43
4. 2. Tipos de remociones en masa	44
4. 3. Precipitaciones mensuales durante los últimos 5 años	51
4. 4. Catastro de sismos en el área de estudio	52
5. 1. Partes de un talud	53
5. 2. Fórmula matemática para la obtención de Q_{slope}	58
5. 3. Gráfico que presenta valores de Q_{slope} y los ángulos de talud	59
5. 4. Clasificación de valores obtenidos en terreno en el gráfico de estabilidad .	62
5. 5. Obtención de resultados mediante álgebra de mapas	63
6. 1. Mapa Geológico reclasificado	65
6. 2. Mapa de Orientación de Laderas reclasificado	66
6. 3. Mapa de Ángulo de Pendientes reclasificado	67
6. 4. Mapa de Elevación reclasificado	68
6. 5. Mapa de estructuras del área de estudio	69
6. 6. Mapa de susceptibilidad de remociones en masa en el área de estudio	71
6. 7. Remoción en masa en la ladera Oeste del embalse	74
6. 8. Mapa de susceptibilidad de remociones en masa del área de estudio	74
6. 9. Estrías medidas en terreno	76
6. 10. Planos de falla	76
6. 11. Planos de fallas conjugadas	77
6. 12. Diagrama de rosetas con las fallas medidas en terreno	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
4. 1.	Velocidad y profundidad de los diferentes tipos de remociones en masa	46
4. 2.	Relación existente entre factores condicionantes y el tipo de remoción	49
4. 3.	Precipitaciones mensuales durante los últimos 5 años	50
5. 1.	Índice de Calidad de la Roca	54
5. 2.	Número de familias de discontinuidades	54
5. 3.	Número de rugosidad de las discontinuidades	55
5. 4.	Número de alteración de las discontinuidades	56
5. 5.	Número de la condición geológica y ambiental	56
5. 6.	Condición física de los taludes	57
5. 7.	Clasificación de estrés y fuerza del talud	57
5. 8.	Condición de la mayor discontinuidad	58
5. 9.	Valores de Q_{slope} obtenidos para los datos de terreno	61
6. 1.	Tabla de mediciones de diferentes planos de falla en el sitio 1.....	75



RESUMEN

El trabajo de investigación realizado en la presente Memoria de Título corresponde a un análisis de los factores condicionantes y desencadenantes para generar remociones en masa en el área cercana al embalse Ralco, en la comuna de Alto Biobío, Región del Biobío. Este trabajo tiene como motivación una mejor comprensión del ambiente aledaño al embalse, con lo cual se pueden prevenir potenciales desastres que tengan lugar en la zona. Los factores condicionantes corresponden principalmente a características litológicas, geomorfológicas, estructurales y geotécnicas, las cuales son analizadas de forma independiente. Para las características geomorfológicas se utilizaron en gran medida imágenes satelitales, y mediante el uso del software *ArcGIS* 10.6 permitió estimar los ángulos, orientación y altura de las laderas, además de permitir realizar un análisis de las redes de drenaje del área de estudio.

En cuanto a las características litológicas, se analiza el tipo de roca y su disposición espacial en la zona, para eso, se recopilieron trabajos anteriores en el área de estudio, con tal de contrastarlos con lo visto en terreno. En el área se encuentran rocas sedimentarias pertenecientes al Miembro Malla-Malla de la Formación Cura-Mallín. Estas rocas sedimentarias corresponden en su mayoría a lutitas, que se encuentran plegadas en algunos sectores. Por otra parte, afloran andesitas y brechas pertenecientes a la Formación Trapa-Trapa. Luego, es posible reconocer rocas intrusivas, en su mayoría corresponden a cuerpos andesíticos de tipo porfídicos. Finalmente, en el área de estudio, tienen lugar múltiples tipos de depósitos no consolidados, como por ejemplo, depósitos fluviales, depósitos de remociones en masa, entre otros.

En estas rocas es posible distinguir diferentes tipos de estructuras, que afectan directamente la calidad de ellas, propiciando eventos de remoción en masa. Estas estructuras son analizadas con el fin de correlacionarlas con eventos de gran escala. Estos eventos generan un ambiente geotectónico, que en el caso del área de estudio, corresponde a la Zona de Fallas Liquiñe-Ofqui, la cual es una zona de fallas geológicas activas.

Para caracterizar las rocas de la zona, se utilizó un método de clasificación geomecánica llamada Q_{slope} , que consiste en atribuirle puntaje a la roca por sus condiciones y valorar el ángulo del talud que presenta, para obtener un valor de ángulo máximo, que representa su estabilidad.

Finalmente, luego de realizar los distintos análisis y confeccionar mapas temáticos, se procede a utilizar el software *ArcGIS* 10.6 para realizar un álgebra de mapas, que consiste en ponderar los distintos mapas, asignándole un porcentaje, para obtener un mapa de susceptibilidad de remociones en masa del área de estudio. Este mapa final, presenta grandes coincidencias con el análisis Q_{slope} realizado en terreno, por lo que se validan las ponderaciones asignadas. A partir de este mapa, el área de estudio presenta zonas con alta susceptibilidad a generar remociones en masa, por lo que se le realizan recomendaciones a la empresa, con tal de mitigar los efectos que puedan tener en el ambiente y en las obras civiles.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. FORMULACIÓN DEL PROYECTO

El presente trabajo nace debido a la problemática que presenta la empresa ENEL en los alrededores del embalse Ralco con presencia repetitiva de remociones en masa, los cuales afectan el camino de acceso a las oficinas administrativas y sala de máquinas pertenecientes a la empresa. Las remociones en masa pueden manifestarse de varias maneras, siendo las más comunes las caídas de bloques y los deslizamientos de suelo o suelo y roca.

Este estudio se enmarca en el proyecto “Monitoreo y sistema de vigilancia volcánica en Alto Biobío” mediante el cual la empresa ENEL GENERACIÓN CHILE S.A. en conjunto con la Universidad de Concepción mantienen un monitoreo constante a la actividad volcánica de la zona. Como resultado de esto se obtiene una base de datos sísmicos asociados a la actividad volcánica del área y posiblemente movimientos de estructuras geológicas.

Esta memoria de título tiene como propósito delimitar áreas al Sur del volcán Callaqui, en las cercanías del embalse Ralco, en las que presenten peligro de deslizamientos que afecten al embalse y por consiguiente constituya un problema al funcionamiento de la represa instalada en la zona. Este estudio nace debido al antecedente del año 2006, donde un sismo de magnitud 5.6 asociado a la Zona de Fallas Liquiñe-Ofqui, sirve como precursor para una remoción en masa muy destructiva en el área. Ya que existen indicios de que la ZFLO corresponde a una zona de fallas geológicas activas, se deben tomar precauciones para evitar un desastre mayor. Con el catastro de remociones en masa antiguas y demarcación de zonas que evidencien potencial peligro en el área se pretende informar y recomendar a la empresa encargada que se tomen las medidas correspondientes con el fin de evitar cualquier tipo de desastre. Adicionalmente, estos deslizamientos pueden tener relación a estructuras geológicas de mayor escala, por lo que complementarían la información que existe de aquella zona.

1.1.1. Ubicación y accesos

El área de estudio se encuentra ubicada en la Región del Biobío, Chile, al Sur del volcán Callaqui, en la comuna de Alto Biobío, entre los $38^{\circ}02' S$ $71^{\circ}28' W$ y los $38^{\circ}04' S$ $71^{\circ} 24' W$ (Figura 1.1).

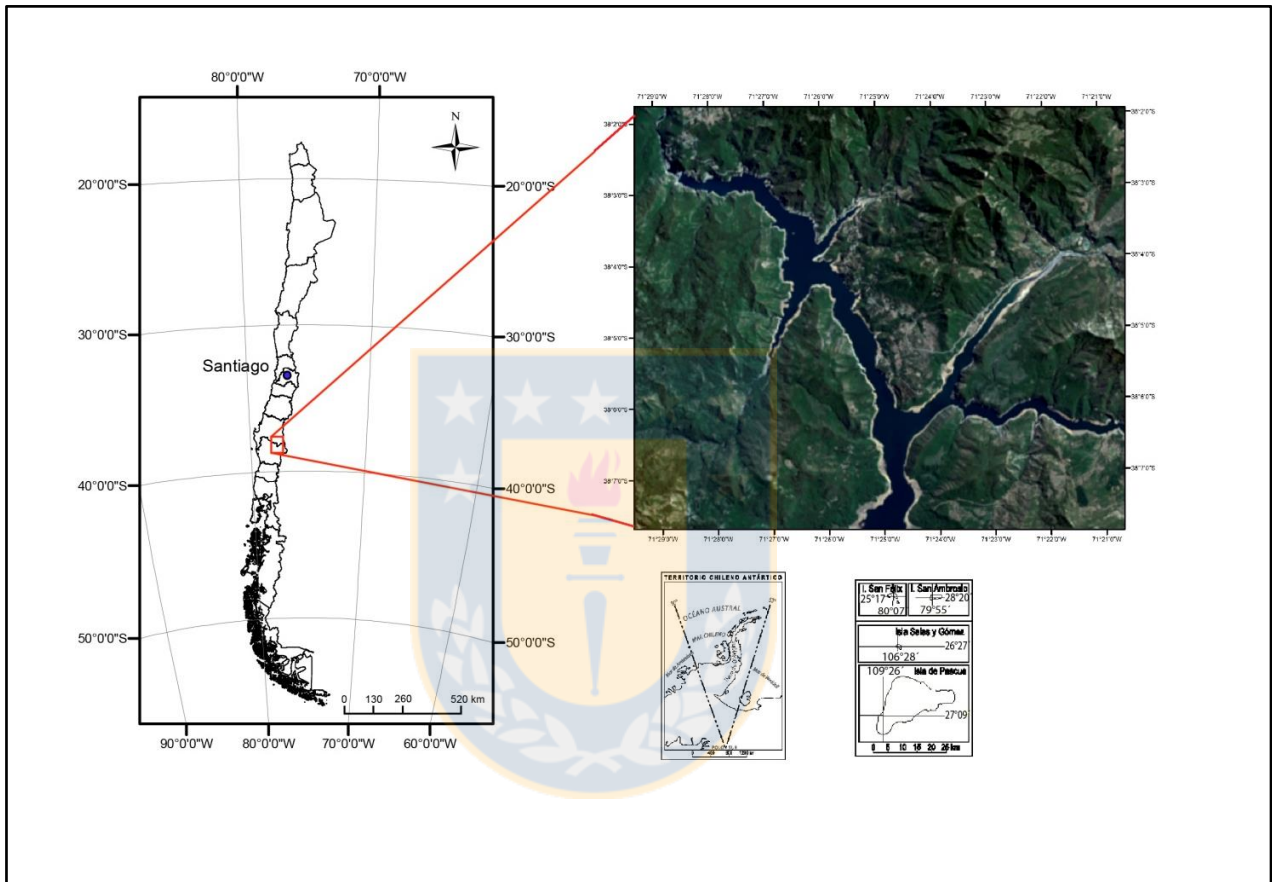


Figura 1.1: Mapa de ubicación del área de estudio.

Para acceder al área de estudio, se debe recorrer la carretera Q-61 que conecta la comuna de Santa Bárbara con Los Ángeles, donde se puede llegar por medio de la ruta 5 Sur. Al avanzar por la ruta Q-61 hasta llegar a la localidad de Ralco, donde el camino toma el nombre de Q-689 y no se encuentra pavimentado. Existe un alto tránsito de camiones en el sector, lo que también afecta al estado del camino. Cabe mencionar que este camino recorre el lado Este del embalse, y la única forma de acceder al lado Oeste es mediante un vehículo acuático, ya sea una lancha o un bote, debido a que no existe un camino público, y la vegetación es bastante tupida.

1.1.2. Antecedentes de remociones en masa en el área

Como información inicial de este estudio, es importante recopilar datos que presenten características que potencialmente se puedan repetir en el futuro. Es por esto que se decide exponer dos casos en los que ocurrió un proceso de remoción en masa en el área, los cuales presentan agentes desencadenantes totalmente diferentes, el primero se produjo debido a un evento sísmico, mientras que el segundo ocurrió durante lluvias prolongadas y una gran cantidad de milímetros (141 mm) de agua caída. Como factor común, los efectos de estas remociones en masa producen aislamiento de poblados, lo cual no solo afecta a las personas, sino que también al ganado de los pobladores y la conectividad de la zona. Los efectos potenciales en el área de estudio pueden ser muy destructivos, más aun, en los casos en que el agente desencadenante corresponda a un evento sísmico de gran magnitud (sobre 5.0 en la escala de Richter).

1.1.2.1. Diciembre del 2006

El día 31 de diciembre del año 2006, tuvo lugar un sismo de magnitud Mw 5.6, con el epicentro cercano a la zona de Chenqueco, a unos 15 km del muro del embalse Ralco. Este sismo actuó como agente desencadenante para una serie de deslizamientos de suelo y rocas en la zona, siendo el más importante el ubicado en el kilómetro 10,6 camino a Chenqueco, el cual recibe un monitoreo mensual por parte de la empresa.

1.1.2.2. Junio del 2019

En el mes de junio del 2019, debido a las lluvias con gran intensidad y frecuencia, causaron un deslizamiento cercano al área de estudio, en el camino que conecta la localidad de Ralco con Trapatrapa, dejando como resultado más de 4.000 personas aisladas. En particular, las precipitaciones superaron los 141 mm en el sector cordillerano de la región del Biobío, provocando desbordes de ríos y esteros en el lugar.

El corte del camino se produjo debido a un deslizamiento de suelo y roca, en el kilómetro 5 de la ruta que une Ralco con Trapatrapa, generado por las precipitaciones de agua y nieve.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Realizar un análisis de susceptibilidad de remociones en masa que puedan generar perturbaciones en el embalse Ralco en la zona de Alto Biobío, Región del Biobío.

1.2.2. Objetivos específicos

- Reconocer en terreno las remociones en masa en el área de estudio.
- Integrar la información geológica, estructural y geomorfológica para acotar zonas posibles para la ocurrencia de remociones en masa.
- Determinar los factores condicionantes para la susceptibilidad de remociones en masa en la zona.
- Relacionar la ocurrencia de estos eventos con la localización de estructuras que puedan explicar su origen como fallas geológicas activas.
- Asociar la sismicidad en la zona con las estructuras presentes.
- Confeccionar un mapa de susceptibilidad de remociones en masa para el área de estudio.
- Proponer medidas de mitigación para la empresa, con el objetivo de aminorar los daños que puedan provocar tanto a las represas como a las comunidades aledañas.

1.3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología empleada en este trabajo se puede categorizar en tres etapas, donde la primera etapa cumple un rol fundamental, tanto para organizar la logística de los terrenos, como para precisar la forma de trabajo en ellos. De manera preliminar se efectuó una recopilación bibliográfica de la carta geológica Hoja Laguna de la Laja (Niemeyer y Muñoz, 1983), memorias realizadas en el área de estudio, además de informes inéditos hechos para ENDESA, gentilmente facilitados por la profesora Dra. Verónica Pineda Mascayano, y por último, informes geotécnicos

periódicos realizados por parte de ENEL en el embalse Ralco facilitados por el profesor Dr. Jorge Quezada Flory.

Es importante acotar que la campaña de terreno se fue desarrollando de manera paralela a la etapa Gabinete 1, debido a que un grupo de trabajo del Departamento Ciencias de la Tierra y GEMA requieren visitar la zona en al menos dos ocasiones al mes, por lo que amablemente me permitieron aprovechar aquellos días para realizar trabajos correspondientes a la etapa de terreno.

La estructura general de la metodología se subdivide en estas tres etapas, que se detallan a continuación:

Gabinete 1: Durante esta etapa se concentra la recopilación bibliográfica de trabajos anteriores en el área de estudio, en los que se incluyen trabajos realizados por estudiantes de la carrera de geología de la Universidad de Concepción en el tema del cual trata el presente estudio. Fue necesario como primera medida, tomar varios parámetros para que la evaluación del trabajo en terreno sea lo suficientemente objetiva, por lo cual se decidió utilizar parámetros geomecánicos para clasificar los afloramientos en los cortes de camino, además de la clasificación de ángulos de pendientes, orientación de laderas y zonificación por estructuras.

Para la clasificación geomecánica se confeccionó una tabla tipo que estandariza la toma de datos en los afloramientos. Esta tabla contiene las características básicas de la unidad geológica como lo son la litología y las estructuras y las familias de discontinuidades presentes, además de las características de las discontinuidades como lo son su espaciamiento, apertura, largo, rugosidad y relleno. Con lo anterior es posible obtener un valor de los parámetros RQD, J_w , J_n , J_r , J_a y SRF.

De lo anterior se puede concluir que la estrategia utilizada en este trabajo será tomar cada factor de manera individual, donde se evalúa uno a la vez, dándole valores en una escala determinada independiente para cada factor, con tal de clasificarlos como “más propensos a producir una remoción en masa” a “menos propenso a producir una remoción en masa”. Posteriormente, ya evaluados estos factores de manera particular, realizar un cruce entre los mapas obtenidos, con tal de lograr clasificaciones que incluyan todos los factores analizados.

Con la estrategia de trabajo en terreno definida, se realiza el reconocimiento de la zona a través de imágenes satelitales, con tal de identificar posibles limitaciones para los accesos a las áreas de

mayor interés, utilizando tanto *Google Earth* como *ArcGIS*, donde este último permite realizar directamente el modelo de elevación, para realizar una evaluación de pendientes preliminar y también generar un mapa con la orientación de las laderas.

Etapas de Terreno: Se llevó a cabo entre los días 20 y 27 de Septiembre de 2019, con apoyo durante toda la etapa por parte de Andrés Oyarzún, Pedro Bravo y Dr. Jorge Quezada, se recorrieron los bordes del embalse Ralco, evaluando las laderas de los caminos y puntos de interés donde se podía extraer información geológica, estructural o geomorfológica relevante para el trabajo.

En esta etapa se procedió a completar los datos geotécnicos de las rocas presentes en algunos sectores del área cercana al embalse Ralco, los cuales están indicados en la figura 1.2 con puntos de color azul (denominados “puntos de estudio”), además de definir preliminarmente las zonas más propensas a sufrir procesos de remociones en masa, ya sea por una debilidad estructural o por características geológicas. Los puntos de color celeste de la figura 1.2 corresponden a lugares de análisis geomorfológico o estructural.

Estos puntos visitados en terreno se complementan con la información obtenida mediante el procesamiento de imágenes y los informes facilitados por la empresa para obtener una visión más íntegra del estado de las laderas en el área.

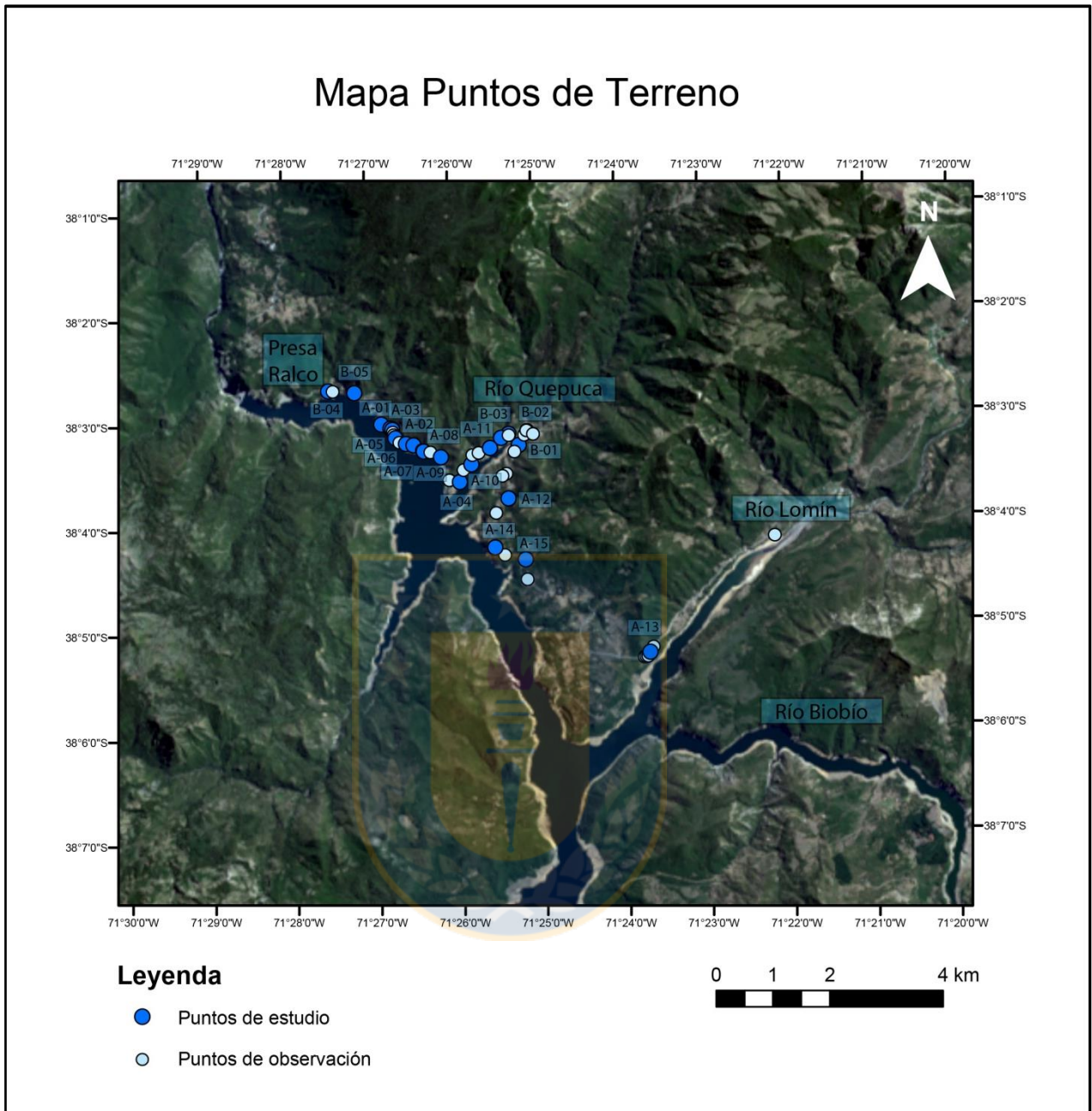


Figura 1.2: Mapa de ubicación de puntos visitados en la etapa de terreno.

Etapá Gabinete 2: Con la toma de datos en terreno concluida, se procede al análisis de éstos, definiendo zonas acotadas que presenten mayor posibilidad de tener problemas de estabilidad. Con los puntos GPS tomados en terreno, tenemos una ubicación precisa de los lugares visitados y sus clasificaciones geotécnicas, por lo que procedemos a zonificar directamente. Posteriormente

se realiza un álgebra de mapas con los mapas individuales para reclasificarlos y obtener el mapa final de susceptibilidad de remociones en mapa en el área.

1.4. CLIMA

El área de trabajo se caracteriza por presentar un clima templado cálido con estación seca corta (Dirección Meteorológica de Chile en Sielfield G., 2008). Durante el invierno presenta un clima frío de altura con altos niveles de precipitaciones (en promedio 2000 mm anuales).

El clima de altura presente en la zona de Ralco se caracteriza por la abundancia de precipitaciones, acompañadas con muy bajas temperaturas, lo cual es efecto directo de la altitud. Lo anterior permite la presencia de nieves permanentes en los periodos invernales.

La temperatura presente fluctúa en promedio entre los 8°C y los 10°C, con mínimas invernales del orden de 0°C a -3°C, llegando a extremas de -7°C a -8°C. En el verano las temperaturas máximas bordean los 25°C.

1.5. LIMITACIONES

El presente trabajo contó con numerosas limitaciones para su realización, sobre todo, la etapa de terreno. Si bien el área de Ralco es accesible a través de un vehículo y puede ser caminando, durante el invierno el clima es muy adverso, con altas cantidades de precipitaciones, tanto lluvia como nevazones. Por lo anterior, el estado de los caminos empeora, lo que dificulta de sobremanera el acceso a varios sectores.

Lo anterior se suma a que el camino que recorre el borde oriental del embalse, se aleja de las cercanías del embalse mismo, lo que genera que los análisis geotécnicos en la zona Sur del área de estudio sean menos representativos. Sin embargo, hacia el Sur del embalse, aumenta la altura del camino, lo que genera menores diferencias de altura con respecto a los taludes y paredes de roca, lo que disminuye considerablemente el riesgo de remociones en masa de grandes dimensiones.

Por otro lado, la tupida vegetación y las pendientes escarpadas dificultaron también el acceso a afloramientos en lugares más alejados de la huella principal.

1.6. TRABAJOS ANTERIORES

Dentro de los primeros trabajos que se realizaron en el área se encuentra el reconocimiento geológico que llevaron a cabo González Ferrán y Vergara (1962), siendo importante como primer reconocimiento geológico en el área.

Posteriormente, a partir de 1983, el estudio geológico y de riesgo volcánico ha cobrado importancia en el sector de Alto Biobío, tanto por las comunidades que habitan la zona y por lo proyectos ingenieriles que se proyectaban en la zona.

Niemeyer y Muñoz (1983) realizan la Hoja Laguna de la Laja, donde en el extremo Sur abarca el área del Volcán Callaqui.

En 1987, Juan Varela, Ricardo Thiele y Hugo Moreno, con la contribución de Francisco Munizaga, Manuel Araneda y Aldo Moreno realizan un estudio geológico a escala 1:10.000 del área del proyecto Ralco, el cual se enmarca en el convenio OICP-8601, el cual significa el primer estudio acotado al área de estudio, donde posteriormente se llevarían a cabo diferentes trabajos de reconocimiento geológico, geotécnico y estructural.

Emparán *et al.* (1992) publican la Hoja Curacautín, la cual abarca en su zona Norte las unidades pertenecientes al basamento del Volcán Callaqui.

En el año 2002, Adriano Cecioni junto a Verónica Pineda realizan un mapa geológico a escala 1:100.000, el cual fue modificado de Cecioni, A. (2000) “Elaboración de mapas Zonificados de Peligrosidad Volcánica”, siendo importante como base de mapeo para el presente estudio.

Melnick y otros (2006) y Sielfield (2008) realizan trabajos orientados a una mejor comprensión del ambiente tectónico que controla la zona y las características distintivas del Volcán Callaqui.

1.7. INFORMES ENEL

Debido a los compromisos ambientales que acoge la central Ralco, se realiza de manera mensual un seguimiento en las laderas que colindan directamente con el embalse y que presentan riesgo de deslizamientos. Estas inspecciones visuales periódicas se realizan desde septiembre del 2003 y

tienen por objetivo evaluar el estado de los deslizamientos o zonas inestables identificadas previamente, y reconocer nuevos deslizamientos o potenciales inestabilidades. Los puntos de control establecidos se muestran en la figura 1.3. Los informes realizados están a cargo de un especialista civil de Soporte Técnico, y constan de fotografías y evaluaciones rutinarias para cada sitio.

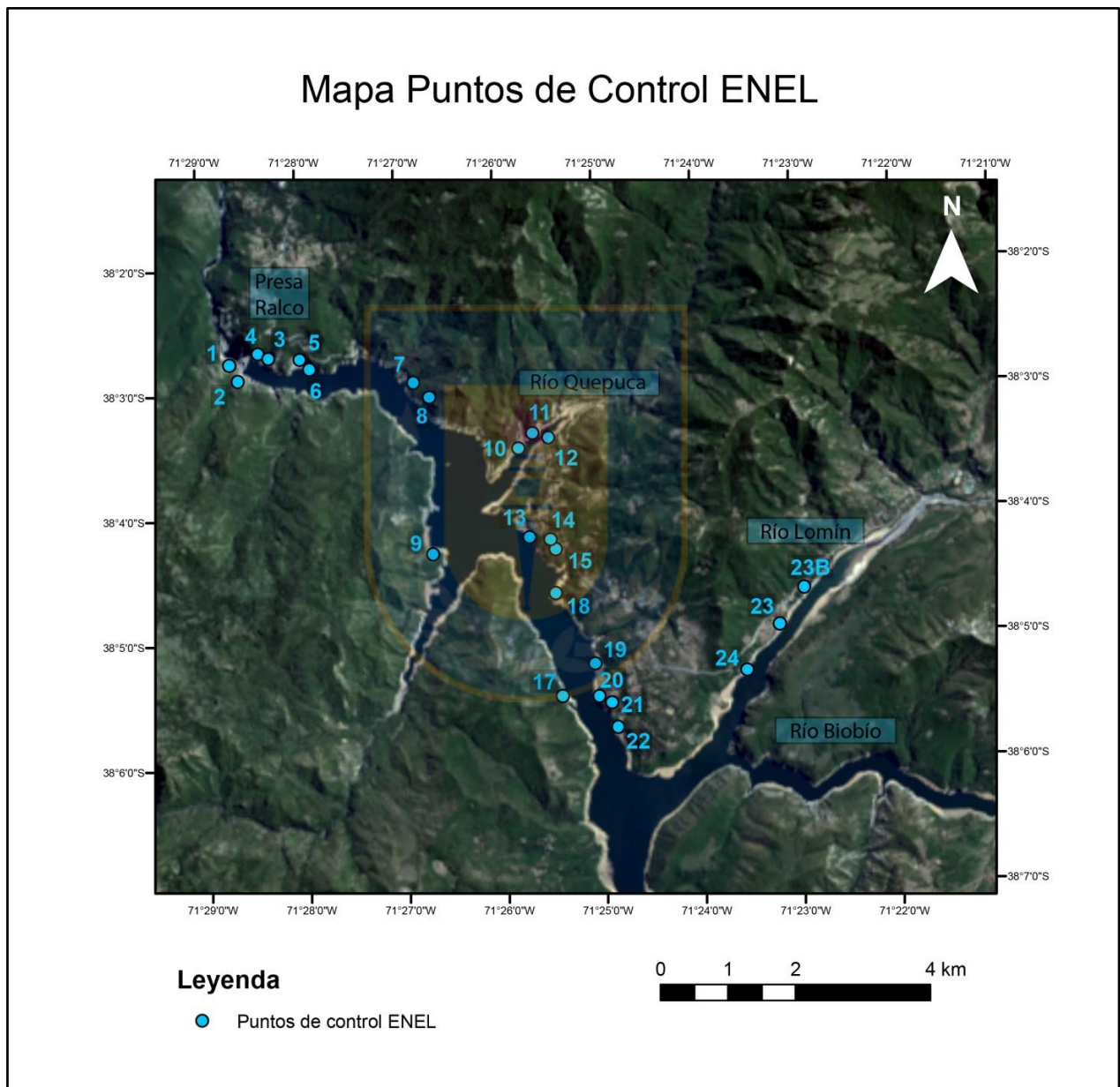


Figura 1.3: Puntos de control de las inspecciones mensuales realizadas por ENEL.

Estos informes fueron facilitados por la empresa y permitieron estimar las zonas de interés para el presente trabajo, además de obtener información de lugares con difícil acceso en terreno, que

permiten evaluar áreas más remotas y posteriormente comparar las evaluaciones visuales con los resultados expuestos en este trabajo.

Dentro de las evaluaciones más relevantes expuestas en estos informes, se encuentra las realizadas en el punto 13 (Figura 1.3), que corresponde a un deslizamiento de suelo en el km 10.6 camino a Chenqueco, donde se mantiene un monitoreo específico por parte de la empresa; y el punto 11, donde se puede apreciar claramente una afección a la vegetación y la forma cóncava producida por material que se ha removido.

1.8. AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer de manera muy sincera a todos quienes fueron parte de mi desarrollo académico, y para quienes posibilitaron este trabajo, ENEL Generación S.A. y cada uno de los integrantes del Departamento Ciencias de la Tierra, de la Universidad de Concepción, desde los auxiliares, hasta los docentes y administrativos. En particular agradecer el apoyo y la confianza de Dra. Verónica Pineda Mascayano y Dr. Jorge Quezada Flory, Don Pedro Bravo y Andrés Oyarzún por el apoyo logístico y de trabajo en terreno, a Yoana Roa por sus gestiones por parte de la empresa para los días de terreno y a Don Luis Vázquez por su orientación en el trabajo de gabinete. Agradecer a mi familia por todo el apoyo que siempre me han brindado, y para mis amigos que siempre han estado avanzando conmigo en el desarrollo personal y profesional.

2. GEOMORFOLOGÍA

2.1. GENERALIDADES

Reinaldo Börgel en 1983 clasifica la geomorfología de Chile en cinco grandes macroformas que poseen rasgos fisiográficos distintivos en los cuales influye la litología presente y el clima que ha modelado estas unidades (Figura 2.1).

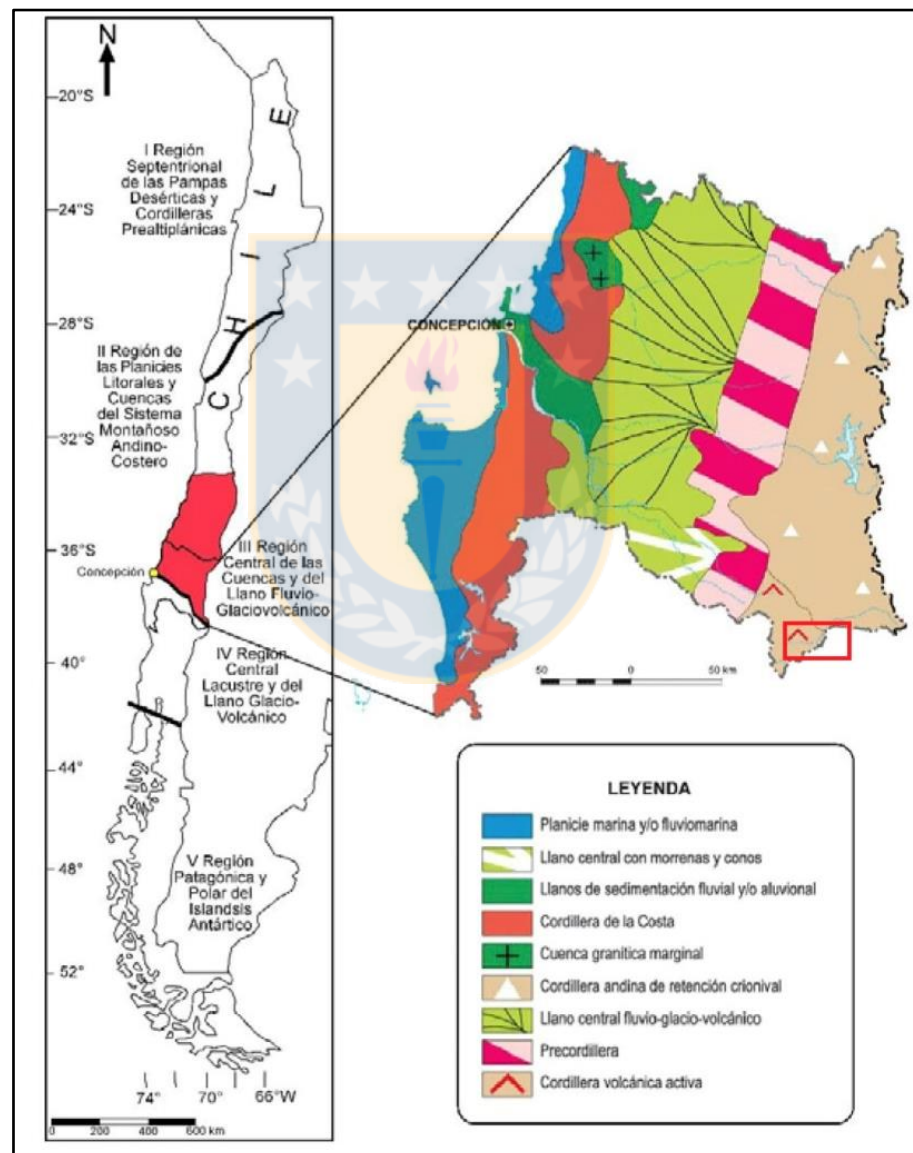


Figura 2.1: Unidades geomorfológicas de la Región del Biobío (Modificado de Börgel, 1983). El recuadro rojo indica la unidad en la cual se enmarca el área de estudio.

El área de estudio se enmarca en la denominada “Región central lacustre y del llano glacio-volcánico” que se extiende desde el Río Biobío hasta la ciudad de Puerto Montt. Más específicamente, la zona del embalse Ralco se encuentra en la Cordillera volcánica activa. El mismo Börgel (1983) distingue en la región del Biobío las siguientes subregiones morfológicas: Planicie litoral de sedimentación marina y fluvio-marina; Cordillera de la Costa; Llano Central con morrenas de ablación y conos de soliflucción periglacial; Precordillera y Cordillera volcánica activa.

Para efectos de este estudio, sólo se describirá la subregión morfológica que se enmarca en el área, la cual corresponde a Cordillera volcánica activa.

La cordillera volcánica activa: Se despliega entre el volcán Callaqui por el Norte y el volcán Hornopirén por el Sur, con un largo aproximado en 350 km, con un ancho promedio estimado en 40 km.

La mayor parte de estas sierras y cordilleras se alzan entre los 1.000 y 1.500 m, altitud que define la orografía andina de esta zona como un relieve importantemente retrabajado por la erosión de glaciares y ríos.

Los conos volcánicos aparecen entremezclados con algunas cumbres, como el volcán Callaqui (3.164 m s.n.m.), volcán Copahue (2.965 m s.n.m.) y el volcán Antuco (2.979 m s.n.m.) entre otros.

2.2. GEOMORFOLOGÍA LOCAL

Para describir los principales caracteres topográficos de la zona, González Ferrán y Vergara (1962) divide el tramo cordillerano en tres unidades morfológicas fundamentales que aparecen íntimamente ligadas: Remanentes del Macizo Andino; Valles, lagunas y glaciares; Estructuras volcánicas.

1) Remanentes del Macizo Andino

Está compuesto principalmente por formaciones mesozoicas, terciarias y diversos cuerpos intrusivos. Presenta una altura media entre los 2500 m s.n.m. y los 2000 m s.n.m.

El macizo andino ha sido fuertemente erosionado y disectado, principalmente por la acción de los glaciares en el Pleistoceno y la acción fluvial que continua hoy en día. Esto genera amplios y profundos valles transversales, donde persisten núcleos montañosos aislados cuyas geoformas evidencian un control ejercido por la litología dominante y las estructuras presentes.

Debido a los procesos que generaron los cordones montañosos, existen unidades sedimentarias plegadas que dan origen a relieves especiales, mientras que la erosión diferencial genera formas poco comunes, del tipo de hongos y torreones, en las rocas volcánicas.

2) Valles, Lagunas y Glaciares

Valles: Conforman las formas de relieve de mayores dimensiones y tienen su origen ligado directamente a la erosión glacial y fluvial.

Generalmente, se reconocen fácilmente por los niveles aterrazados compuestos por sedimentos fluviales o glaciofluviales que han sepultado la vaguada principal de los valles, donde se generan largas planicies que crecen hacia aguas abajo, ubicándose en la precordillera.

Lagunas: La mayor parte de ellas están emplazadas en pequeñas cuencas, testimonio de un doble origen: glacial o tectónico (Börgel, 1983). Estas cuencas fueron cerradas por sedimentos provenientes de glaciares o materiales volcánicos; estos últimos, han formado lagunas en el curso de los valles. Existen una gran cantidad de pequeñas lagunas depresiones volcánicas de edad cuaternaria.

Está presente un alineamiento N-S de estas cuencas, que aparece escoltado por edificios volcánicos, lo cual corresponde una característica distintiva regional (Börgel, 1983).

Glaciares: Según los autores (González-Ferrán y Vergara 1962), la línea de equilibrio de las nieves persistentes se extendería, de Norte a Sur, aproximadamente entre las cotas 3.100 y 2.700 m s.n.m.; esto está de acuerdo con el diagrama de Lliboutry (1965), lo que significa que gran parte de los glaciares y campos de nieves permanentes quedan restringidos a los núcleos volcánicos o cumbres más destacadas.

Los edificios volcánicos del Callaqui y Copahue contienen manifestaciones glaciares en el área de estudio. Los campos de hielo y nieve del Callaqui descenderían hasta las cotas 1.900 a 2.100 m s.n.m.

3) Estructuras Volcánicas

Sobre la superficie de la cordillera andina, se ubican grandes edificios volcánicos, cuyas cumbres alcanzan los 4.000 metros en el Norte y llegan a los 3.400 m s.n.m. en las regiones más australes.

La distribución de estos edificios volcánicos estaría controlada por grandes estructuras que han condicionado su alineamiento, agrupación y ubicación.

En la zona cercana al área que abarca este estudio se encuentran dos estructuras volcánicas importantes como son los volcanes Callaqui y Copahue. Este último, está ubicado en la divisoria de aguas y presenta pendientes mejor conservadas que el primero; sus coladas se extienden por suaves declives hacia las planicies de la Sierra de Malla-Malla como hacia el territorio argentino, mientras, en la zona de los Baños de la vertiente Norte, dichas coladas terminan abruptamente sobre el valle.

Por otra parte, González Ferrán y Vergara (1962) describen también la hidrografía del área de estudio. Esta descripción considera las características hidrológicas generales y principalmente al carácter del escurrimiento superficial, en la zona. La descripción importante para este estudio es el de la Hoya del río Biobío. Esta es una de las hoyas más importantes del país, en cuanto a su magnitud se refiere. En efecto, su cuenca es del orden de los 23.920 km² y posee el segundo río más largo de Chile, el río homónimo, que mide cerca de 380 km y drena toda el área comprendida entre los paralelos 37° y 39°S. Posee varios tributarios importantes, entre ellos están: Larqui, Polcura, Pichipolcura, Duqueco, Queuco, Cura-Mallín, Ñire-Metún, Cañicu, Otué, Pangué, Vilatregua y Epún.

2.2.1. Unidades Geomorfológicas

Terrazas Fluviales: Superficie plana en forma de meseta producida por el encajamiento de un río sobre su llanura de inundación previa. Al ocurrir esto la antigua llanura de inundación va quedando más elevada que la actual. Generalmente se localizan a ambos lados del río y a la misma altura. En el caso que exista más de un nivel de aterrazamiento, se supone que el valle ha

tenido más de un episodio de encajamiento, donde las terrazas que se encuentran más altas topográficamente corresponden a las más antiguas.

Llanuras de sedimentación: Zona plana situada ligeramente por encima y a ambos lados del cauce de un río (Figura 2.2). Resulta de la acumulación por acción lateral de la corriente, cuando su cauce se encuentra más próximo al nivel de base.



Figura 2.2: Imagen del Rio Biobío aguas abajo, donde se aprecia en un recuadro rojo su llanura de sedimentación.

Llanura aluvial: Corresponde desde el punto de vista morfodinámico a las áreas cubiertas por el agua durante las crecidas que se producen luego de precipitaciones de alta intensidad y duración.

Abanico Aluvial: Depósito de sedimentos en forma de abanico que se forma cuando una corriente pierde velocidad y capacidad de transporte, al pasar de un valle estrecho en un área montañosa a una zona de llanura de menor pendiente.

Cono Volcánico: Se forman por la acumulación tanto de lavas como de depósitos piroclásticos. Son edificios generalmente de gran estabilidad debido a que los flujos de lava protegen los depósitos piroclásticos subyacentes de la erosión.

Valles en forma de U: Con fondo plano (Figura 2.3), es producido por el desplazamiento de una parte de un glaciar. Sólo se observa cuando se retira el hielo.

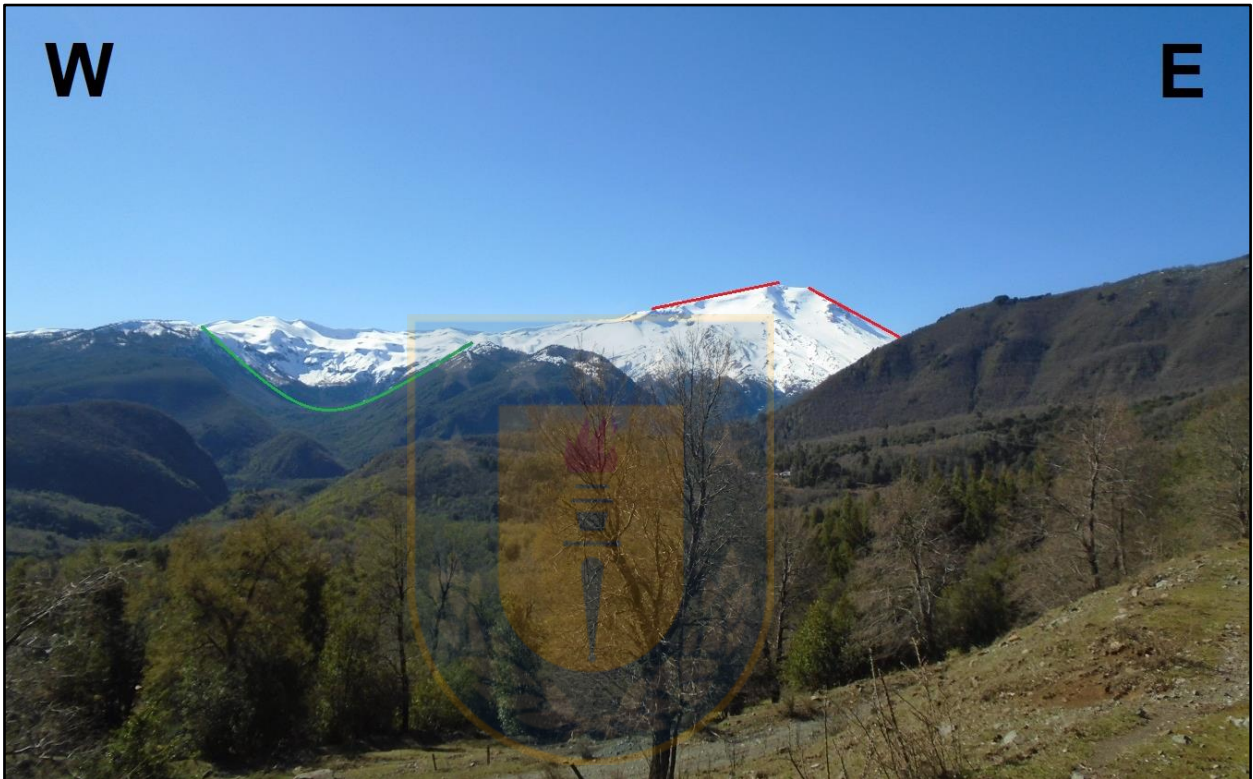


Figura 2.3: Geomorfología presente en el área de estudio. En rojo se encuentra delimitado el cono del volcán Callaqui, mientras que en verde se aprecia un valle en forma de U, originado por el avance de un glaciar.

2.2.2. Análisis del Relieve

2.2.2.1. Elevación

El análisis de las altitudes en el área de estudio es muy importante, debido a que las grandes diferencias de altura entre puntos cercanos puede ser un ambiente propicio para la generación de remociones en masa.

Gracias al programa computacional *ArcGIS*, utilizando un modelo de elevación digital, podemos generar un mapa indicativo de altitudes en el área de estudio (Figura 2.4).

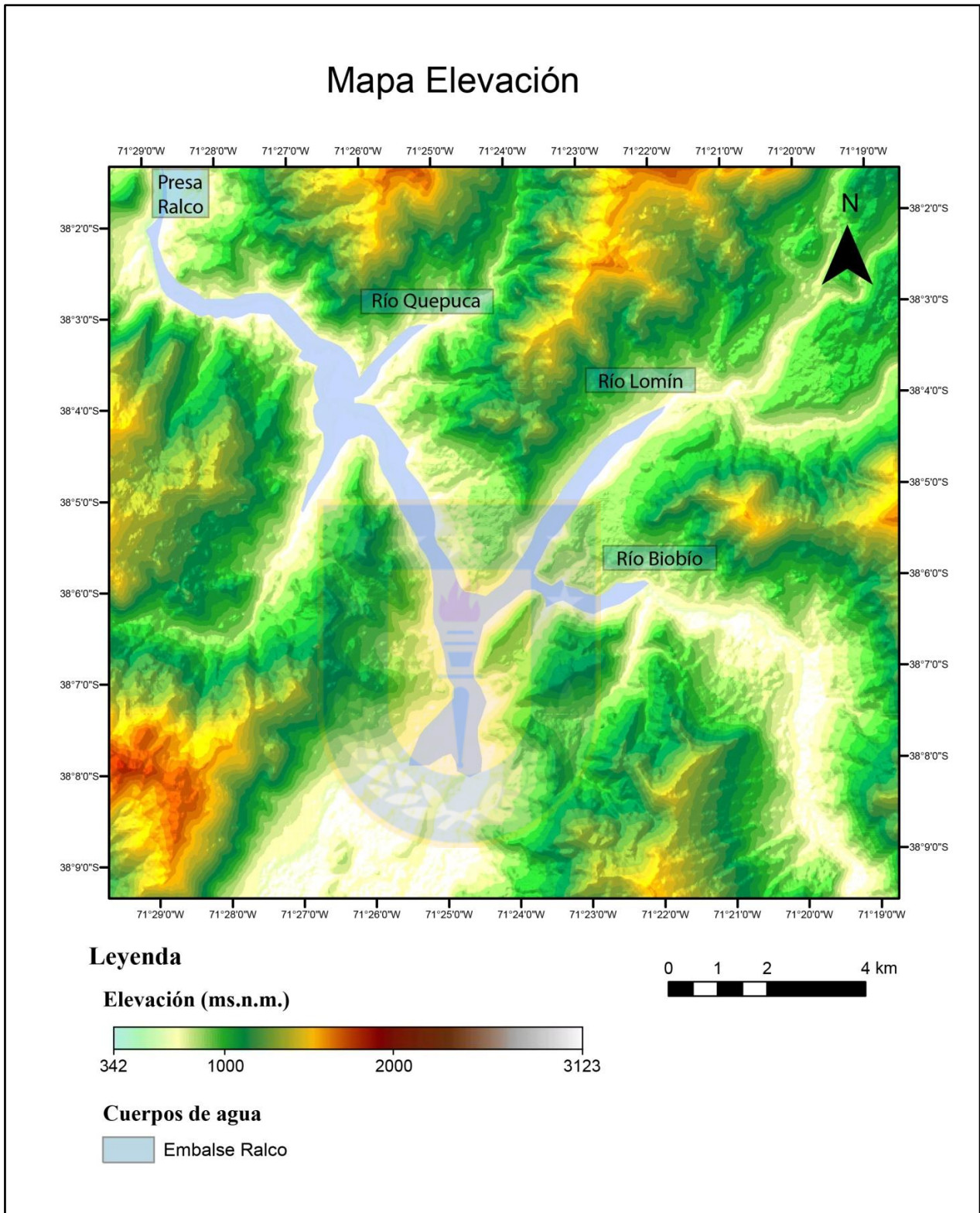


Figura 2.4: Mapa de Elevación del área de estudio.

Los puntos más altos de la zona corresponden a unidades geomorfológicas asociadas a volcanes. Por otra parte, las zonas más bajas (cercanas al nivel base, altura del embalse) corresponden a los cauces de los ríos que modelan la morfología local.

2.2.2.2. Orientación de laderas

El análisis detallado de la orientación de las laderas en el área de estudio es igualmente importante debido a que con él se pueden inferir zonas potencialmente más expuestas a factores climáticos que puedan disminuir su resistencia al corte, y por consiguiente, un proceso de remoción en masa. Mediante el uso de *ArcGIS*, se obtiene un mapa de orientación de laderas, las cuales fueron simplificadas con respecto al Norte, Sur, Este y Oeste. La utilidad de este mapa permite inferir que laderas tienen mayor exposición a la luz solar y estimar aquellas laderas que coinciden con la orientación de las estructuras principales.



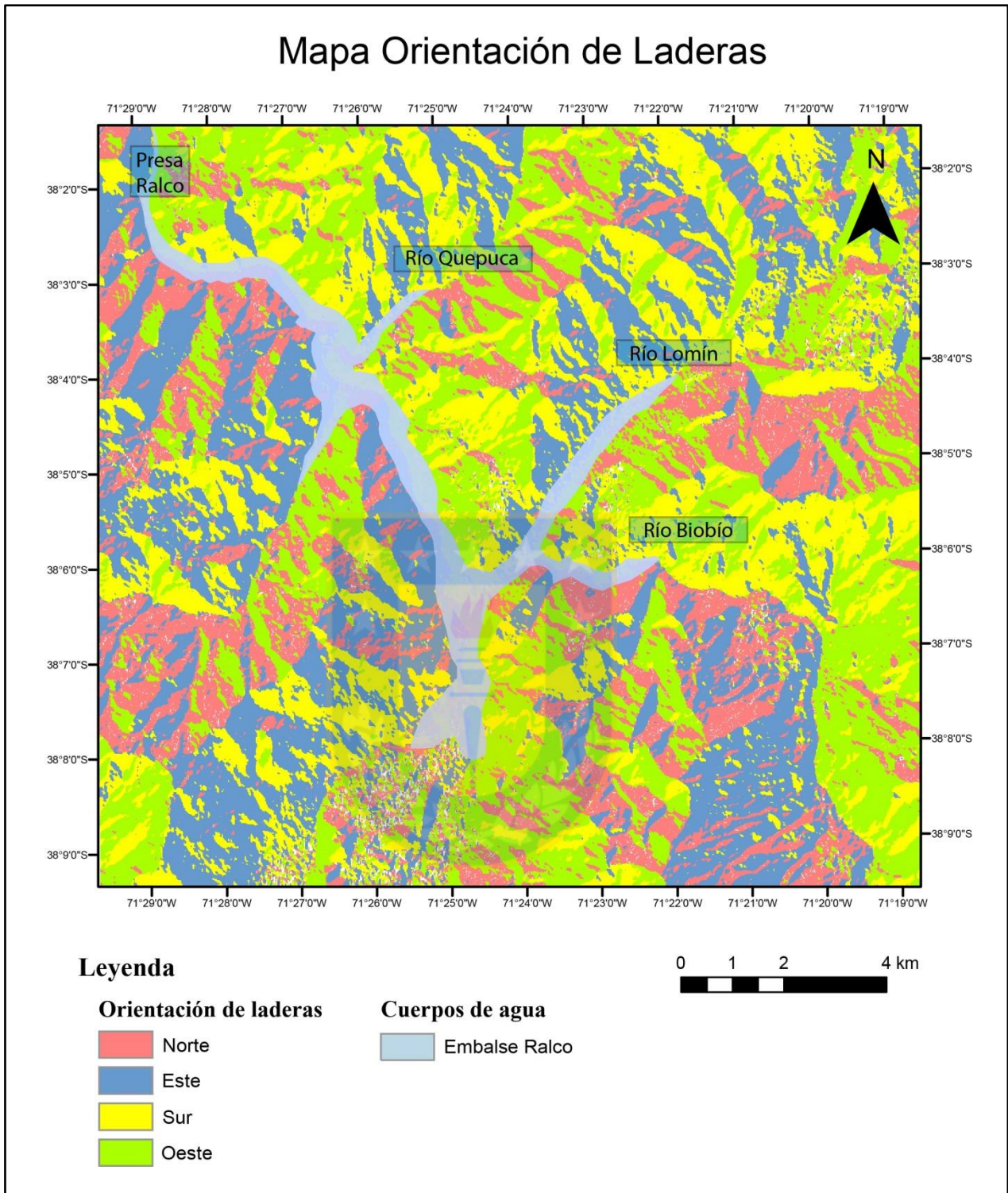


Figura 2.5: Mapa de orientación de las laderas del área de estudio.

2.2.2.3. Pendientes de las laderas

Otra característica a analizar es el ángulo de pendientes de las laderas, debido a que de esto dependen muchos factores desencadenantes que permiten la generación de remociones en masa, como por ejemplo la estabilidad durante sismos.

Las pendientes de las laderas con altos ángulos corresponden a un factor de primer orden para propiciar flujos, deslizamientos y derrumbes. Según Hauser (1993), pendientes mayores a 25° en las cabeceras de las hoyas hidrográficas, son propensas para la generación de flujos o aluviones, sin descartar que puedan ocurrir en pendientes cercanas a los 15° .

Keefer (1984) por su parte considera que en presencia de sismos con intensidades superiores a IV (escala de Mercalli), sumado a taludes de ángulo mayores o iguales a 15° son susceptibles de generar deslizamientos en suelos de tipo traslacional, por otra parte, ángulos mayores o iguales a 10° son suficientes para producir deslizamientos rotacionales.

Para este estudio y mediante el uso de *ArcGIS* (Figura 2.6), se consideró apropiado clasificar la pendiente de las laderas de roca en: i) Ángulos mayores o iguales a 45° , ii) Entre 15° y 45° y finalmente, iii) menores a 15° . Esta subdivisión responde al control de este factor para la generación de deslizamientos, sumado a la potencial incidencia de sismos en el área que podrían generar deslizamientos de roca o bloques.

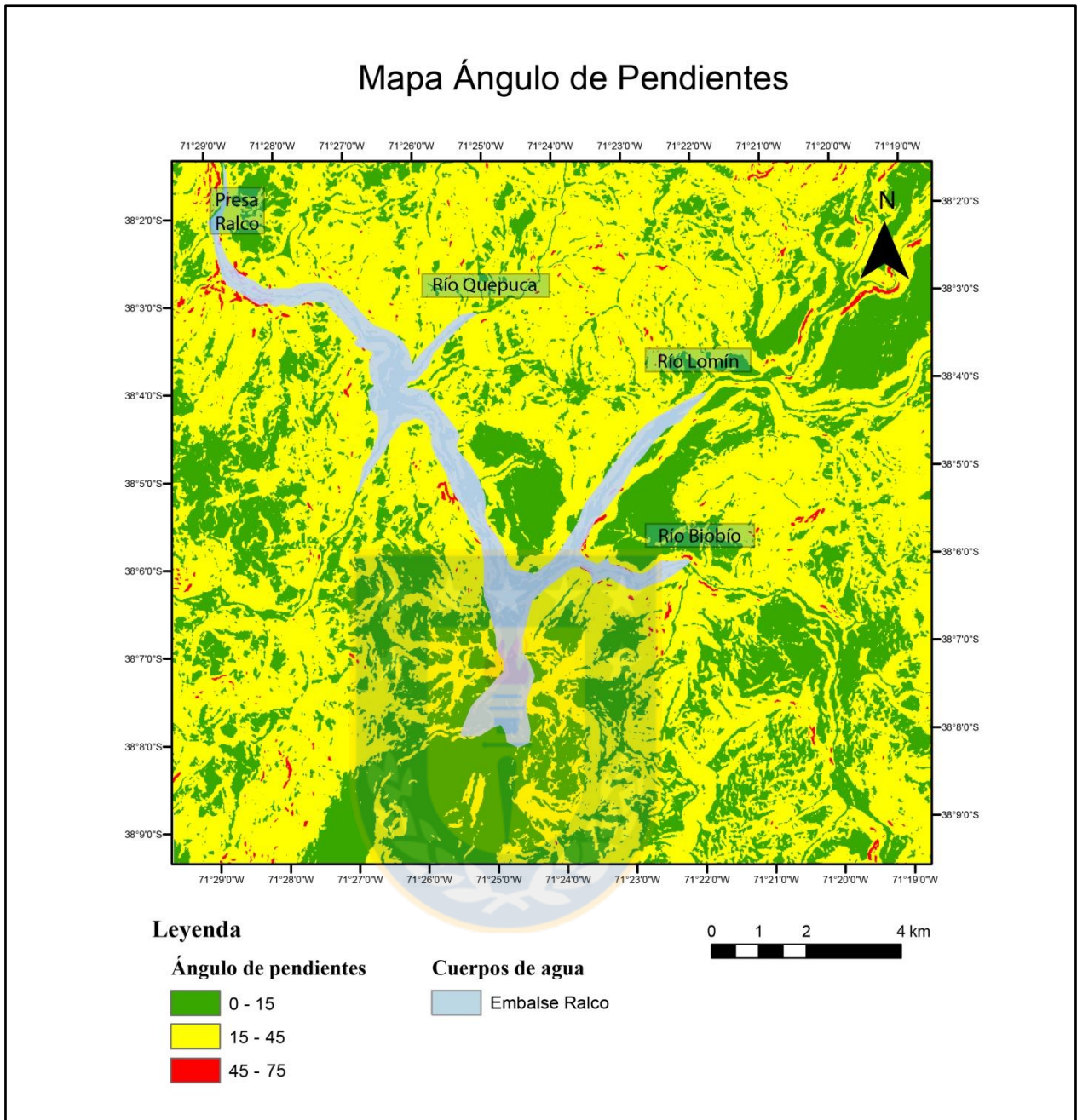


Figura 2.6: Mapa de ángulo de pendientes del área de estudio.

2.2.2.4. Redes de Drenaje

Es importante para el presente estudio, tener una noción de las redes de drenaje presente en la zona. Esto debido a que un aumento en el aporte de agua a los macizos rocosos cercanos a esteros, ríos o tributarios de menores dimensiones, puede ser asociado a una disminución en su

competencia, pudiendo ser un factor condicionante para favorecer ocurrencias de remociones en masa.

La determinación de las redes de drenaje del área de estudio se realizó mediante fotointerpretación de imágenes satelitales (Figura 2.7), utilizando el software *ArcGIS* 10.6. Para lo anterior se utilizaron las sombras generadas por los valles labrados por la acción del agua.

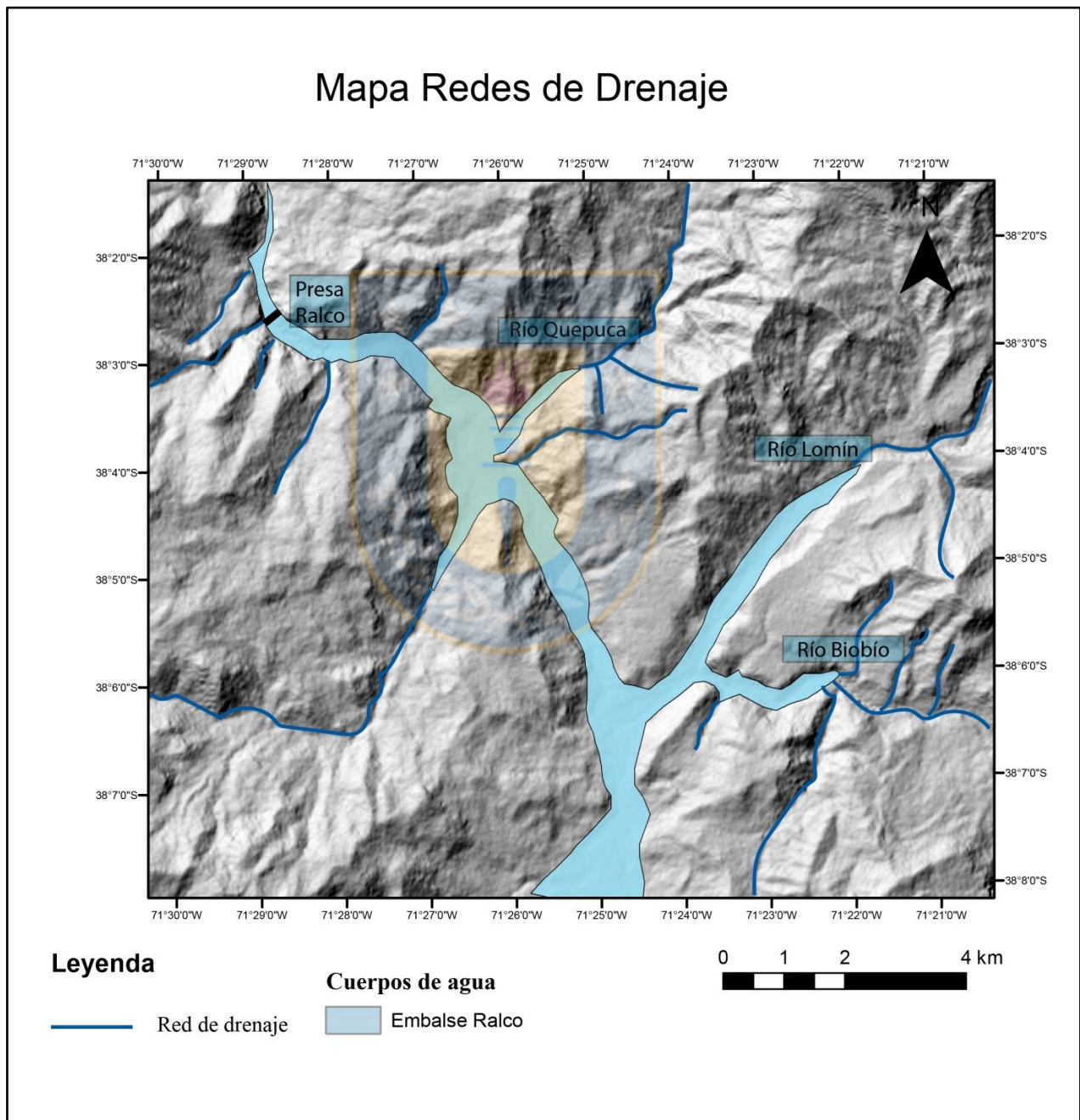


Figura 2.7: Mapa de las redes de drenaje más importantes del área de estudio.

3. MARCO GEOLÓGICO

3.1. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

3.1.1. Generalidades

El área de estudio se encuentra enmarcada en un contexto regional, donde la presencia de edificios volcánicos y sus productos intrusivos y extrusivos componen una parte importante de la geología local.

En el área comprendida por la Hoja Laguna de La Laja (Niemeyer y Muñoz, 1983) se encuentran cinco unidades litoestratigráficas, cuyas edades se enmarcan entre el Eoceno y el Cuaternario. Estas unidades son: Formación Cura-Mallín: dividida en un miembro inferior (Miembro Río Queuco) y otro superior (Miembro Malla-Malla), Formación Trapa-Trapa, Formación Cola de Zorro, Volcanes y Flujos Lávicos y Depósitos No Consolidados. Todas las unidades anteriores se encuentran resumidas en la figura 3.1 de Sielfeld (2008).

Las unidades terciarias se encuentran intruídas por cuerpos porfídicos de composición diorítica a andesítica, todos ellos emplazados entre el Mioceno Superior y el Plioceno-Pleistoceno (Niemeyer y Muñoz, 1983).

3.1.2. Rocas estratificadas

3.1.2.1. Formación Cura-Mallín (Eoceno-Mioceno)

La formación Cura-Mallín obtiene su nombre del estero homónimo y fue definida en primera ocasión por González y Vergara (1962). Estos autores definieron de manera separada a la Formación Cura-Mallín y a la Formación Malla-Malla. Sin embargo, Niemeyer y Muñoz (1983) en la Hoja Laguna de La Laja, integran la Formación Malla-Malla como Miembro Superior de la Formación Cura-Mallín, siendo el Miembro Inferior Río Queuco, cuya diferencia radica en la presencia de rocas volcanoclásticas. Cabe mencionar que estos miembros se encuentran de manera concordante y transicionales entre sí (Niemeyer y Muñoz, 1983).

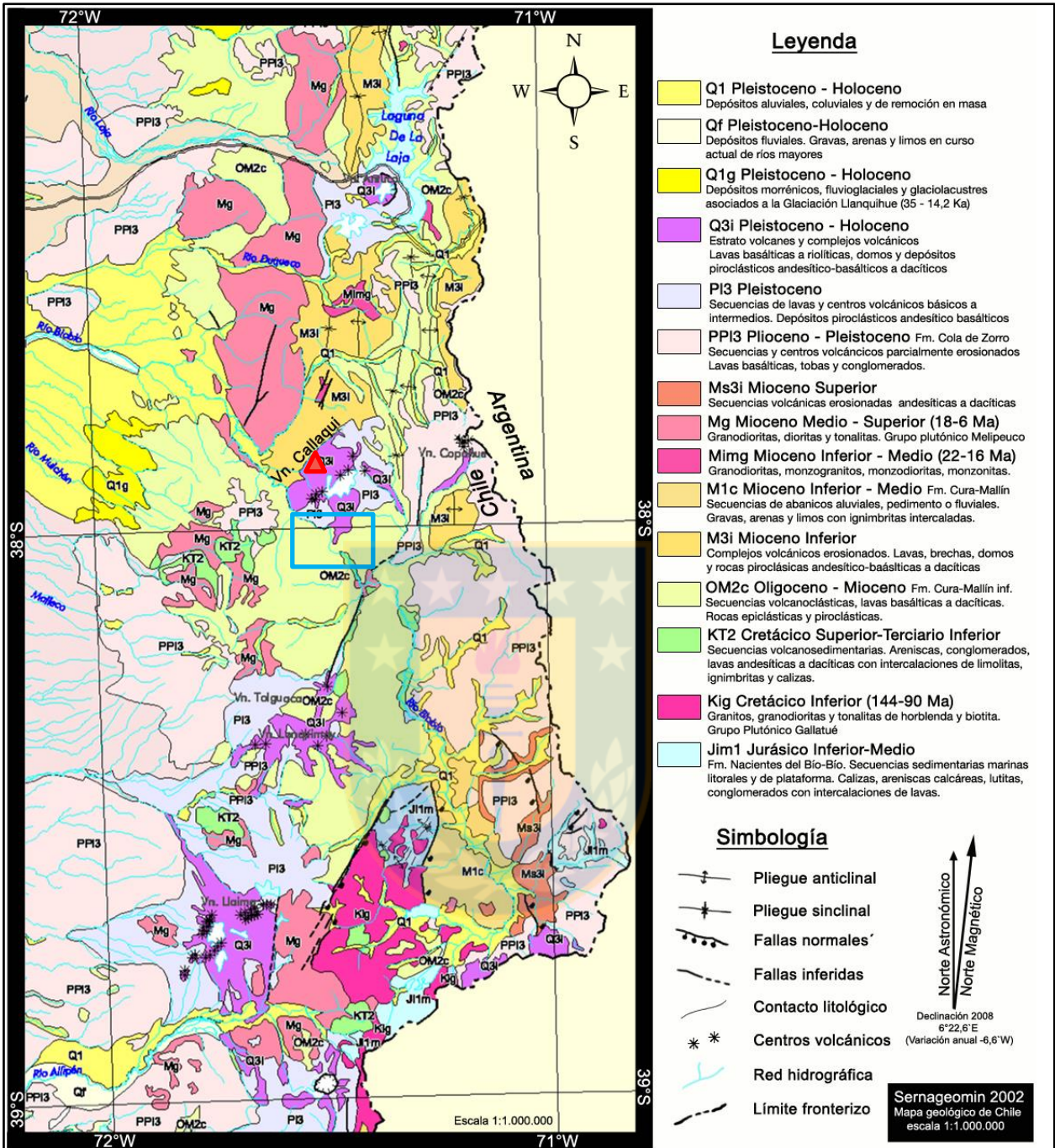


Figura 3.1: Mapa geológico regional entre los 37°S y los 39°S, en la zona Cordillerana de las regiones del Biobío y la Araucanía. En el rectángulo azul se enmarca el área de estudio, mientras que el triángulo color rojo indica la posición del Volcán Callaqui. Modificado de Sielfeld, 2008.

Estos autores la describen como una secuencia con muy buena estratificación, donde su base, correspondiente al Miembro Río Queuco, está integrada por tobas brechosas y tobas finas de colores pardo-verdoso, blanco, morado, verde, rosado y gris claro. El Miembro Malla-Malla por

su parte, posee un origen sedimentario-terrágeno y está conformado por conglomerados, areniscas y lutitas, de colores verde-oliva y verde-amarillento, con intercalaciones carbonosas y calcáreas.

3.1.2.2. Formación Trapa-Trapa (Mioceno Medio-Mioceno Superior)

La Formación Trapa-Trapa fue definida como una nueva unidad por Niemeyer y Muñoz en la Hoja Laguna de La Laja (1983). Está compuesta por una secuencia de agregados volcánicos, lavas andesíticas y conglomerados, que se encuentran concordantes y de manera transicional sobre el Miembro Malla-Malla. Limita en su techo con la Formación Cola de Zorro mediante una discordancia angular.

3.1.2.3. Formación Cola de Zorro (Plioceno-Pleistoceno)

Definida por González y Vergara (1962), en el cajón homónimo, donde corre el tributario del río Los Sauces. Está compuesto por una secuencia de andesitas, andesitas basálticas y basaltos de colores gris a pardo oscuro, con presencia importante de aglomerados volcánicos, grises, pardos y pardo-amarillentos (Niemeyer y Muñoz, 1983). Esta formación corresponde a los productos volcánicos del arco Plioceno-Pleistoceno, por lo que se pueden distinguir cuatro secuencias características (Sielfeld, 2008): Secuencia de El Barco: compuesta por brechas y aglomerados volcánicos, lavas basálticas y andesítico-basálticas; Secuencias de Pemehue: constituidas por lavas andesíticas de gran potencia; Secuencia de Pachá: corresponden a brechas volcánicas, aglomerados y tobas aisladas. También presentan lavas andesíticas y andesítico-basálticas; y Secuencia de Pitril: presenta principalmente lavas basálticas, andesítico-basálticas y andesíticas. Contiene de manera subordinada intercalaciones de aglomerados y tobas de ceniza y lapilli.

Por lo general, se presentan en afloramientos como paquetes de lava que se disponen de manera subhorizontal, bien estratificados, que sobreyacen en discordancia angular a las rocas plegadas de la Formación Cura-Mallín y Trapa-Trapa. Sobre la Formación Cola de Zorro se encuentran, con discordancia de erosión, las lavas pertenecientes a los volcanes Antuco y Copahue.

3.1.2.4. Volcanes y Flujos Lávicos (Pleistoceno-Holoceno)

En la Hoja Laguna de La Laja (Niemeyer y Muñoz, 1983) se agrupan con este nombre a los volcanes y los flujos de lava pleistoceno-holocénicos, que se disponen de manera pseudo-concordante o mediante discordancia de erosión, sobre las volcanitas de la Formación Cola de Zorro. Además, algunas coladas se disponen mediante discordancia angular a las formaciones Cura-Mallín y Trapa-Trapa.

Están constituidos en su mayor parte por coladas basálticas, andesíticas y andesítico-basálticas, de colores negro, gris y pardo-rojizo, intercaladas con brechas autoclásticas y material piroclástico subordinado. El volcán Callaqui se encuentra de manera pseudo-concordantemente, sobre las lavas y aglomerados de la Formación Cola de Zorro. Los productos volcánicos son de composición basáltica, andesítico-basáltica y andesíticas.

3.1.2.5. Depósitos No Consolidados (Cuaternario)

Los depósitos no consolidados están compuestos por morrenas, terrazas fluviales y glacio-fluviales, escombros de falda y deslizamientos de suelo y rocas.

3.1.3. Rocas intrusivas

3.1.3.1. Stocks de Granodiorita-Diorita (Mioceno)

Niemeyer y Muñoz (1983) designan esta denominación a pequeños cuerpos plutónicos que intruyen a la formación Cura-Mallín y Trapa-Trapa. Estos cuerpos se encuentran cubiertos con discordancia de erosión por las volcanitas de la Formación Cola de Zorro. Con estos antecedentes se le puede interpretar una edad, la cual corresponde a Mioceno Superior. Pesce (1981) obtuvo una edad K-Ar de 15 ± 2 Ma en una granodiorita ubicada cerca del Paso Los Columpios, lo cual se condice con la interpretación realizada por los autores nombrados anteriormente. La composición petrográfica de estas rocas corresponde principalmente a diorita, diorita cuarcífera y granodiorita.

3.1.3.2. Stocks de Riodacita (Mioceno Superior)

Niemeyer y Muñoz en la Hoja Laguna de La Laja (1983) agrupan bajo esta denominación dos cuerpos pequeños riódacíticos, que intruyen a las formaciones Cura-Mallín y Trapa-Trapa al oriente del estero homónimo. Se encuentran cubiertos con discordancia por la Formación Cola de Zorro, lo que restringe su edad al Mioceno Superior.

3.1.3.3. Stocks y Filones Andesítico-Basálticos (Plioceno-Pleistoceno)

Se le asigna esta clasificación a pequeños cuerpos intrusivos, de composición intermedia que intruyen a las formaciones Cura-Mallín, Trapa-Trapa y Cola de Zorro. Niemeyer y Muñoz (1983) le asignan una edad pliocena-pleistocena, sin embargo, no descartan la posibilidad de que algunos de estos cuerpos se hayan emplazado durante el Mioceno.

3.2. MARCO GEOTECTÓNICO REGIONAL

3.2.1. Generalidades

Debido a que desde aproximadamente 49 Ma existe una subducción dextral oblicua con respecto al margen occidental chileno, exceptuando el periodo entre los 26-20 Ma donde la subducción fue casi ortogonal (Cembrano *et al.*, 1996), se intenta explicar el origen de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO), la cual cumple un rol fundamental en el volcanismo cuaternario de la Zona Volcánica Sur (ZVS).

3.2.2. Características de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO)

La Zona de Falla Liquiñe-Ofqui tiene una longitud aproximada de 1200 km, desde la zona del Istmo de Ofqui (48°S) hasta al menos el Complejo Volcánico Callaqui-Copahue-Mandolegüe (38°S) (Sielfeld, 2008). Fue descrita por primera vez por Steffen (1944), más tarde rebautizada Falla Liquiñe-Reloncaví por Moreno y Parada (1974) y posteriormente recibe el nombre actual por Hervé *et al.* (1979).

El inicio de la ZFLO puede remontarse al Mesozoico a lo largo del arco magmático (Cembrano *et al.*, 1996), sin embargo, durante el Eoceno-Mioceno (48-26 Ma) tuvo lugar un reinicio o reactivación de esta estructura, con un régimen transpresivo dextral (Lara *et al.*, 2006). Debido a

su posición paralela a la fosa y presencia abundante de indicadores cinemáticos de desplazamiento horizontal, Lara *et al.* (2006) considera a gran escala la ZFLO como una megafalla dextral.

Estudios anteriores han podido identificar tres tipos de lineamientos bastante bien definidos: el primero corresponde a dos lineamientos NNE, los cuales tienen cientos de kilómetros de largo, los segundos son cuatro tendencias NE, rectos, en echelón, los cuales tienen una longitud de decenas de kilómetros y finalmente tres NNW lineamientos curvados, los cuales tienen cientos de kilómetros de largos (Cembrano *et al.*, 1996)

Un conjunto de sismos de magnitud hasta 3.8 Mw (Figura 3.2) que ocurrieron a lo largo de la ZFLO en un periodo de 11 meses durante los años 2006 y 2007, que sumado a su ubicación cercana a la superficie indica una actividad en curso por parte de esta gran estructura (Lange *et al.*, 2008).



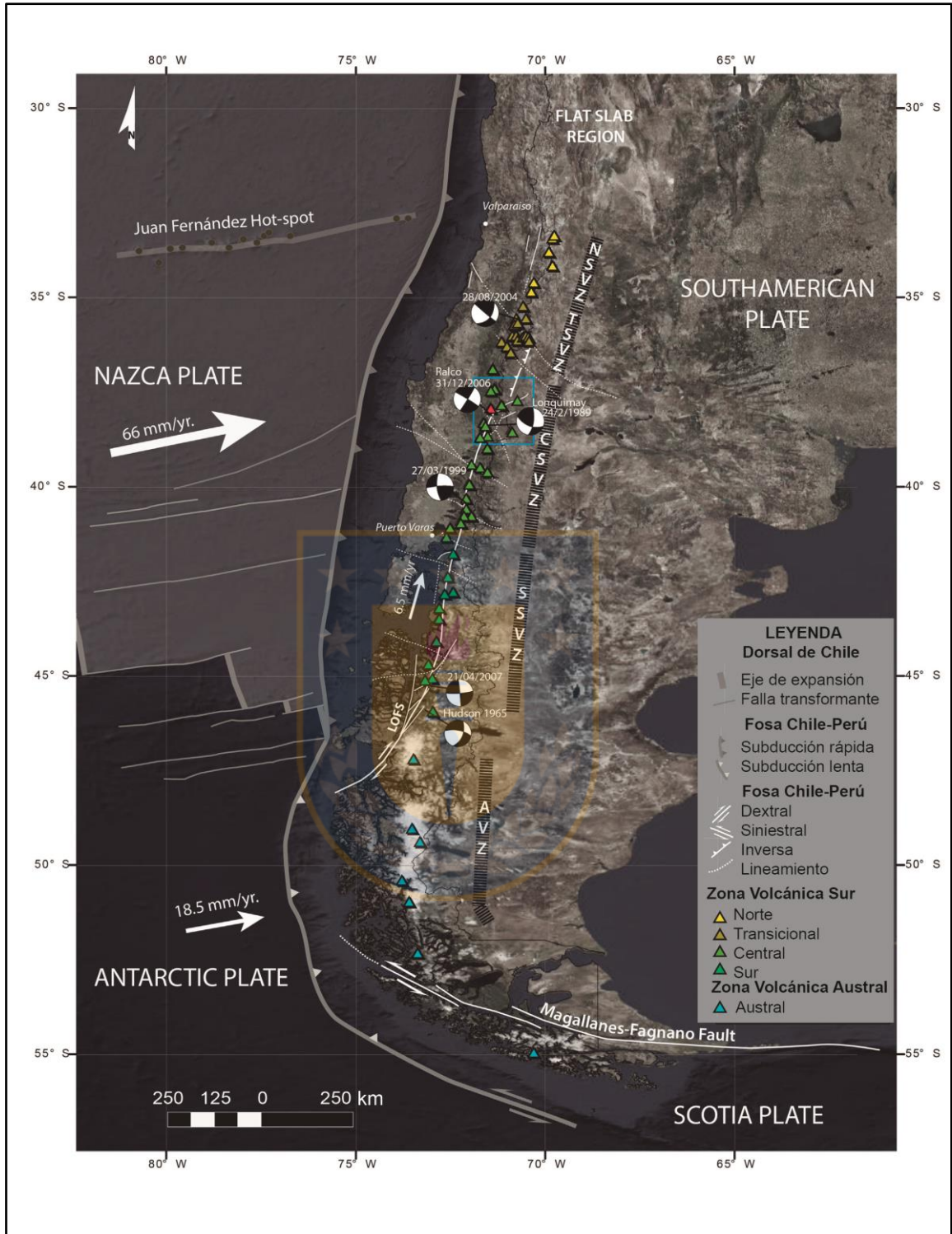


Figura 3.2: Mapa geotectónico de Chile. Diagramas de pelotas de playa indican mecanismo focal de los sismos ocurridos a lo largo de la ZFO (Lange *et al.*, 2008). El recuadro de color azul indica el área de estudio. Modificado de Sielfeld *et al.*, 2017.

Desde el Pleistoceno Inferior, la ZFLO habría concentrado parte de la deformación frágil en el arco y servido de canal de ascenso para los magmas (Lara *et al.*, 2006) lo cual es muy relevante por la sismicidad implicada en estos pulsos magmáticos.

Al Norte de los 40°S, la ZFLO desarrolla una serie de lineamientos *en-echelón* que adoptan una orientación NNE a NE entre los 39° y 38°S, donde se intercepta un arreglo geométrico complejo, con una serie de fallas transcurrentes NW, de las cuales las fallas Biobío y Lanalhue son las principales (Folguera *et al.*, 2002; Melnick *et al.*, 2006 y 2008; Moreno *et al.*, 2008).

3.3. MARCO GEOLÓGICO LOCAL

El basamento de roca de la zona de Ralco está compuesto por rocas intrusivas miocenas y por rocas volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias pertenecientes a las formaciones Cura-Mallín y Trapa-Trapa.

Los sedimentos cuaternarios están integrado por una secuencia volcánica de edad pleistocena superior y por depósitos de relleno sedimentario que están conformados por: depósitos fluviales antiguos, recientes, actuales y conos aluviales; depósitos de remoción en masa y depósitos glaciares (Varela *et al.*, 1987).

Las rocas ígneas que se encuentran en el área de estudio varían en cuanto a su composición desde basálticas a andesíticas. Estos cuerpos tuvieron un emplazamiento a una profundidad somera a media, por lo que presentan una textura pórfidica.

Por otra parte, afloran en el área de estudio rocas sedimentarias finas, posiblemente de origen lacustre, perteneciente al miembro Malla-Malla de la formación Cura-Mallín.

3.3.1. Formación Cura-Mallín (Eoceno-Mioceno)

Corresponde a una secuencia de rocas volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias, que ha sido dividida en dos sub-unidades: Miembro Río Queuco y Miembro Malla-Malla.

La edad de esta formación corresponde al Eoceno-Mioceno (Moreno *et al.*, 1984 y Thiele *et al.*, 1987).

3.3.1.1. Miembro Río Queuco

En la zona de Ralco, aguas arriba de la angostura, afloran rocas pertenecientes al Miembro Río Queuco, las cuales corresponden a rocas volcánicas y volcanoclásticas.

Este miembro está constituido por una secuencia de areniscas, conglomerados finos y tobas arenosas. Presentan una reconocible estratificación, acentuada por las alternancias de bancos tobáceos de colores pardo-verdosas, blancas y moradas entre otros (Niemeyer y Muñoz, 1983).

El contacto con las lutitas del Miembro Malla-Malla no fue posible determinarlo con exactitud, pero si se logra observar que sobre esta unidad se apoyan, discordantemente, los estratos volcánicos de la Formación Trapa-Trapa (Varela *et al.*, 1987).

En terreno no se encontraron afloramientos con rocas de este miembro, sin embargo, por bibliografía (Cecioni *et al.*, 2000) se sabe que existen rocas de esta unidad en el área de estudio.

3.3.1.2. Miembro Malla-Malla

Está presente en el área con numerosos afloramientos, sin embargo, no presentan una gran continuidad lateral. Se trata de paquetes de rocas de grano fino (Figura 3.3), un claro ambiente de sedimentación lacustre, los que consisten en alternancias de capas de pocos centímetros de espesor de lutitas, limolitas y areniscas, con intercalaciones carbonosas y calcáreas (Varela *et al.*, 1987).



Figura 3.3: Lutitas pertenecientes al Miembro Malla-Malla de la Formación Cura-Mallín. Se caracterizan por el color grisáceo y el intenso diaclasado.

Los límites de este miembro se presentan como una interdigitación lateral con las tobas que lo infrayacen (Miembro Río Queuco) y con las lavas y brechas volcánicas sobreyacentes de la Formación Trapa-Trapa, constituyendo, una cuña sedimentaria entre ambos (Niemeyer y Muñoz, 1983).

Se reconoce en varios lugares del área de estudio, en contacto con la roca intrusiva gábrica que lo intruye, lo que genera zonas muy restringidas de metamorfismo, las cuales se evidencian por presencia de rocas córneas intensamente silicificadas y muy densamente fracturadas (Varela *et al.*, 1987).

Las rocas sedimentarias pertenecientes al Miembro Malla-Malla están muy deformadas, plegadas y falladas, en toda la Región del Biobío donde ellas afloran, por una tectónica compresiva regional ocurrida a fines del Mioceno (Moreno *et al.*, 1984; Thiele *et al.*, 1987).

3.3.2. Formación Trapa-Trapa (Mioceno Medio-Mioceno Superior)

Afloran hacia el extremo oriental del área de estudio, en el flanco oriental del río Biobío. Está compuesta por una secuencia estratificada de aglomerados volcánicos, lavas andesíticas y brechas (Figura 3.4). Se encuentran en posición sub-horizontal y de manera discordante sobre el miembro Río Queuco de la Formación Cura-Mallín (Varela *et al.*, 1987).

Debido a los últimos estudios realizados por Muñoz y Niemayer (2010) la edad de rocas volcánicas datadas mediante el método K-Ar arrojó una edad miocena media a miocena superior.

3.3.3. Rocas Intrusivas

En el área de estudio afloran dos tipos de rocas intrusivas, el primero se extiende por toda la angostura Ralco, en el flanco occidental del río Biobío, que corresponde a un cuerpo hipabisal diabásico, mientras que el segundo se expone de manera subordinada, los cuales corresponden a pórfidos andesíticos que sólo tienen una relevancia local.

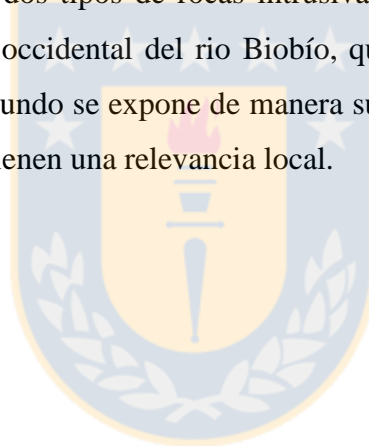




Figura 3.4: Afloramiento de lavas andesíticas pertenecientes a la formación Trapa-Trapa. Por lo general se muestran bien preservadas, sin signos de desprendimientos.

3.3.3.1. Cuerpo Diabásico Principal

Está compuesto por algunos pórfidos dioríticos a basálticos con textura diabásica. Se extiende a lo largo de la angostura Ralco, principalmente aguas abajo desde el punto donde desemboca el río Huiru y, en específico, en el flanco occidental del río Biobío.

Esta unidad presenta diques de composición andesítica que cortan de manera aleatoria al cuerpo diabásico (Figura 3.5), aprovechando los planos de debilidad generados por las abundantes diaclasas existentes (Varela *et al.*, 1987).

Presenta alteración a cloritización y argilización, lo cual genera una poco importante disminución de sus propiedades mecánicas (Karzulovic *et al.*, 1979).

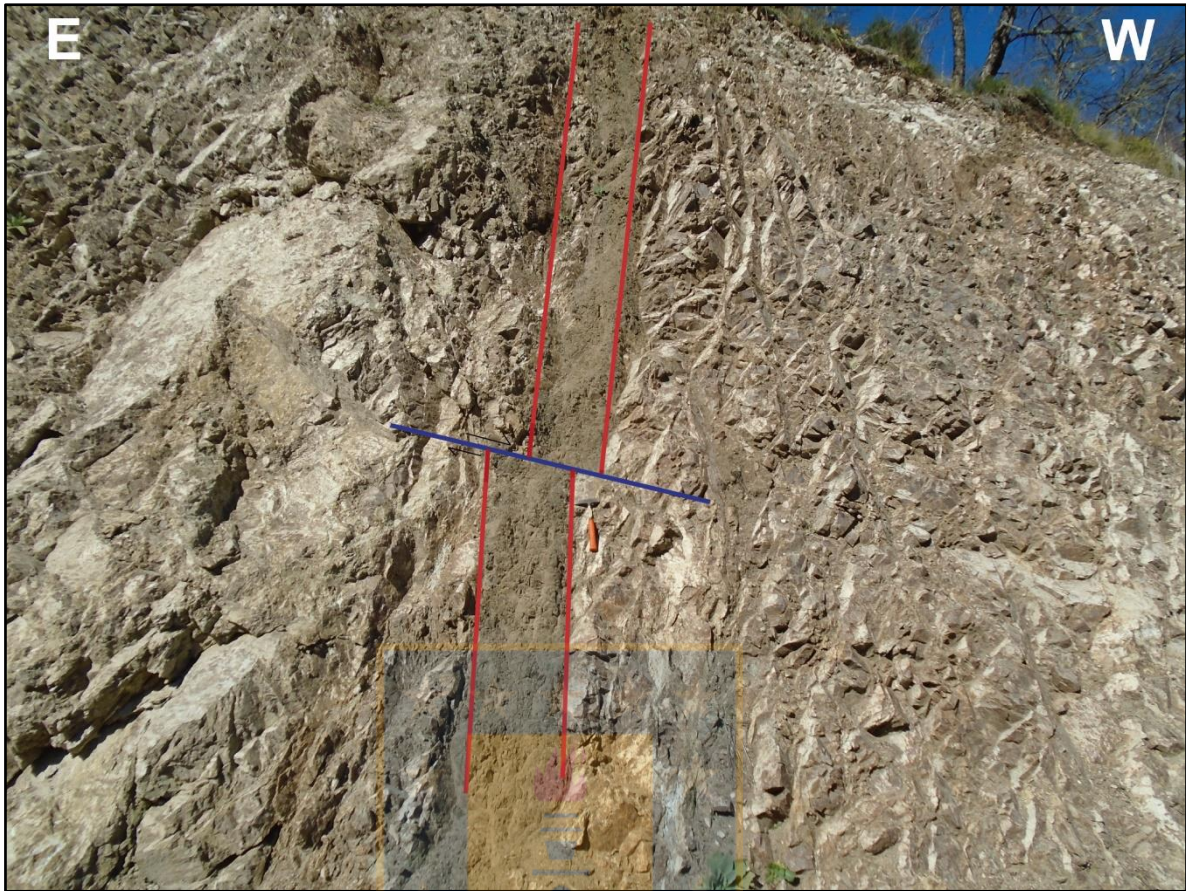


Figura 3.5: Dique desplazado por falla de tipo normal. La composición del dique es andesítica e intruye rocas de la formación Cura-Mallín.

3.3.3.2. Cuerpos Menores de Pórfidos Andesíticos

Corresponden a pequeños cuerpos de pórfidos andesíticos que afloran en el costado oriental del río Biobío, entre el estero Lleuque y la localidad de Palmucho, y por debajo de la cota 850 m.

Presentan alteración a arcillas y abundante diaclasado, lo cual disminuye las propiedades geomecánicas.

3.3.4. Depósitos Recientes

En el área de estudio se encuentran diversos tipos de depósitos recientes, los cuales debido a la acción de glaciares, ríos o incluso la gravedad, generan rasgos geomorfológicos distintivos. Se pueden distinguir tres tipos de estos depósitos de manera clara, teniendo una estrecha relación con los procesos naturales que allí ocurren.

3.3.4.1. Depósitos Fluviales

Caracterizados por presentar una matriz arenosa gruesa a media, y contiene clastos redondeados con diámetros que oscilan entre los 10 y los 80 cm (Figura 3.6). Presentan una clara estratificación interna y acuñamientos, lo cual es indicativo de un paleocanal. El espesor de estos depósitos varía entre los 12 y los 25 m, sobreyaciendo tanto al miembro Malla-Malla como a la Formación Cola de Zorro.



Figura 3.6: Depósitos fluviales antiguos. En azul los límites de un depósito tomando como referencia el ordenamiento de los clastos. Presenta gradación de tamaños desde base a techo, los clastos son redondeados y en su mayoría son líticos ígneos y volcánicos.

3.3.4.2. Depósitos Glaciales

Afloran claramente en el extremo oriental del área de estudio, caracterizado por una matriz semiconsolidada y presencia de clastos muy angulosos y generalmente de grandes diámetros (Figura 3.7).



Figura 3.7: Depósitos glaciales. Corresponde a Till, caracterizado por clastos muy angulosos y matriz semi-consolidada. En azul la base del depósito.

Estos depósitos consisten en materiales transportados por glaciares, que forman diferentes niveles aterrizados. La matriz está constituida por granos tamaño arena en mayor proporción, y de manera menos importante granos de tamaño grava y arcilla, mientras que los clastos son predominantemente de origen volcánico.

3.3.4.3. Depósitos de Remociones en Masa

Estos depósitos están constituidos por una matriz de grano medio a grueso, y presentan clastos angulosos de diámetros comprendidos entre 5 y 150 cm y en menor medida bloques que alcanzan los 2 metros de diámetro. La matriz está constituida por fragmentos líticos de granulometría arena predominante, con cantidades variables de arcilla y ceniza. Por otra parte, los clastos son principalmente fragmentos de lava andesítica.

Mediante el uso de *ArcGIS* 10.6 y utilizando de base el mapa geológico confeccionado por Cecioni *et al.* (2002), se generó un mapa simplificado con las unidades geológicas que afloran en el área de estudio (Figura 3.8), con el fin de utilizar este mapa para la confección de mapas de peligros geológicos.

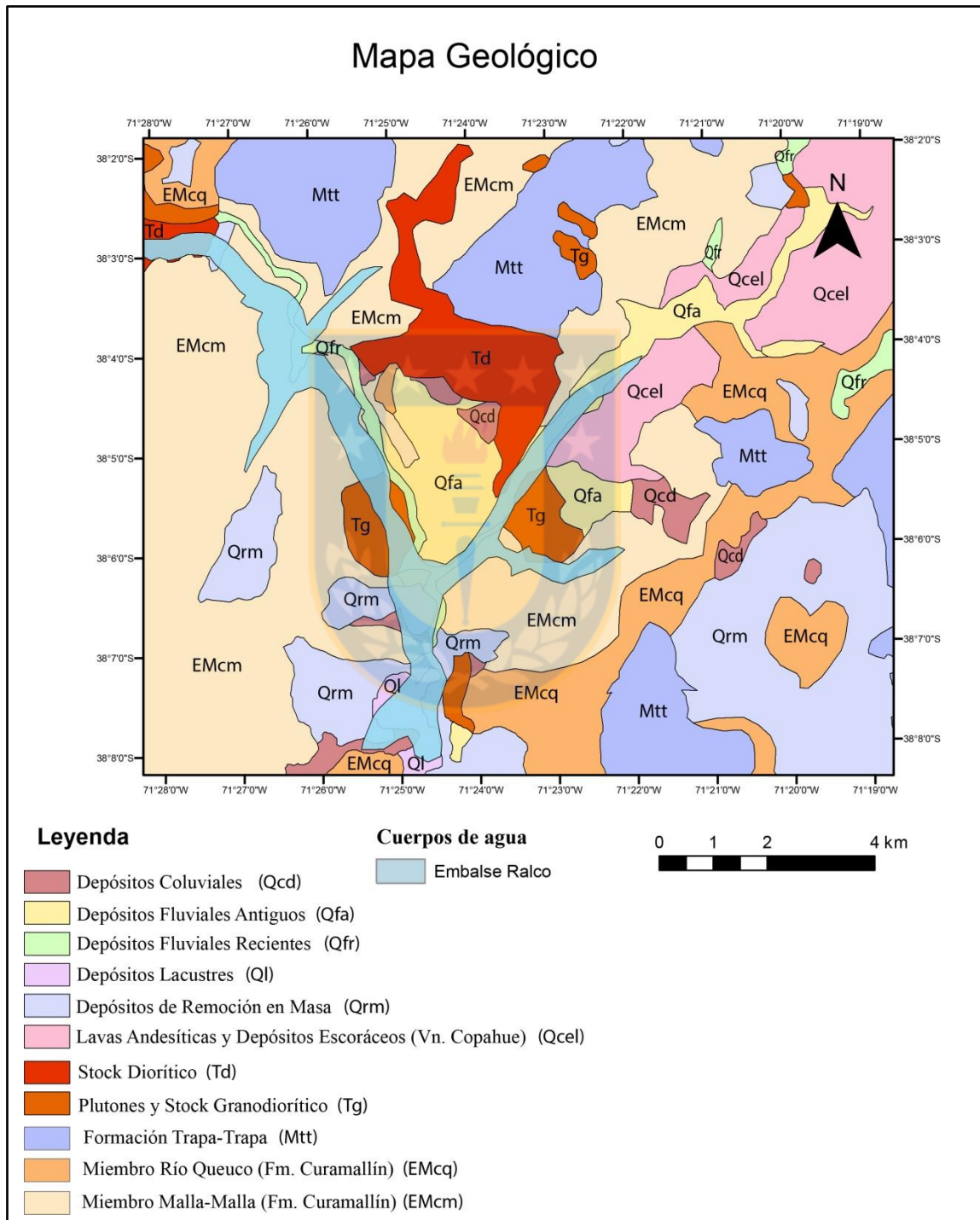


Figura 3.8: Mapa geológico del área de estudio. Modificado de Cecioni *et al.*, 2002.

4. FUNDAMENTOS DE REMOCIONES EN MASA

4.1. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS ASOCIADOS AL RIESGO

Para la correcta comprensión del presente estudio, se requiere esclarecer y precisar las definiciones de una serie de conceptos técnicos, que en el lenguaje común suelen utilizarse como sinónimos. Con la finalidad de aunar criterios, a continuación se definen según Cardona (1991):

Amenaza o Peligro (Hazard - H): Definida como la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente desastroso durante un cierto periodo de tiempo en un sitio dado.

Vulnerabilidad (V): Se define como el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo resultado de la probable ocurrencia de un evento desastroso, expresada en una escala desde 0 o sin daño a 1 o pérdida total.

Riesgo Específico (Specific risk - RS): Como el grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un evento particular y como una función de la Amenaza y la Vulnerabilidad

Elementos Bajo Riesgo (E): Definida como la población, edificaciones, obras civiles, actividades económicas, servicios públicos o infraestructura expuesta en un área determinada.

Riesgo Total (Total Risk- Rt): Se define como el número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica debido a la ocurrencia de evento desastroso, es decir, el producto del Riesgo Específico (Rs) y los elementos Bajo Riesgo (E). Por consiguiente, la evaluación del riesgo puede llevarse a cabo mediante la formulación general:

Riesgo Total = Elementos Bajo Riesgo x (Amenaza x Vulnerabilidad)

Factores Condicionantes: Se definen como aquellos que generan una situación potencialmente inestable, dentro de los cuales se pueden mencionar principalmente la geomorfología, geología, geotecnia y vegetación (Hauser, 1993).

Agentes Desencadenantes: Corresponde a un factor externo que produce una perturbación que gatilla una remoción en masa mediante un incremento de esfuerzos o la reducción de la resistencia del material de una ladera (Wieczorek, 1996 en Lara y Sepúlveda, 2008). Entre los

principales agentes desencadenantes se mencionan las lluvias de gran intensidad y los sismos en primer orden; en un segundo orden se encuentran erupciones volcánicas, la intervención antrópica, la fusión de nieve y la erosión de canales, entre otros.

Ladera: Masa de tierra que no es uniformemente plana, sino que tiene pendiente o ciertos cambios de altura significativos, cuyo origen se debe a procesos naturales (Quezada, 2017)

Talud: Corresponde a una ladera que tiene un origen artificial, es decir, se origina por la acción directa del hombre (Quezada, 2017).

Remoción en Masa: Desplazamiento de grandes volúmenes de material superficial pendiente abajo, provocado por acción directa de la fuerza de gravedad, cuyo final se presenta al momento en que esta masa encuentra un nuevo punto de reposo (Quezada, 2017).

Susceptibilidad: Capacidad o potencialidad de una unidad geológica o geomorfológica a ser afectada por un proceso geológico determinado o por algún agente externo (Sepúlveda, 1998 en Lara y Sepúlveda, 2008).

4.2. REMOCIONES EN MASA

Los procesos de remoción en masa son eventos de transporte de material definidos como una “movilización lenta o rápida de determinado volumen de suelo, roca o ambos, en diversas proporciones, generados por una serie de factores” (Hauser, 1993). Generalmente estos movimientos están fuertemente controlados por la gravedad (Cruden, 1991). En la figura 4.1 se observan las partes que componen una remoción en masa, lo cual es fundamental para su reconocimiento en terreno.

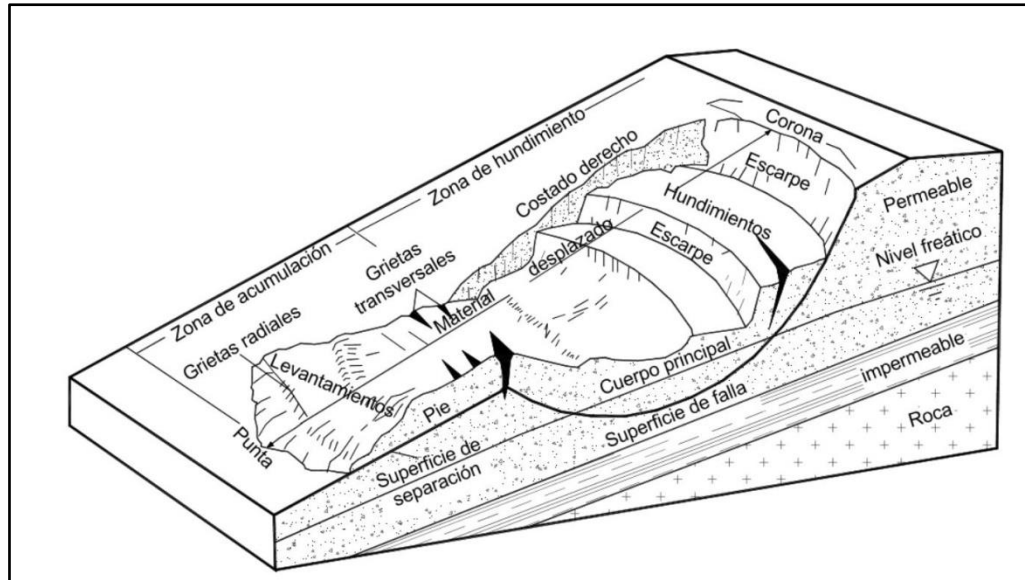


Figura 4.1: Partes de una remoción en masa. Modificado de Lara y Sepúlveda (2008).

Estos movimientos de masa están fuertemente controlados por factores condicionantes propios del tipo de roca o suelo donde se producen, sin embargo, se gatillan debido a agentes desencadenantes, los cuales suelen ser repentinos y de grandes magnitudes.

4.2.1. Tipos de remociones en masa

Cruden y Varnes (1996) han clasificado las remociones en masa según el tipo de movimiento y el material involucrado (Varnes, 1978). Los tipos de movimiento corresponden a caídas (o desprendimientos), volcamiento (o *toppling*), deslizamientos, extensiones laterales y flujos (Figura 4.2). Estos tipos de movimiento pueden evidenciarse de manera individual, o también producirse en conjunto, lo cual no influye en su clasificación.

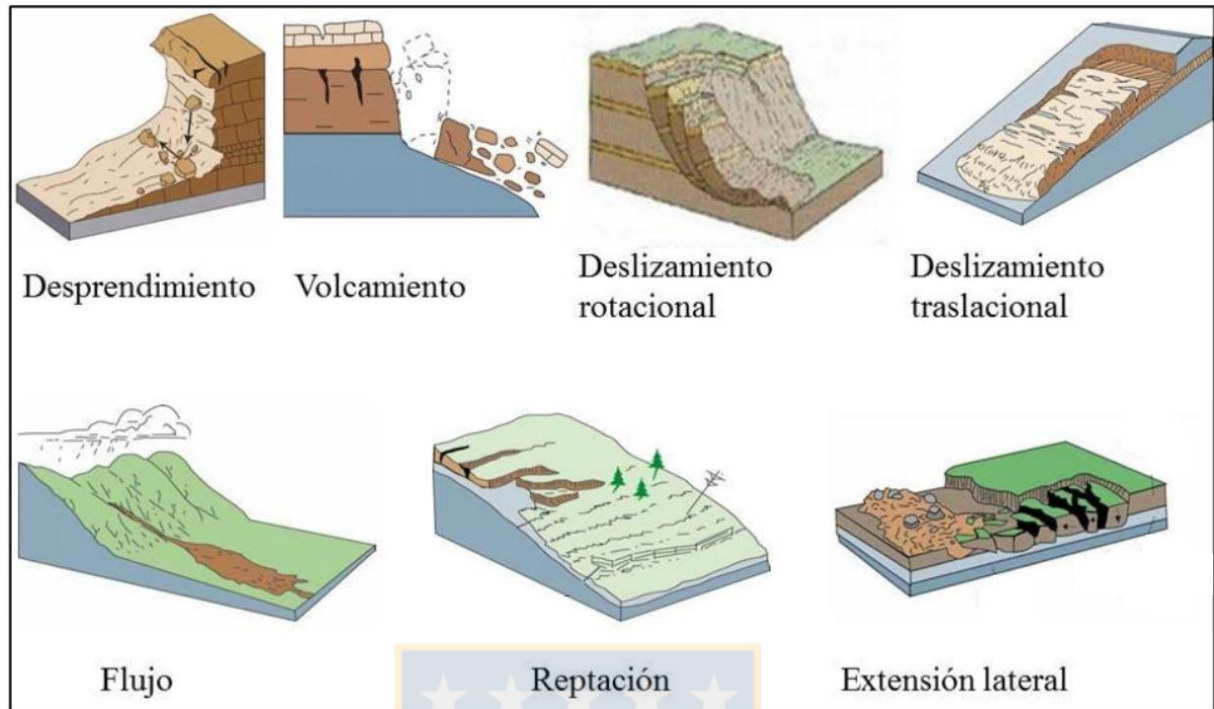


Figura 4.2: Tipos de remociones en masa. Modificado de Highland y Bobrowsky (2008).

- 1) **Caídas:** Son movimientos abruptos de materiales geológicos, tales como rocas y bloques, que se desprenden de laderas empinadas o acantilados.
- 2) **Volcamiento (*Toppling*):** Se distinguen por la rotación hacia delante de una unidad o varias unidades sobre algún punto o un eje bajo el centro de gravedad de la masa. Este tipo de movimiento ocurre por acción de la gravedad. La diferencia con una caída propiamente tal es que en la superficie de ruptura se genera cizalle.
- 3) **Deslizamientos:** Aunque en el término general deslizamiento se incluyen muchos tipos de movimientos de masa, el uso más restrictivo de los términos se refiere solo a los movimiento de material donde hay una zona de debilidad distinta que separa el material deslizante del material subyacente más estable. Los dos tipos principales de deslizamientos son deslizamientos rotacionales y deslizamientos traslacionales.
 - a) **Deslizamiento rotacional:** Es un deslizamiento en el cual la superficie de ruptura está curvada cóncavamente hacia arriba y el movimiento del deslizamiento es más o menos giratorio alrededor de un eje que es paralelo a la superficie del suelo y transversal a través del deslizamiento.

b) Deslizamiento traslacional: En este tipo de deslizamiento, la masa del deslizamiento de tierra se mueve a lo largo de una superficie más o menos plana con poca rotación o inclinación hacia atrás. Una subclasificación de este tipo de deslizamiento es el deslizamiento de bloque, el que consiste en una sola unidad o pocas unidades estrechamente relacionadas que se mueven cuesta abajo como una masa relativamente coherente.

- 4) **Extensiones laterales:** Las extensiones laterales son distintivas porque generalmente ocurren en pendientes muy suaves o en terrenos planos. El modo de movimiento dominante es la extensión lateral acompañada de cizalle o fracturas de tensión. La falla es causada por licuefacción, el proceso por el cual los sedimentos saturados, sueltos y sin cohesión (generalmente arenas y limos) se transforman de un estado sólido a un estado semi-líquido.

La falla generalmente se desencadena por el movimiento rápido del suelo, como el experimentado durante un terremoto, sin embargo, también puede ser inducido artificialmente. Cuando el material coherente, puede ser roca madre o suelo, descansa sobre materiales que se licúan, las unidades superiores pueden sufrir fractura y extensión, y luego pueden hundirse, trasladar, rotar, desintegrarse o licuarse y fluir. La falla comienza repentinamente en un área pequeña y se propaga rápidamente. A menudo, la falla inicial es una depresión, pero en algunos materiales el movimiento ocurre sin razón aparente.

- 5) **Flujos:** Estos movimientos se diferencian de los anteriores por la velocidad a la cual actúan, desde extremadamente rápidos a extremadamente lentos. Dentro de esta clasificación hay 5 categorías de flujos que difieren entre sí en detalles fundamentales.

a) **Flujo de detritos:** Es la forma de movimiento de masa rápido en el cual una combinación de suelo suelto, roca, material orgánico, aire y agua se mueve como un lodo que fluye cuesta abajo. El flujo de detritos incluye hasta un 50% de material fino. Son causados comúnmente por un intenso flujo de agua superficial, debido a fuertes precipitaciones o rápido deshielo, que erosiona y moviliza tierra suelta o rocas en pendientes pronunciadas. Las áreas que alimentan los flujos de detritos a menudo se

asocian con barrancos empinados, y los depósitos de flujo de detritos generalmente se indican por la presencia de abanicos de detritos en las bocas de los barrancos. Los incendios que desnudan las pendientes de vegetación intensifican la susceptibilidad de las pendientes al flujo de escombros.

b) **Avalancha de detritos:** Es una variedad de flujo de detritos cuya velocidad varía entre rápidos a muy rápidos.

c) **Flujo de tierra:** Los flujos de tierra tienen una forma característica de “reloj de arena”. El material de la pendiente se licua y se agota, formando un tazón o depresión en la cabeza. El flujo en sí mismo es alargado y generalmente ocurre en materiales de grano fino o rocas arcillosas en pendientes más bien moderadas y en condiciones hidrológicas saturadas. Sin embargo, también son posible los flujos secos de material granular.

d) **Flujo de lodo:** Un flujo de lodo es un flujo de tierra que consiste en un material que está lo suficientemente húmedo como para fluir rápidamente y que contiene al menos un 50 por ciento de partículas del tamaño de arena, limo y arcilla.

Para el objetivo de este estudio es de mucha utilidad la clasificación propuesta por Keefer (1984), el cual clasifica los tipos de remociones en masa producidas por sismos, mostrando tanto la velocidad de movimiento del material, como la profundidad alcanzada por el tipo de remoción, las cuales se dividen en las categorías presentadas en la tabla 4.1.

Tipo de remoción	Velocidad	Profundidad
Caídas de roca	Extremadamente rápido	Superficiales
Deslizamiento de roca	Rápido a extremadamente rápido	Superficiales
Avalanchas de roca	Extremadamente rápido	Profundos
Caídas de suelo	Extremadamente rápido	Superficiales
Avalanchas de suelo	Muy rápido a extremadamente rápido	Superficiales
Deslizamientos de roca en bloque	Lento a rápido	Profundos
Flujos lentos de tierra	Muy lento a moderado	Generalmente superficiales
Flujos rápidos de suelo	Muy rápido a extremadamente rápido	Superficiales

Tabla 4.1: Velocidad y profundidad de los diferentes tipos de remociones en masa. Modificado de Keefer (1984).

4.2.2. Factores condicionantes y desencadenantes

4.2.2.1. Factores condicionantes

Los factores condicionantes corresponden a características geológicas, geomorfológicas entre otras que propician condiciones de inestabilidad donde potencialmente se pueden generar deslizamientos (Hauser, 1993). Principalmente se consideran dentro de este grupo de factores la geomorfología, geología, geotecnia, hidrología e hidrogeología, vegetación y clima y por último, la actividad antrópica.

Cada proceso de remoción en masa tiene un origen y un comportamiento distinto, por lo que los factores condicionantes determinan la susceptibilidad de ocurrencia de un evento en particular en una zona determinada.

1. **Geología y Geotecnia:** Esta característica del terreno determina en mayor o menor grado la ocurrencia de eventos de remoción en masa, debido a que condiciona el material disponible para la generación de éstos. El depósito o material presenta ciertas características que son objeto de estudio como lo son la densidad, plasticidad, humedad, permeabilidad, además de la litología de la roca, estructuras, alteraciones y meteorización presente.

Las características geológicas del lugar condicionan en gran parte la capacidad de ser removidos o movilizados; por ejemplo los depósitos volcanoclásticos, glaciales, aluviales, coluviales y de flujo de detritos antiguos son materiales permeables, lo que genera que el agua se infiltre de manera fácil, produciendo una saturación rápida y favoreciendo la ocurrencia de deslizamientos.

2. **Geomorfología:** Los principales rasgos geomorfológicos que condicionan eventos de remoción en masa son la topografía, pendientes de las laderas, cambios bruscos en los ángulos de pendientes de laderas, así como también su extensión, altura y orientación. Estos factores influyen en la velocidad, energía y volumen de posibles remociones. Cualquier modificación que se realice puede transformar a una ladera estable en inestable y generar procesos de remoción en masa (Popescu, 2002).

El factor geomorfológico de primer orden corresponde a las características de las laderas, ya que cuando presentan pendientes fuertes, de gran altura y abruptas, propician las caídas, flujos y deslizamientos debido a que proporcionan una inestabilidad a los materiales presentes en ellas. Las pendientes de las laderas mientras mayor ángulo presenten (sobre 25° según Hauser (1993) y sobre 15° según Sauret (1987)), otorgan una mayor capacidad de transporte y aportan energía a los flujos. La orientación de la ladera es un factor preponderante debido a que condiciona la exposición al sol, lo que se traduce en cantidad de vegetación presente, grado de humedad del suelo y velocidad en procesos de meteorización.

- 3. Hidrología e Hidrogeología:** Corresponde a un factor fundamental debido a que considera la disponibilidad y presencia de agua, tanto en suelo como en rocas. La red de drenaje, las posiciones y variaciones del nivel freático, caudales y el coeficiente de infiltración son los factores que inciden en la generación de remociones en masa.

El principal efecto que provoca el agua es modificar la estabilidad de las laderas, debido a que disminuye la resistencia de la roca, aumenta la presión de poros y se incrementan los esfuerzos de corte por un aumento en el peso del terreno. Además actúa como un agente de transporte para sedimentos o rocas (Sepúlveda y Lara, 2008).

- 4. Clima y Vegetación:** Si bien el clima corresponde a un factor preponderante en la generación de remociones en masa, la vegetación califica como un factor más bien secundario, debido a que su presencia no determina una estabilidad ni un aumento significativo en la erosión del suelo. Los principales factores climáticos que influyen en la estabilidad de laderas son las precipitaciones, temperaturas, viento y radiación solar.

En Chile, el clima lluvioso presente en las regiones al Sur del Río Biobío, sumado a las bajas temperaturas en los lugares cordilleranos propicia una disponibilidad de agua o nieve, lo cual genera inestabilidad en las laderas.

- 5. Actividad Antrópica:** Este factor se considera importante sobre la estabilidad de laderas, ya que aumentan la susceptibilidad de la zona a eventos de remoción en masa. Actividades recurrentes en la industria como son excavaciones, rellenos, obras civiles, urbanización, cambios en el uso de suelo, extracción de áridos entre otros, contribuyen en

la desestabilización de laderas producto de la disminución artificial de la resistencia del material.

En la tabla 4.2 se señala cómo cada uno de estos factores se relaciona con los tipos de remociones en masa detalladas con anterioridad.

Tipo de remoción en masa \ Factores Condicionantes	Caídas	Deslizamientos	Toppling	Flujos	Extensiones Laterales
Geología y Geotecnia	X	X	X	X	X
Geomorfología	X	X	X	X	X
Hidrología e Hidrogeología	X	X	X	X	X
Vegetación y Clima		X		X	X
Actividad Antrópica	X	X	X	X	

Tabla 4.2: Relación existente entre factores condicionantes y el tipo de remoción. Lara y Sepúlveda, 2008.

4.2.2.2. Agentes desencadenantes

Los agentes desencadenantes corresponden a factores externos que producen remociones en masa debido a que generan un rápido incremento de esfuerzos o reducción de la resistencia del material de una ladera (Wieczorek, 1996). El agente desencadenante presenta un efecto sobre la ladera en un corto periodo de tiempo.

Las lluvias de gran intensidad y los sismos corresponden a los agentes desencadenantes más comunes de remociones en masa, además, teniendo en cuenta el contexto geotectónico del área y el clima de la zona, son los principales a estudiar.

- 1. Precipitaciones:** Son las principales gatillantes de remociones en masa, y éstas se relacionan a la intensidad, duración y distribución de las lluvias (González *et al.* 2002). Las precipitaciones actúan aumentando el grado de saturación de los materiales, tanto el suelo como en fracturas, es por esto que las precipitaciones de corta duración, pero intensas, facilitan las condiciones para que puedan ocurrir remociones más superficiales, mientras que lluvias de larga duración, independiente de la intensidad, estarían

íntimamente relacionadas con remociones en masa más profundas (Aleotti, 2004; Kim *et al.*, 2004).

Asimismo, las precipitaciones intensas aumentan la esorrentía superficial, lo que remueve el material en laderas con suelo suelto, lo que disminuye la estabilidad de ésta.

Es importante notar gracias a la información de la dirección general de aguas que durante los últimos años (Tabla 4.3 y Figura 4.3), los meses en que se concentran mayores precipitaciones corresponden a los meses de Mayo, Junio y Septiembre, lo que podría indicar los periodos a considerar en que existan posibilidades de ocurrencias de procesos de remoción en masa.

PRECIPITACIONES MENSUALES (mm)					
Mes	2014	2015	2016	2017	2018
Enero	77	0	1	12.9	40.4
Febrero	39.8	0.1	0	36.2	60.5
Marzo	125.1	0	21.9	42.1	141.5
Abril	86.5	64.1	206	84	58.7
Mayo	267.8	208.3	52.4	125.9	241.6
Junio	543.5	369.9	6.3	420.1	305.4
Julio	457	480.6	395.2	207	88
Agosto	165.6	473.3	248.3	492.4	140.1
Septiembre	343.7	149.7	69.1	187.8	449.9
Octubre	74.2	138.5	S/I	280.6	165.1
Noviembre	23.4	64.3	S/I	86.3	157.8
Diciembre	37.4	27.4	99.4	26.8	62.8

Tabla 4.3: Precipitaciones mensuales durante los últimos 5 años. Información extraída desde la página web de la Dirección General de Aguas que corresponden a la estación Ralco, ubicada en Alto Biobío, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. “S/I” indica que no hay información disponible para esos meses.

- Sismos:** Los eventos sísmicos son otros importantes factores desencadenantes de remociones en masa en distintos contextos geológicos y topográficos. En particular, en el área de estudio, se encuentra bajo la influencia directa de la ZFLO, lo cual se evidencia en una actividad sísmica presente periódicamente.

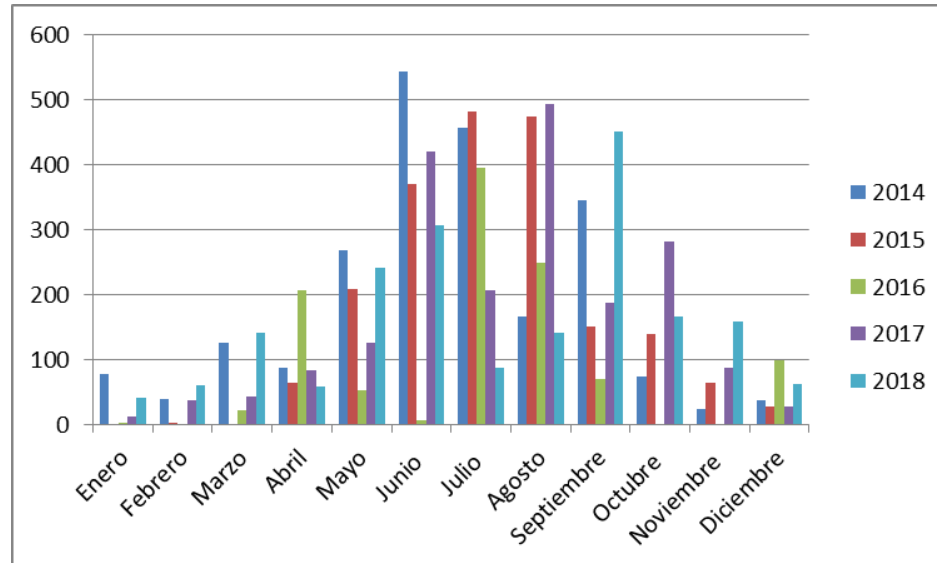


Figura 4.3: Precipitaciones mensuales durante los últimos 5 años. Corresponde a la información de la tabla 4.3. Los colores indican el año, mientras que en el eje X se especifica el mes, y en el eje Y los milímetros acumulados. Información extraída desde la página web de la Dirección General de Aguas que corresponden a la estación Ralco, ubicada en Alto Biobío, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.

Las aceleraciones sísmicas generan un cambio temporal en el régimen de esfuerzos al que está sometida la ladera, normales y de corte, pudiendo producir su inestabilidad.

Los sismos asociados a la ZFLO corresponden a sismos corticales, poco profundos, de magnitudes bajas a moderadas, sin embargo, son lo suficientemente fuertes para desencadenar una remoción en masa.

Lo anterior sumado a que la zona se encuentra en influencia directa del Volcán Callaqui (Figura 4.4), el cual presenta sismicidad moderada, puede, potencialmente, generar procesos de remoción en masa.

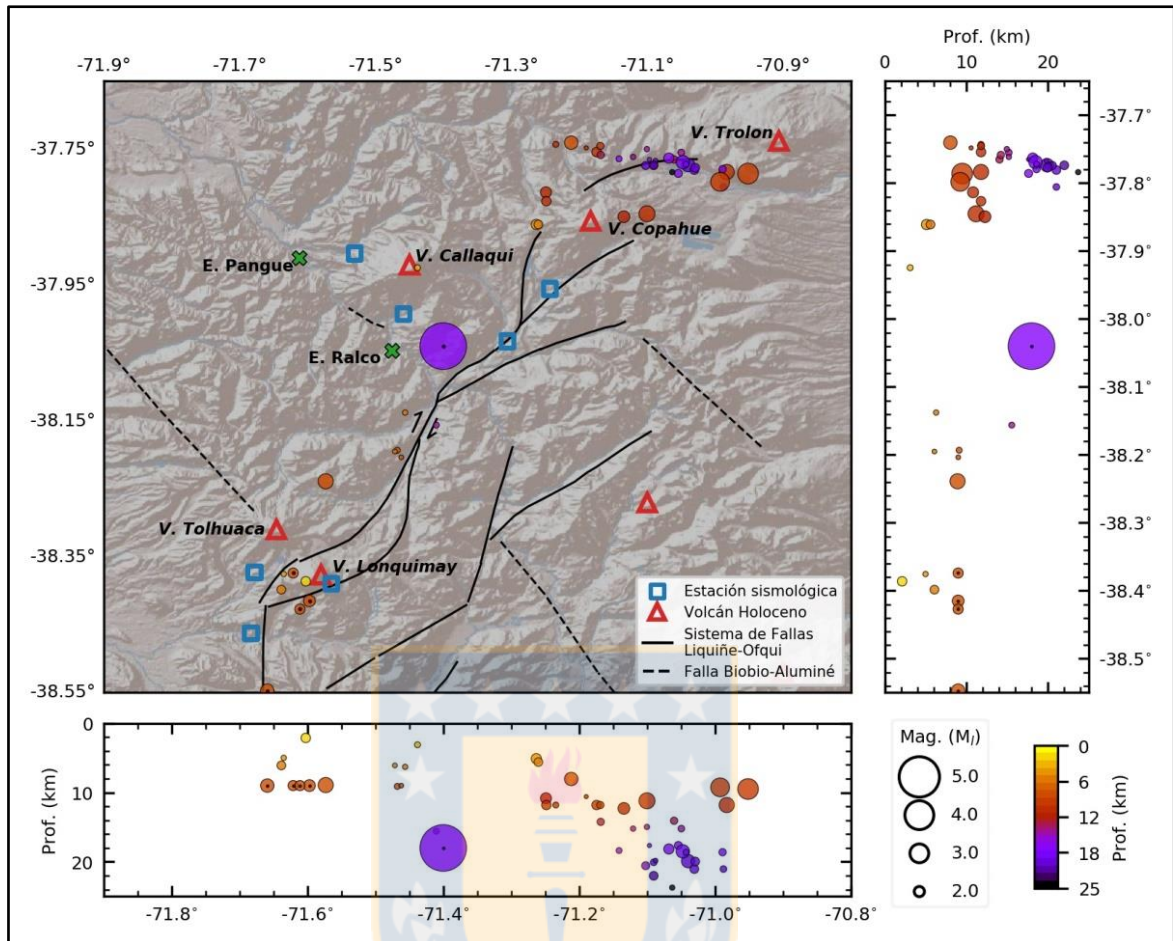


Figura 4.4: Catastro de sismos en el área de estudio. El gráfico contiene las magnitudes, epicentros y profundidades de los sismos relevantes que han ocurrido durante los últimos 15 años en la zona. Fabricado por D. González, Centro de Monitoreo Volcánico, GEMA, Universidad de Concepción.

5. METODOLOGÍA

En el presente capítulo se explicará la metodología utilizada en terreno y postterreno para clasificar macizos rocoso y taludes presentes en el área. Es necesario definir ciertos parámetros que definen a un talud. Un talud se refiere a una superficie, ya sea de origen natural o creada por el hombre, que presenta un ángulo con respecto a la superficie. Está compuesto por la cabecera y el pie, y contiene un ángulo de talud y una altura, como muestra la figura 5.1.

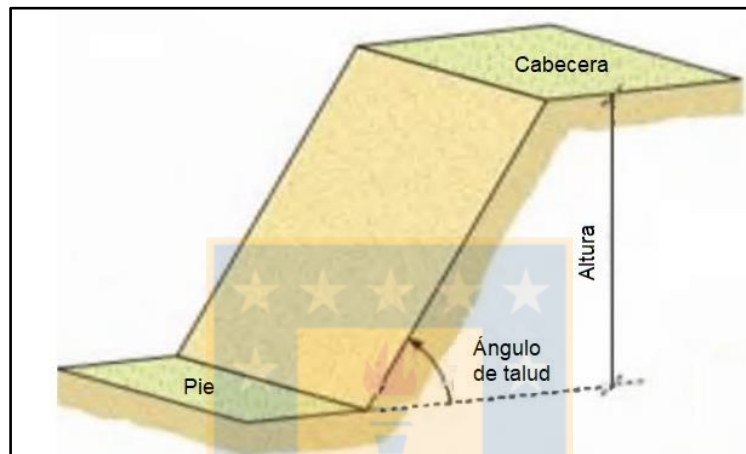


Figura 5.1: Partes de un talud. Modificado de González de Vallejos, 2002.

5.1 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA

Para obtener un valor de *Q-Slope* de Barton y Ban (2017), se requiere calcular de manera individual los parámetros que componen la valorización matemática de éste, los cuales corresponden al grado de fracturamiento (RQD), número de familias de discontinuidades (J_n), número de la rugosidad de las discontinuidades (J_r), número de alteración de las discontinuidades (J_a), número de la condición geológica y ambiental (J_{wice}) y el factor de reducción por condiciones de superficie, esfuerzos y orientación de discontinuidades (SRF_{Slope}). Debido a que el estudio se realiza en taludes y no en túneles como está especificado el valor Q de Barton (1974), se deben tener ciertas consideraciones para obtener el resultado esperado, por ejemplo, se debe medir aproximadamente el ángulo del talud y la altura de este mismo.

5.1.1 Índice de Calidad de la Roca (RQD)

Es un valor numérico que designa la calidad de la roca. Fue definido por Deere *et al.* (1967) y su escala varía entre 0 y 100 (Tabla 5.1).

Calidad del Macizo	RQD (%)	Puntaje
MUY MALA Calidad Geotécnica	< 25	3
MALA Calidad Geotécnica	25 a 50	8
REGULAR Calidad Geotécnica	50 a 75	13
BUENA Calidad Geotécnica	75 a 90	17
EXCELENTE Calidad Geotécnica	90 a 100	20

Tabla 5.1: Índice de Calidad de la Roca. Deere *et al.* (1967).

El puntaje obtenido luego permite hacer estimaciones de calidad geomecánicas. En el caso particular de este trabajo, no se realizaron sondeos por lo que el RQD se calcula mediante el uso de éste parámetro (RQD) en función del número de discontinuidades por unidad de volumen (J_v), mediante la relación propuesta por Palmstrom (1982): $RQD = 115 - 3.3(J_v)$.

5.1.2 Número de Familias de Discontinuidades (J_n)

Este parámetro corresponde al número de familias de discontinuidades continuas y aleatorias presentes en el macizo rocoso y está dado por la tabla 5.2.

Caso	Condición	J_n	
- AUMENTA LA BLOCOSIDAD DEL MACIZO →	A	Macizos rocosos masivos, sin o con muy pocas estructuras.	0.5 a 1
	B	Macizos rocosos con un único set de estructuras.	2
	C	Macizos rocosos con un set de estructuras <u>más</u> estructuras aleatorias.	3
	D	Macizos rocosos con dos sets de estructuras.	4
	E	Macizos rocosos con dos sets de estructuras <u>más</u> estructuras aleatorias.	6
	F	Macizos rocosos con tres sets de estructuras.	9
	G	Macizos rocosos con tres sets de estructuras <u>más</u> estructuras aleatorias.	12
	H	Macizos rocosos con cuatro o más sets de estructuras, con muchas estructuras aleatorias, con bloques cúbicos, etc.	15
	J	Macizo rocoso totalmente desintegrado, similar a un suelo granular.	20

Tabla 5.2: Número de familias de discontinuidades. Deere *et al.* (1967).

5.1.3 Número de la Rugosidad de las Discontinuidades (Jr)

Corresponde a la rugosidad de las estructuras más débiles, que puede interpretarse como la relación o el contacto entre las dos caras de la discontinuidad. Su clasificación y puntaje asignado se detalla en la tabla 5.3.

Caso	Condición	J_r	
DISMINUYE LA RUGOSIDAD DE LA ESTRUCTURA	(a) Hay contacto entre las cajas de la estructura.		
	(b) Desplazamientos de corte menores que 10 cm producen contacto entre las cajas de la estructura.		
	A	Estructuras discontinuas o que presentan puentes de roca.	4
	B	Estructuras ondulosas y rugosas (o irregulares).	3
	C	Estructuras ondulosas y lisas.	2
	D	Estructuras ondulosas y pulidas	1.5
	E	Estructuras planas y rugosas.	1.5
	F	Estructuras planas y lisas.	1.0
	G	Estructuras planas y pulidas	0.5
	(c) Los desplazamientos de corte no producen contacto entre las cajas de la estructura.		
H	Estructura con rellenos arcillosos de espesor suficiente como para impedir el contacto entre las cajas de la estructura.	1.0	
J	Estructura con rellenos de roca molida y/o materiales granulares de espesor suficiente como para impedir el contacto entre las cajas de la estructura.	1.0	

Tabla 5.3: Número de rugosidad de las discontinuidades. Deere *et al.* (1967).

5.1.4 Número de Alteración de las Discontinuidades (Ja)

Este parámetro evalúa el relleno y las alteraciones que se encuentran presentes en las discontinuidades del macizo rocoso, lo cual tiene una influencia directa a la calidad de éste. Depende de los minerales de relleno y la textura que presenta, como se detalla en la tabla 5.4.

Caso	Condición	ϕ_{jres}	J_a
(a) Hay contacto entre las cajas de la estructura.			
A	Estructuras bien trabadas y selladas con rellenos duros, impermeables, y que no se ablandan (e.g. cuarzo, epidota, etc.).	---	0.75
B	Estructuras con cajas no alteradas, que solo presentan pátinas locales.	25° a 35°	1
C	Estructuras con cajas ligeramente alteradas. Pátinas de materiales que no se ablandan y libres de finos: arenas, roca molida, etc.	25° a 30°	2
D	Estructuras con pátinas limo arenosas, con poco contenido de arcillas, que no se ablandan.	20° a 25°	3
E	Estructuras con pátinas de minerales arcillosos de baja fricción y que se ablandan (e.g. caolinita, micas, etc.). Estructuras con pátinas de clorita, talco, yeso, grafito, etc. Estructuras con pequeñas cantidades de arcillas expansivas (pátinas discontinuas, de 1 a 2 mm de potencia).	8° a 16°	4
(b) Desplazamientos de corte menores que 10 cm producen contacto entre las cajas de la estructura.			
F	Estructuras con rellenos de arenas y/o roca molida, libres de arcilla.	25° a 30°	4
G	Estructuras con rellenos de arcillas muy preconsolidadas, que no se ablandan (rellenos continuos, con espesores < 5 mm).	16° a 24°	6
H	Estructuras con rellenos de arcillas algo a poco preconsolidadas, que se ablandan (rellenos continuos, con espesores < 5 mm).	12° a 16°	8
J	Estructuras con rellenos de arcillas expansivas (e.g. montmorillonita, rellenos continuos, con espesores < 5 mm). El valor de J_a depende del contenido de arcilla, de la exposición al agua, etc.	6° a 12°	8 a 12
(c) Los desplazamientos de corte no producen contacto entre las cajas de la estructura.			
K, L, M	Estructuras con rellenos de desintegrada o triturada y arcillas (ver G, H, J para descripciones del material arcilloso).	6° a 24°	6, 8 o 8-12
N	Estructuras con rellenos potentes de arenas limosas o limo-arcillosas, con poco contenido de arcillas (que no se ablandan).	---	5
O, P, R	Estructuras con rellenos potentes de salbanda arcillosa (ver G, H, J para descripciones del material arcilloso).	6° a 24°	10, 13 o 13-20

Tabla 5.4: Número de alteración de las discontinuidades. Deere *et al.* (1967).

5.1.5 Número de la Condición Geológica y Ambiental (J_{wice})

Debido a que los taludes y pendientes analizados se encuentran expuestos a la intemperie por periodos largos de tiempos es necesario generar un nuevo parámetro que sea similar en su origen al J_w propuesto por Barton *et al.* (1974). Así es como se introduce este factor que, además de analizar si la roca es competente o no, toma en cuenta si la estructura es estable, todo lo anterior

en función del tipo de clima al que se encuentra expuesto. La clasificación designada se especifica en la tabla 5.5.

Tabla Número de la condición geológica y ambiental				
J_{wice}^a	Ambiente desértico	Ambiente húmedo	Ambiente tropical	Ambiente polar
Estructura estable; Roca competente	1.0	0.7	0.5	0.9
Estructura estable; Roca incompetente	0.7	0.6	0.3	0.5
Estructura inestable; Roca competente	0.8	0.5	0.1	0.3
Estructura inestable; Roca incompetente	0.5	0.3	0.05	0.2

^a Cuando están instaladas las medidas de drenaje, se debe aplicar $J_{wice} \times 1.5$; cuando el talud tiene medidas de seguridad instaladas, se debe aplicar $J_{wice} \times 1.3$; Si están instaladas ambas medidas, se debe aplicar $J_{wice} \times 1.5 \times 1.3$

Tabla 5.5: Número de la condición geológica y ambiental. Modificado de Barton y Bar (2017).

5.1.6 Factor de Reducción por Condiciones de superficie, esfuerzos y orientación de discontinuidades (SRF_{slope})

Este factor está diseñado de manera específica para los taludes, debido a que se toman en cuenta tres tipos de SRF_{slope} : SRF_a , SRF_b y SRF_c . El valor de SRF_{slope} corresponde al valor más adverso de los tres, es decir, el mayor.

SRF_a (Tabla 5.6) describe la condición física de la superficie del talud (al instante o a futuro) debido a la susceptibilidad a la intemperie y a la erosión. SRF_b (Tabla 5.7) por su parte describe los rangos adversos de resistencia al *stress* en el talud. Finalmente, SRF_c (Tabla 5.8) se califica gracias a las discontinuidades mayores como fallas, zonas de debilidad y enjambres de diaclasas que contengan relleno de arcillas que afecte la estabilidad del talud.

Tabla : SRF_a Condición física		
Descripción		SRF_a
A	Leve aflojamiento debido a la ubicación de la superficie, perturbaciones por tronaduras o excavaciones	2.5
B	Bloques sueltos, signos de grietas de tensión y cizalle, susceptibilidad a la intemperie, alteración severa producto de tronaduras	5
C	Como B, pero mayor susceptibilidad a la intemperie	10
D	El talud se encuentra en una etapa avanzada de erosión y aflojamiento debido a la erosión periódica por el agua y/o efectos de la cuña de hielo	15
E	Talud residual con significativo transporte de material cuesta abajo	20

Tabla 5.6: Condición física de los taludes. Modificado de Barton y Bar (2017).

Tabla : SRF _b Estrés y fuerza		
Descripción		SRF _b
F	Rango de estrés y fuerza moderado	2.5-1
G	Rango de estrés y fuerza alto	5-2.5
H	Fallamiento localizado de roca intacta	10-5
J	Rotura o comportamiento plástico	15-10
K	Flujo plástico de material suavizado por deformación	20-15

Tabla 5.7: Clasificación de estrés y fuerza del talud. Modificado de Barton y Bar (2017).

Tabla : SRF _c Mayor discontinuidad					
SRF _c		Favorable	Desfavorable	Muy desfavorable	Causa fractura si está sin soporte
L	Mayor discontinuidad con poca o sin arcilla	1	2	4	8
M	Mayor discontinuidad con RQD ₁₀₀ =0 ^a debido a arcilla y salvanda	2	4	8	16
N	Mayor discontinuidad con RQD ₃₀₀ =0 ^b debido a arcilla y salvanda	4	8	12	24

^a RQD₁₀₀= Muestra perpendicular de 1m de discontinuidad
^b RQD₃₀₀= Muestra perpendicular de 3m de discontinuidad

Tabla 5.8: Condición de la mayor discontinuidad. Modificado de Barton y Bar (2017).

5.1.7 VALORACIÓN DE Q

Para conocer la estabilidad de un talud o una ladera mediante el método *Q-slope* (Barton y Ban, 2017) se requiere conocer los parámetros descritos anteriormente y resolver la ecuación que muestra la figura 5.2. Con el valor Q conocido, se procede a ubicar ese valor y el ángulo del talud en un gráfico (Figura 5.3), donde se encuentran descritos los valores donde el talud se clasifica como estable o inestable.

$$Q_{\text{slope}} = \frac{RQD}{J_n} \times \left(\frac{J_r}{J_a} \right)_0 \times \frac{J_{\text{wice}}}{SRF_{\text{slope}}}$$

Figura 5.2: Fórmula matemática para la obtención de Q_{slope}. Barton y Bar (2017).

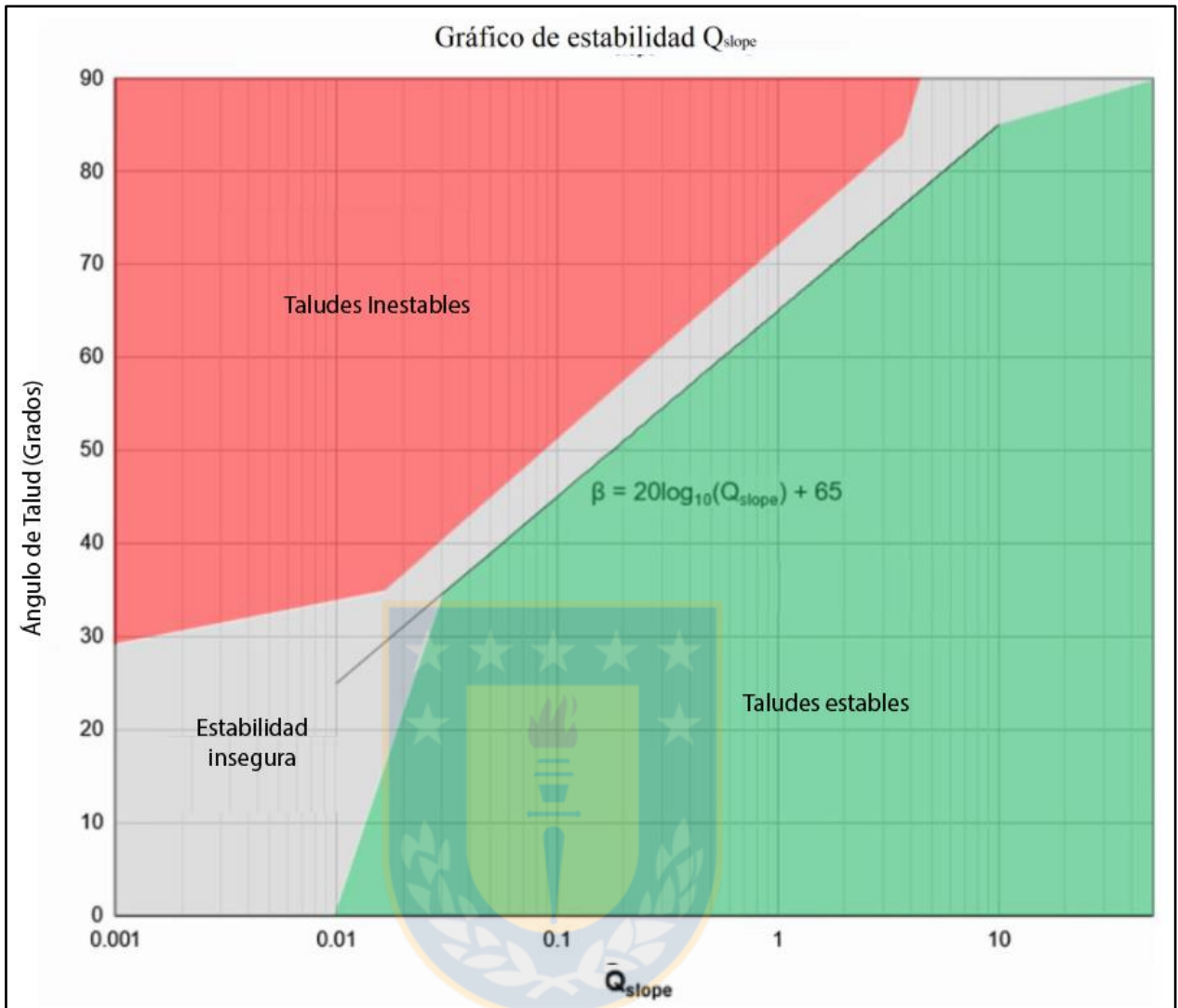


Figura 5.3: Gráfico que presenta valores de Q_{slope} y los ángulos de talud en que teóricamente se mantienen estables. Barton *et al.* (2017).

5.2 CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA

5.2.1 Geología Local

En el área de estudio afloran en mayor medida, dos formaciones, las que corresponden a la Formación Cura-Mallín y Formación Trapa-Trapa. Además y de manera intermitente se encuentran depósitos semiconsolidados del Cuaternario. La primera se expresa en rocas sedimentarias de grano fino, con una baja calidad geotécnica debido a que presenta estratificación, la cual corresponde a una debilidad geomecánica, teniendo como resultado la disgregación de la roca de manera recurrente, lo cual es favorecido también por la densa presencia de diaclasas, generalmente en tres direcciones. Por otra parte, la Formación Trapa-Trapa corresponde a rocas volcánicas, en mayor proporción andesitas, bien macizas, poco alteradas, lo que deriva en una buena calidad geotécnica. Estas rocas también presentan diaclasas, sin embargo, el número de familias y la densidad de éstas disminuyen con respecto a la Formación Cura-Mallín.

Los depósitos semiconsolidados que se encuentran en la zona corresponden a depósitos de remociones antiguas, depósitos fluviales y de forma puntual en algunos lugares, depósitos glaciales. Estos depósitos al presentar una matriz semi-consolidada, son propensos a removerse, sin embargo, el potencial destructivo de ellos es más bien bajo, debido a que representan la capa superior de suelo en algunos lugares. El mecanismo de remoción en masa que se podría asociar a estos depósitos corresponde al flujo de suelo, el cual en el peor de los casos afectaría los caminos aledaños al embalse, y no representan un peligro al propio cuerpo de agua.

5.2.2 Evaluación del parámetro Q_{slope} en el área

Para llevar a cabo la clasificación geomecánica en terreno fue necesario la confección de una ficha, de manera que el trabajo fuera eficiente y siempre considerando la menor pérdida de datos de un afloramiento. Debido a que la clasificación geomecánica sólo sirve para macizos rocosos, es decir, afloramientos de roca, es que se puede aplicar en una parte restringida del área de estudio. Sin embargo, aporta datos numéricos que deben ser evaluados en conjunto con la geología de la zona, obteniendo como resultado una caracterización más completa.

En terreno se completaron 20 fichas de afloramientos, divididas en los días que se hicieron (A y B) y cuya numeración corresponde al orden en el cual fueron completadas (Figura 1.2). Estas fichas contienen los parámetros para la obtención del valor Q_{slope} y un valor del ángulo del talud estimado en terreno (Tabla 5.9).

	Q SLOPE	RQD	JN	JR	JA	JWICE	SRFSLOPE		BETA	Ángulo Talud
A-01	0.009375	25	15	1.5	8	0.3	10		24.43943	70
A-02	10.5	60	12	3	1	0.7	1		85.42379	80
A-03	1.5	45	9	3	6	0.6	1		68.52183	75
A-04	9.333333	80	9	3	1	0.7	2		84.40074	80
A-05	0.04	35	15	2	5	0.3	7		37.0412	65
A-06	8.75	75	9	3	2	0.7	1		83.84016	70
A-07	0.625	45	9	1	4	0.5	1		60.9176	60
A-08	4	60	9	2	1	0.6	2		77.0412	75
A-09	4.166667	50	9	3	2	0.5	1		77.39578	70
A-10	2.5	45	9	3	3	0.5	1		72.9588	65
A-11	0.222222	40	9	1	2	0.3	3		51.93575	55
A-12	1.111111	40	9	1	2	0.5	1		65.91515	70
A-13	8.166667	70	9	3	2	0.7	1		83.2409	80
A-14	8.666667	65	9	2	1	0.6	1		83.75704	60
A-15	0.666667	40	9	1	2	0.3	1		61.47817	70
B-01	1.111111	40	9	1	2	0.5	1		65.91515	60
B-02	0.069444	20	9	1	4	0.5	4		41.83275	50
B-03	0.166667	20	9	1	4	0.3	1		49.43697	70
B-04	9.333333	80	9	3	2	0.7	1		84.40074	80
B-05	7.583333	65	9	3	2	0.7	1		82.5972	70

Tabla 5.9: Valores de Q_{slope} obtenidos para los datos de terreno. En rojo valores de ángulos de talud que difieren en más de diez grados con el valor teórico máximo, en amarillo valores que difieren en menos de diez grados y en verde valores de ángulos de taludes estables.

Con los datos procesados, una vez obtenido el valor Q_{slope} , se procede a confeccionar el gráfico y a ubicar los puntos (Figura 5.4). Es importante mencionar que aplicando la fórmula matemática que se aprecia en la figura 5.4, se obtiene el valor máximo del ángulo del talud estable.

Aquellos valores cuyo ángulo de talud medido en terreno sea considerablemente mayor, para efectos de este estudio se considera superior a 10° , con respecto al valor entregado por la fórmula para el ángulo Beta, se encuentran marcados en rojo, para aquellos valores mayores a Beta en menos de 10° se marcaron amarillo, mientras que los valores estables se encuentran marcados de color verde.

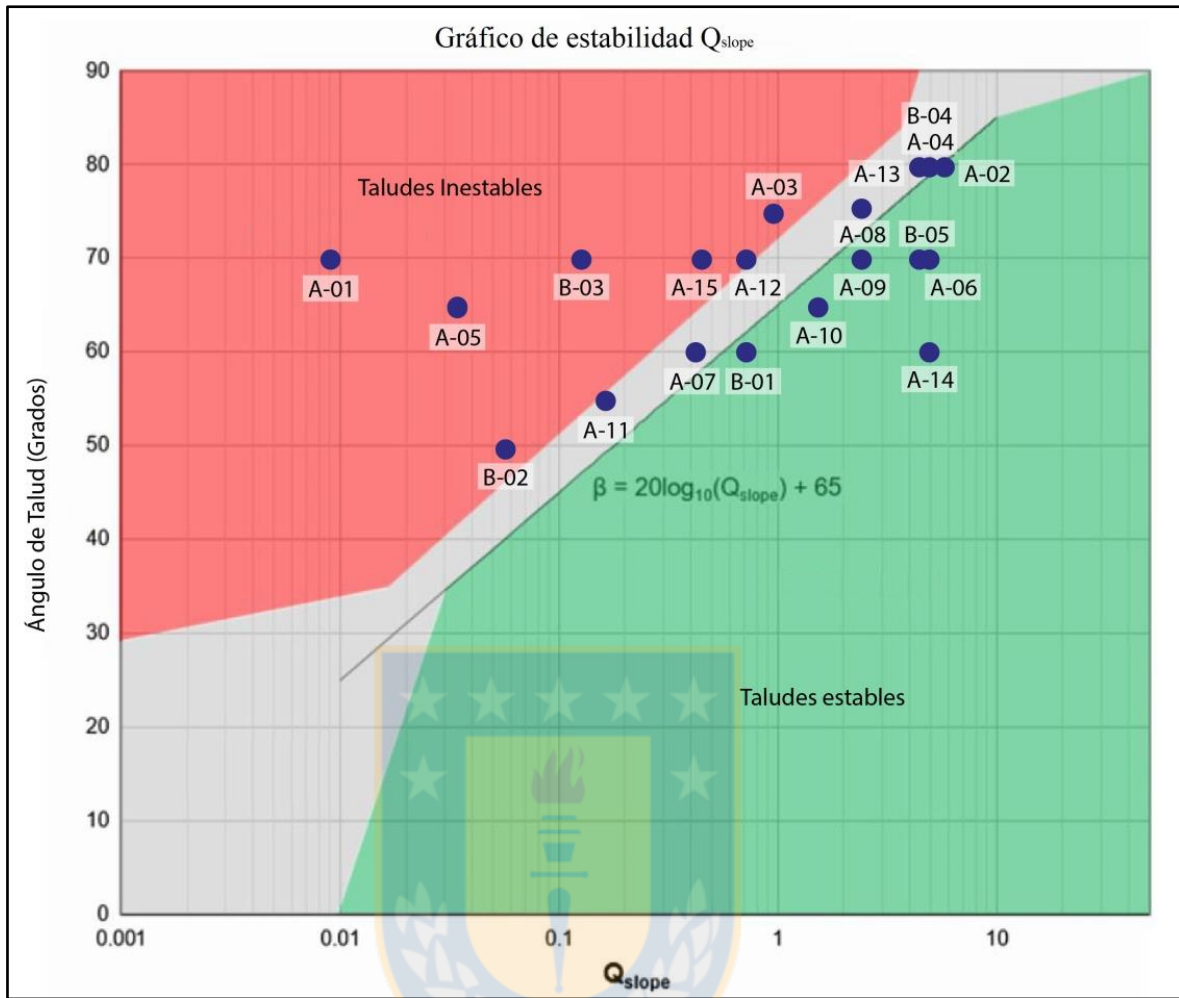


Figura 5.4: Clasificación de valores obtenidos en terreno en el gráfico de estabilidad. Modificado de Barton y Bar (2017).

5.3 ÁLGEBRA DE MAPAS

La metodología seleccionada para ponderar los mapas temáticos de cada factor corresponde al álgebra de mapas. De manera introductoria podemos mencionar de esta técnica corresponde al conjunto de procedimientos y métodos que permiten analizar y extraer distinta información de diferentes capas en formato *ráster* referentes al mismo espacio geográfico. Para el objetivo de este trabajo estas capas corresponden a los mapas independientes y este procedimiento obtendrá como resultado el mapa de susceptibilidad para remociones en masa de la zona (Figura 5.5).

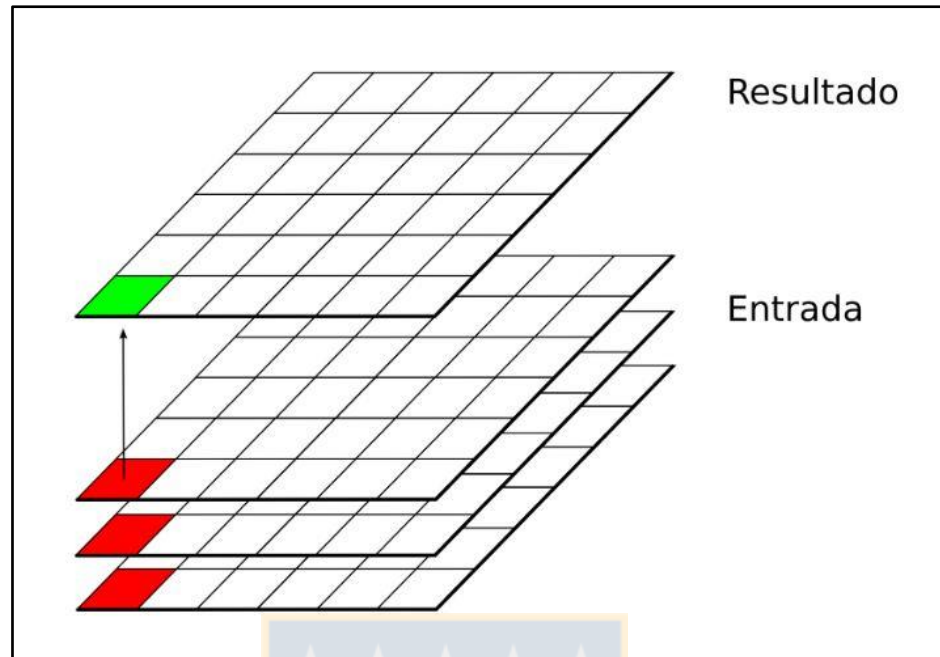


Figura 5.5: Obtención de resultados mediante álgebra de mapas. Las capas en rojo representan los datos de mapas individuales, es decir, mapa geológico, ángulo de talud, orientación de laderas, estructural y de redes de drenaje. Al geoprocesarlos se obtendrá un resultado donde se zonifica la susceptibilidad, representado en el cuadro verde.

Dentro de los tipos de funciones que permiten realizar mediante el álgebra de mapas, en este trabajo utilizaremos las funciones locales, debido a que en ella se asignan valores correspondientes a una celda en una serie de mapas para obtener una celda resultante.

Todo el procesamiento de datos realizado mediante este método se trabaja con el software *ArcGIS* 10.4, utilizando las herramientas de geoprocesamiento.

6. ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD

6.1. RECLASIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE FACTORES CONDICIONANTES Y DETONANTES

El comportamiento de los factores condicionantes en el área de estudio son variados, por lo mismo, se procede a analizar en forma independiente cada uno de ellos para poder estudiar el impacto directo que genera en la zona y su vinculación con la generación de remociones en masa.

Ya definidos todos los parámetros a evaluar, se procede a confeccionar mapas de susceptibilidad específicos para cada cualidad, donde se explicará el criterio por el cual se determinarían zonas más propensas a generar remociones en masa, y que finalmente proporcionarían la base para el mapa general de susceptibilidad. Se toman en cuenta tanto datos tomados en terreno como datos obtenidos en gabinete, delimitando las zonas con colores verde, amarillo y rojo, indicando con ello, menor a mayor susceptibilidad a generar remociones en masa.

6.1.1. Geología y Geotecnia

Para el caso de la geología local consideramos cuatro grandes grupos de litologías presentes en el área, las que corresponden a la Formación Cura-Mallín, Formación Trapa-Trapa, rocas intrusivas y depósitos de relleno cuaternario. Gracias al estudio geotécnico realizado en el área de estudio, podemos inferir el comportamiento mecánico de las rocas pertenecientes a los tres primeros grupos mencionados, donde la Formación Cura-Mallín corresponde al que presenta menor calidad geotécnica, por lo cual se le atribuye un mayor potencial de generación de remociones en masa (Figura 6.1). Los depósitos cuaternarios se caracterizan por una matriz semiconsolidada, y, como se mencionó en el capítulo de marco geológico, presentan un medio a alto potencial en generación de remociones en masa de suelo y suelo y roca. En cuanto a la Formación Trapa-Trapa, presentaba en general media a buena calidad geotécnica, por lo que se categoriza un potencial medio. Finalmente, las rocas intrusivas en el área se encuentran presentes de manera muy maciza, con muy baja meteorización, por lo cual se le atribuye un bajo potencial de generación de remociones en masa.

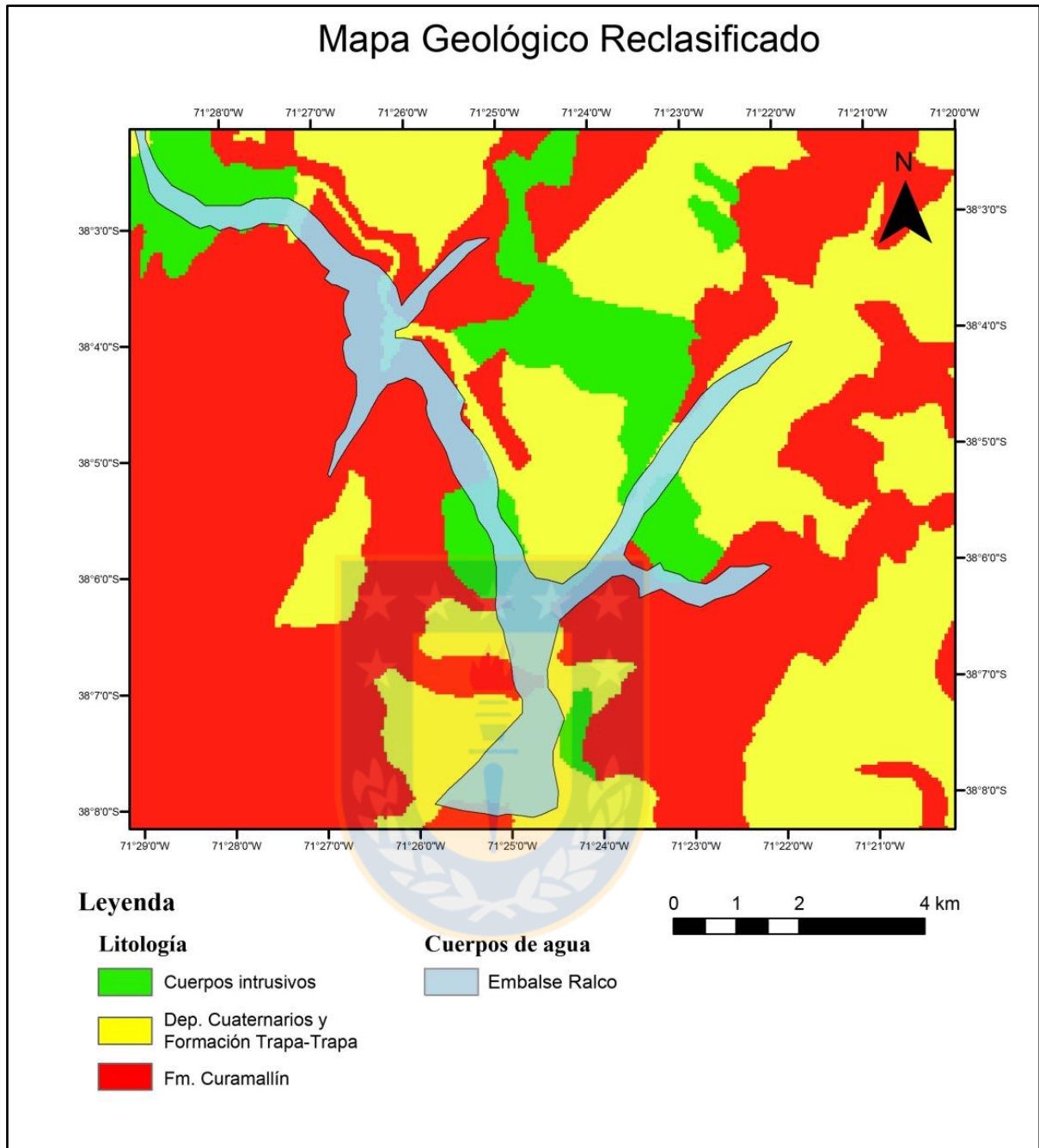


Figura 6.1: Mapa Geológico reclasificado. El color rojo indica las unidades geológicas que presentan un potencial de generación de remoción en masa alto. Amarillo para aquellas unidades geológicas que presentan un potencial medio, mientras que el color verde indica las unidades con menor potencial.

6.1.2. Geomorfología

En el área existen variadas características geomorfológicas, dentro de las más importantes tenemos la orientación de las laderas y el ángulo de las pendientes. En el caso de la orientación de

laderas, la ladera que presenta mayor exposición al sol corresponde a la ladera Norte (Figura 6.2), lo cual produce en mayor medida meteorización de los suelos. Sin embargo, el punto más importante es que en gran mayoría, las estructuras tienen un manteo hacia el Norte, ya sea Noreste o Noroeste. Debido a lo anterior es que se propone como la orientación más desfavorable entre los 315° y los 45° de orientación.

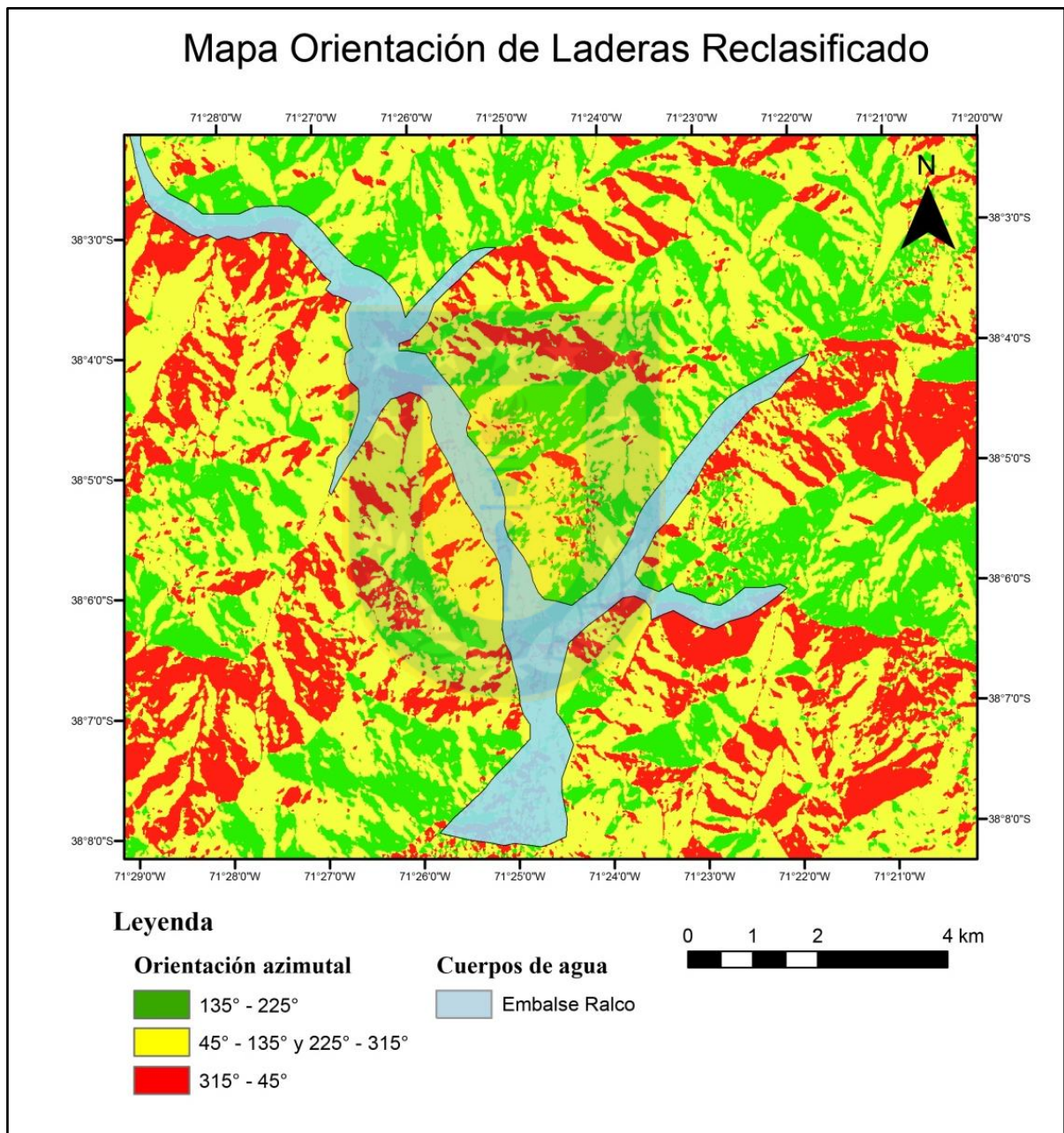


Figura 6.2: Mapa de Orientación de Laderas reclasificado. En color rojo las laderas que presentan una alta susceptibilidad a generar remociones en masa. En color amarillo las laderas con susceptibilidad media y en color verde aquellas con bajo potencial de generación de remociones en masa.

En el caso de las pendientes, definimos intervalos de ángulos para clasificar las laderas (Figura 6.3), donde los menores ángulos son considerados estables, mientras que al aumentar el ángulo se considera un aumento en la posible influencia para la generación de remociones en masa. En terreno se pudo corroborar que predominan laderas con ángulos altos, por lo que los intervalos de estabilidad en el caso específico de este trabajo son más bien amplios.

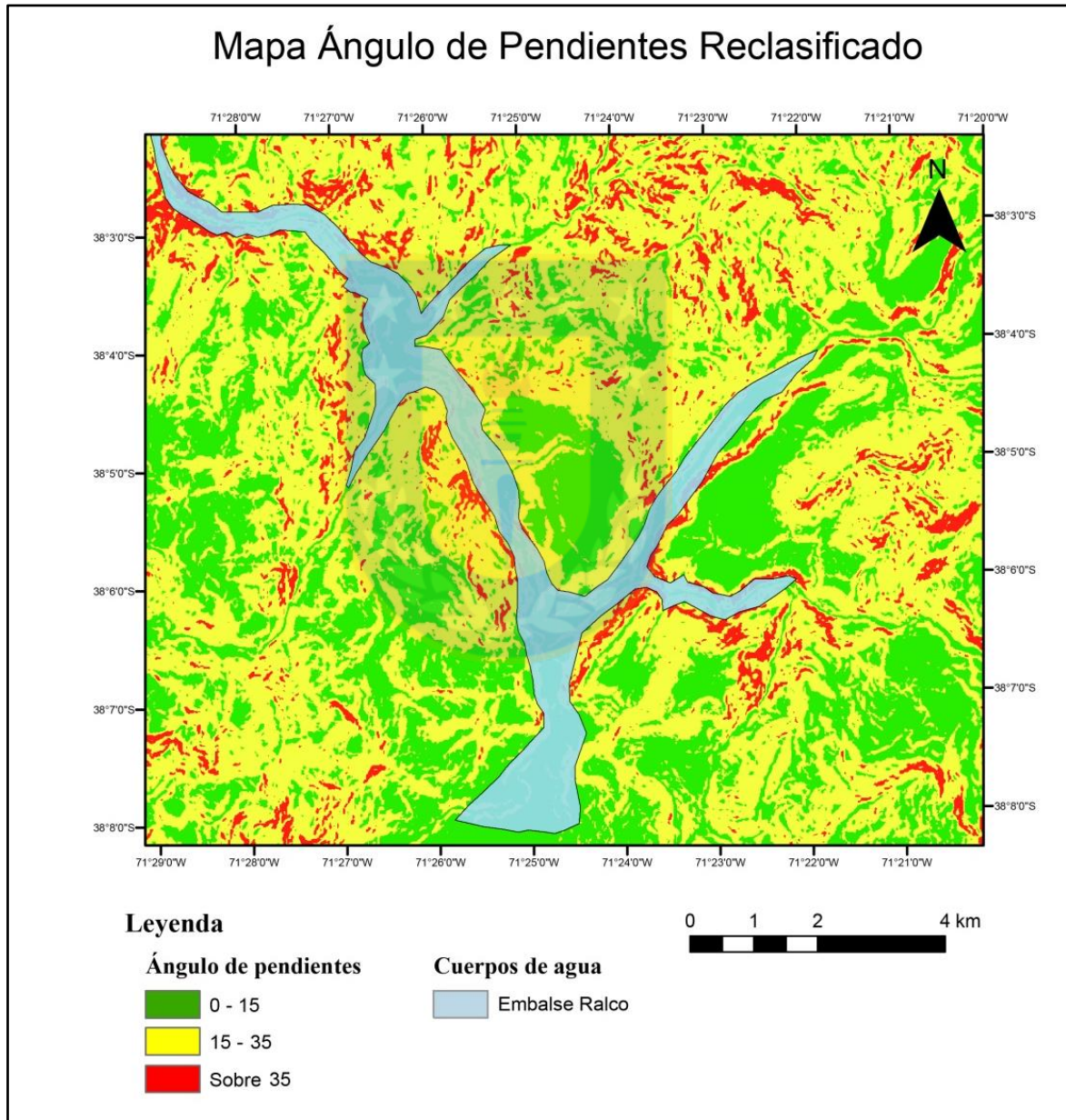


Figura 6.3: Mapa de Ángulo de Pendientes reclasificado. En color rojo aquellas laderas cuyas pendientes presentan un alto potencial de generación de remociones en masa. En color amarillo, las laderas que presentan un potencial medio, mientras que en color verde, las laderas que presentan una baja susceptibilidad para generar remociones en masa.

Entre 0° y 15° se define con baja susceptibilidad, de 15° a 35° susceptibilidad media y sobre 35° una susceptibilidad alta. Es necesario recordar que este factor no tiene la capacidad de definir por si solo una zona propensa a generar remociones, debido a que influye de igual manera la geología y las características de los macizos rocosos como se mencionó anteriormente.

Finalmente, se evaluó la elevación del área, asignando rangos en los cuales existe mayor predisposición a generar remociones en masa (Figura 6.4).

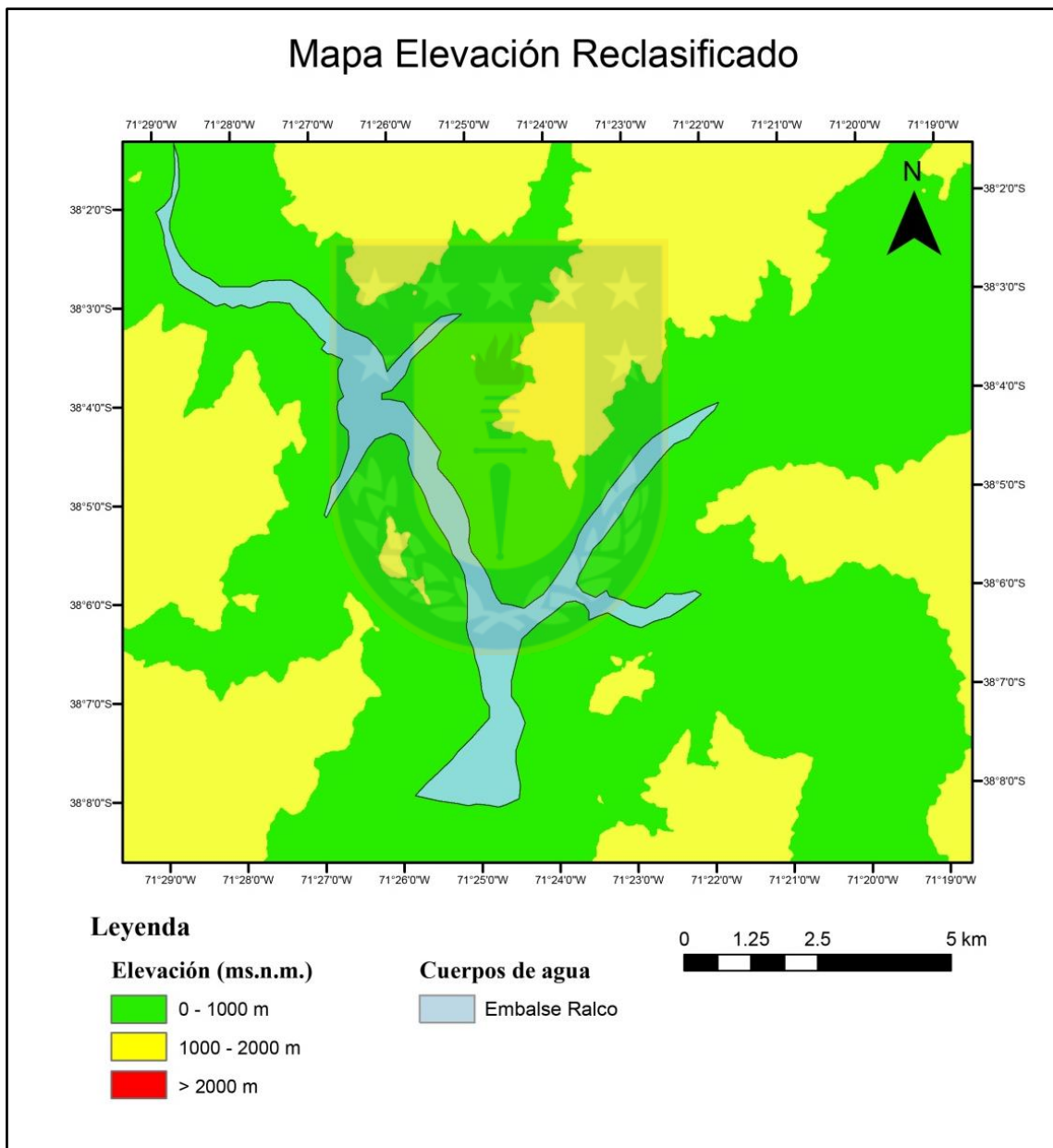


Figura 6.4: Mapa de Elevación reclasificado. El color verde indica una baja susceptibilidad a generar remociones en masa con los valores asignados, mientras que el color amarillo una susceptibilidad media.

El factor de la altura por sí solo no representa una variable relevante, más bien los cambios abruptos de elevación en una corta distancia propician inestabilidad en las laderas. El área de estudio al estar rodeando el embalse, no presenta altitudes sobre los 2000 m, lo cual no representa un mayor riesgo.

6.1.3. Estructuras y Redes de Drenaje

Las áreas cercanas a estructuras vistas en terreno y recogidas de bibliografía serán categorizadas como zonas más propensas a generar remociones en masa, lo cual deberá ser analizado de manera no numérica evaluando la condición de la roca con la estructura cercana (Figura 6.5).

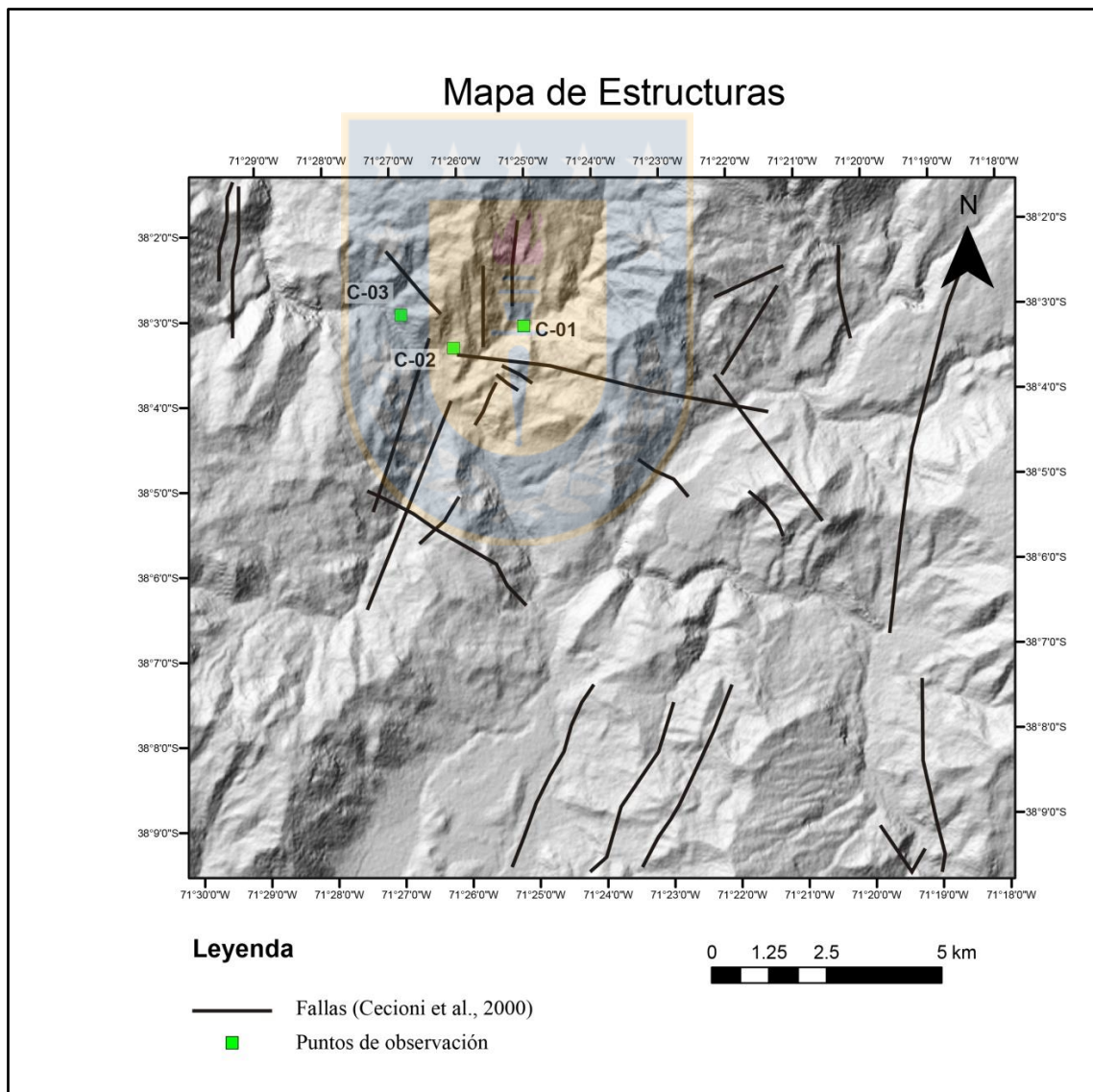


Figura 6.5: Mapa de estructuras del área de estudio. Fallas según Cecioni *et al.*, 2000. En recuadros verdes los lugares visitados en terreno, que se especifican en la sección 6.3.

Debido a lo anterior es que el peso de este factor debe ser bajo a moderado, ya que si bien una discontinuidad representa un potencial riesgo para la estabilidad de una ladera, depende también en gran medida de la capacidad de la roca para mantenerse estable.

Para el caso de las redes de drenaje, el análisis será similar al referente a estructuras, es decir, se considerará la cercanía de las redes a las zonas de mayor riesgo, sin embargo, para estos casos es más importante el análisis teórico, ya que se toma en cuenta las condiciones geológicas y estructurales en un área que presenta influencia de aguas subterráneas o superficiales.

6.2. ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD

Para determinar la zonificación final, se le asignan ponderaciones a los factores descritos anteriormente, lo que arroja como resultado un mapa donde las zonas de más baja susceptibilidad a generar remociones en masa se encuentran en color verde, las zonas amarillas son zonas calificadas como media y las zonas rojas corresponden a áreas con alta susceptibilidad a generar remociones en masa.

Este método tiene por nombre “Análisis Heurístico” y consiste en realizar un análisis detallado en terreno de las remociones en masa, el contexto geomorfológico y los factores condicionantes, determinando con ello, de manera parcialmente arbitraria, el peligro para cada sitio (Van Westen *et al.*, 1993). Cabe mencionar que el mapa final de susceptibilidad corresponde a una interpretación del autor, debido a que dependiendo del factor que se le asigne a cada mapa temático, el mapa final sufrirá variaciones. Debido a esto es la importancia de los mapas generados en los capítulos anteriores, así como también el análisis geomecánico de los macizos rocosos del área, ya que corresponden a datos objetivos que pueden servir como base para un futuro estudio.

En particular, para este mapa de susceptibilidad de remociones en masa en el área de estudio (Figura 6.6), se utilizó la calculadora *ráster* de ArcGIS 10.4, donde se le asignó una ponderación considerando la evaluación de los factores condicionantes en terreno, por lo cual el factor geológico presenta una mayor ponderación (30%), seguido por el ángulo de las laderas y cercanía a estructuras (18%), luego la orientación de las laderas (13%) y por último el factor de elevación del terreno y cercanía a redes de drenaje (10%).

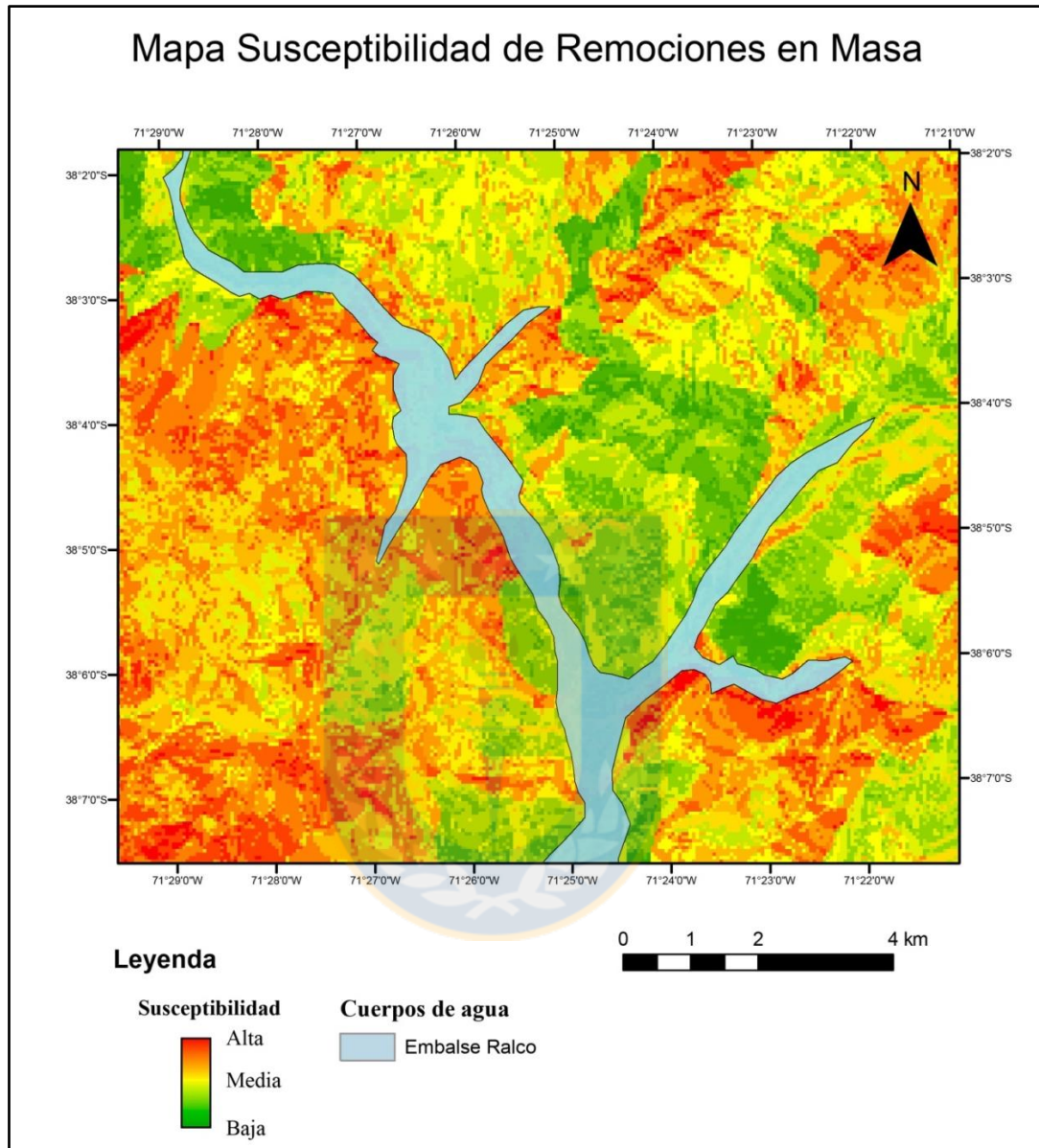


Figura 6.6: Mapa de susceptibilidad de remociones en masa en el área de estudio. La unidad mínima del mapa corresponde a un pixel, que contiene la información detallada en el color correspondiente.

Como se puede observar en el mapa final, la zona Oeste presenta alta susceptibilidad de remociones en masa, lo cual se condice con información obtenida por imágenes satelitales, y fotos a distancia de ese sector (Figura 6.7). La zona con menor susceptibilidad corresponde al Sur del embalse y se le atribuye a que aumenta la altura del borde del embalse y con ello disminuye la

diferencia de altura entre pendientes, reduciendo la probabilidad de generación de remociones en masa.

Es importante señalar que debido a la poca información extraída de terreno en la zona Oeste del área de estudio puede influir en que aquella zona presenta mayor susceptibilidad en el mapa. Sin embargo, lo anterior alienta a realizar trabajos posteriores que permitan clasificar de manera más detallada esa zona.

Con la obtención de este mapa se puede verificar la información obtenida mediante el método Q_{slope} visto en el capítulo anterior, y observar el nivel de precisión de las ponderaciones otorgadas a los diferentes factores.



Figura 6.7: Remoción en masa en la ladera Oeste del embalse.

Se observa en la figura 6.8 que en su gran mayoría, los puntos que indican los valores Q_{slope} , coinciden con la susceptibilidad evaluada por el álgebra de mapas, sin embargo, en los casos particulares donde no coinciden se puede atribuir a la escala de trabajo de ambos métodos. Por una parte, el álgebra de mapas trabaja con mapas de escalas 1:5000 o mayores, con lo que abarcan gran cantidad de información en su unidad mínima. Por otro lado, el método geotécnico utilizado clasifica laderas a escala de afloramiento, lo cual presenta gran detalle, sin embargo, al ser indicado en un mapa, presenta problemas para clasificar grandes áreas. Con lo expuesto recientemente, se puede interpretar que la información prevaleciente entre ambos métodos corresponde al Q_{slope} , ya que presenta mayor detalle, sin embargo, pueden colindar sectores con alta y baja susceptibilidad en un mapa con las escalas utilizadas en este trabajo.



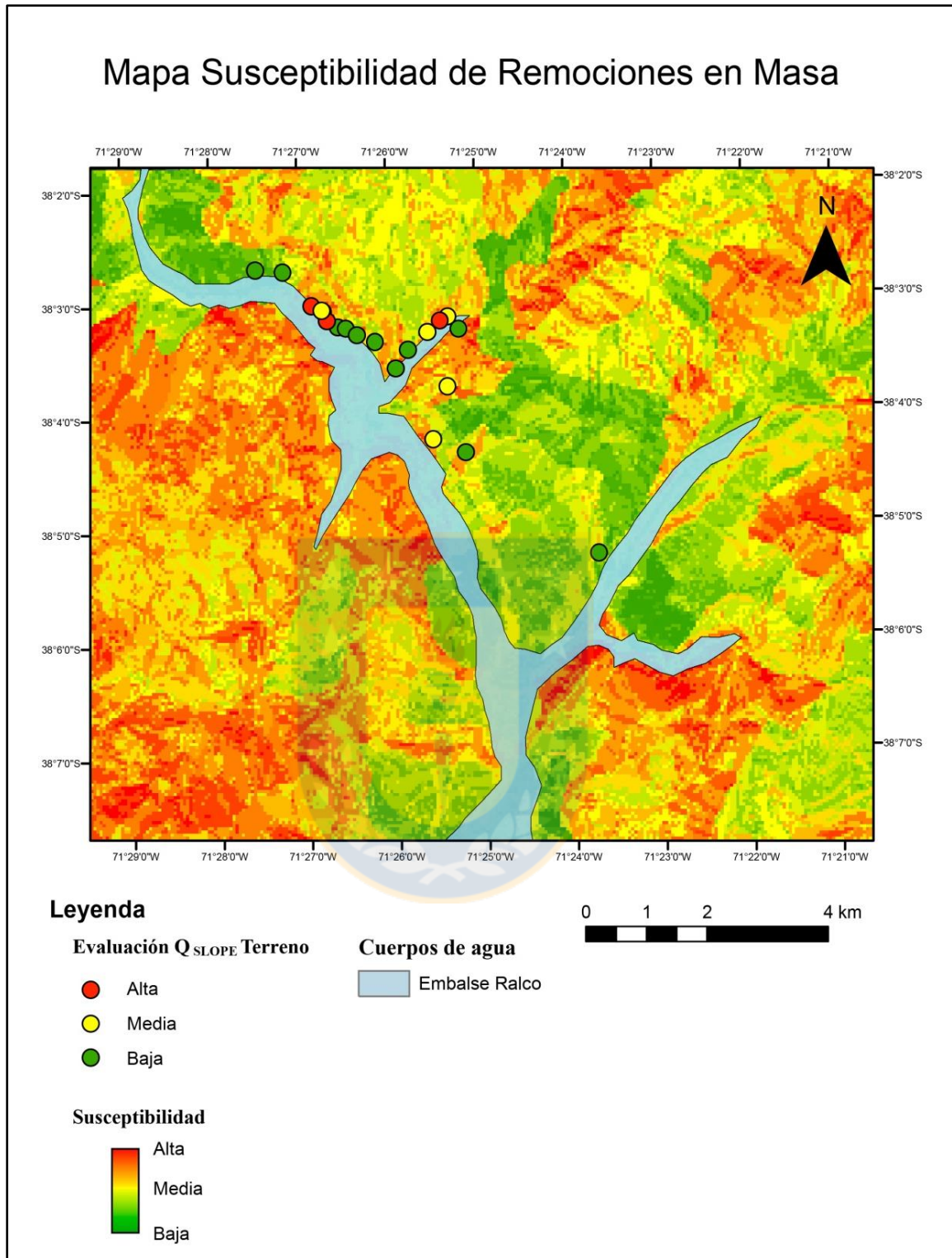


Figura 6.8: Mapa de susceptibilidad de remociones en masa del área de estudio. Los puntos indican los lugares donde se realizó la evaluación de Q_{slope} en terreno, y el color indica su susceptibilidad.

6.3. EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN ESTRUCTURAL Y SUS ALCANCES

En el área de estudio se encontraron varios sitios que presentaban evidencias de estructuras geológicas, las que además de indicar zonas débiles que propician remociones en masa, pueden indicar el contexto geotectónico de la zona. En particular, se visitaron 3 lugares donde fue posible identificar estrías, y en algunos casos, escalones.

6.3.1. Sitio C-01

En el primer sitio visitado corresponde a un afloramiento de andesitas de la Formación Trapa-Trapa que presentaba una zona de falla (Tabla 6.1), donde se pudo apreciar el plano de una falla de tipo normal. El plano de falla presenta escalones los cuales indican el sentido del movimiento, además presentan estrías con un *rake* de 70°W (Figura 6.9).

Sitio	<i>Dip Direction</i>	<i>Dip</i>	<i>Rake</i>
1-1	359	55	70°W
1-2	315	85	80°W
1-3	359	89	40°W

Tabla 6.1: Tabla de mediciones de diferentes planos de falla en el sitio 1.

A unos metros de la primera falla, se encontró una segunda, con estrías que presentan un *rake* de 80°W, sin embargo, esta corresponde a una falla de tipo inversa. La tercera falla encontrada presentaba estrías con un *rake* de 40°W.

6.3.2. Sitio C-02

Posteriormente en el sitio C-02 encontramos nuevamente un plano de falla que presentaba estrías y fibras de crecimiento que indicaban un sentido de movimiento dextral (Figura 6.10). El *rake* calculado fue cercano al 0° lo cual es consistente con el movimiento dextral de la falla.

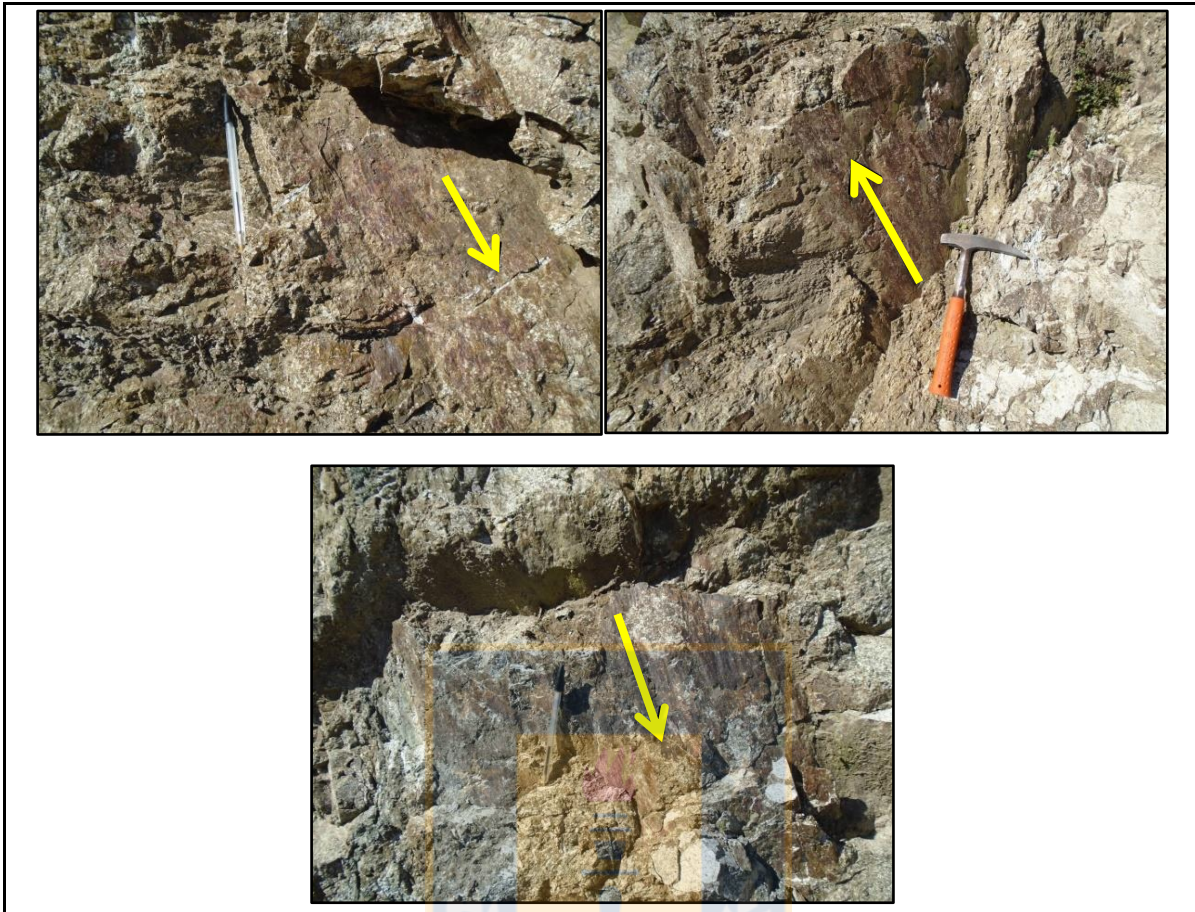


Figura 6.9: Estrías medidas en terreno. La flecha amarilla indica el sentido de movimiento evidenciado por escalones. Las estrías son paralelas a la flecha.



Figura 6.10: Planos de falla. Los planos presentaban estrías y fibras de crecimiento. La flecha amarilla indica el sentido de movimiento de la falla.

6.3.3. Sitio C-03

En el último sitio visitado se encontraron planos de fallas conjugadas (Figura 6.11), donde una de ellas presentaba estrías con un *rake* cercano a los 90° , lo cual nos permitió identificar la falla como normal. Además, se identificaron una serie de vetillas paralelas al plano de falla de color blanquecino y textura arcillosa.



Figura 6.11: Planos de fallas conjugadas. Los planos presentan salbanda y vetillas arcillosas. Las flechas amarillas indican el sentido de movimiento obtenido gracias a escalones.

6.3.4. Interpretación de los datos obtenidos

Mediante el uso de un software, se procede a analizar los planos de falla medidos en terreno, obteniendo las direcciones preferenciales de esfuerzos en el diagrama de rosetas (Figura 6.12). Estas direcciones preferenciales corresponden a $N10^\circ E$ y $N80^\circ W$. Estos valores pueden corresponder a un sistema de fallas conjugadas asociadas a la ZFLO, que se caracteriza por tener orientaciones NNE-SSW, lo cual indicaría una edad más reciente, y posibilidad de actividad holocena. Lo anterior es muy relevante, debido a que sí se encontraron planos de fallas en terreno, lo cual sin duda corresponde a una zona de debilidad que favorece la susceptibilidad a generar remociones en masa. Sin embargo, debido a la baja cantidad de datos obtenidos en terreno, es que esta interpretación corresponde sólo a una aproximación preliminar y debe ser complementado a futuro con un estudio estructural más detallado.

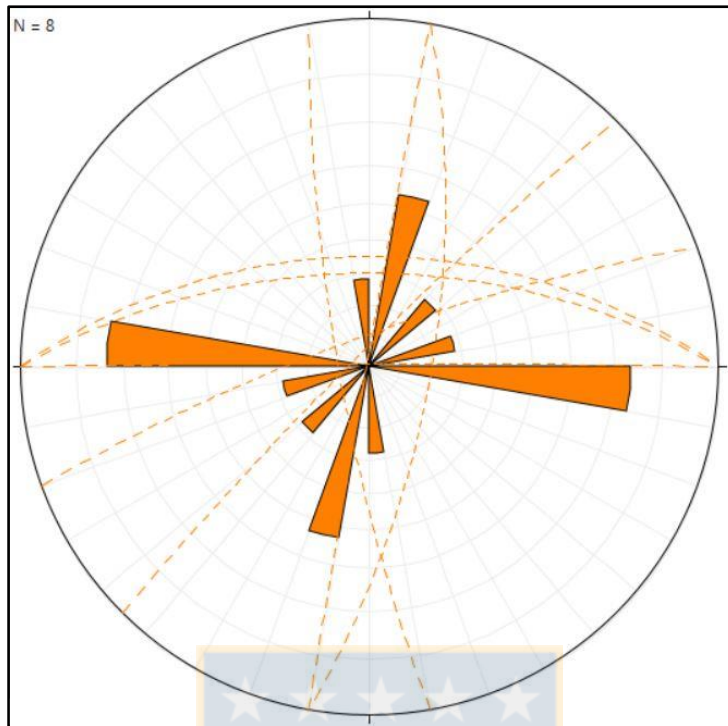


Figura 6.12: Diagrama de rosetas con las fallas medidas en terreno. Se evidencian dos direcciones preferenciales.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

Luego de llevar a cabo el trabajo de gabinete y terreno, integrar la información e interpretarla, permite concluir que:

- Gracias al mapa obtenido, se puede concluir que el embalse se encuentra inmerso en una zona potencialmente activa para la generación de remociones en masa. Lo anterior se debe a que las laderas aledañas corresponden a cerros escarpados, con altas pendientes y en algunas zonas predominan rocas de baja calidad geotécnica, como por ejemplo, la ladera Oeste del embalse.
- Las zonas de alta susceptibilidad, indicadas en el mapa de la figura 6.6, coinciden con los lugares determinados por el método Q_{slope} , por lo tanto, las ponderaciones utilizadas para generar el mapa se validan con las observaciones en terreno.
- Hay presencia de estructuras geológicas en la zona aledaña al embalse Ralco, sin embargo, en su mayoría, corresponden a fallas inactivas que no revisten mayor peligro para el área.
- Los factores detonantes más preponderantes en el área de estudio corresponden a las precipitaciones y los sismos. Las precipitaciones no presentan un potencial destructivo alto, sin embargo, favorecen en mayor medida los deslizamientos de suelo y suelo y roca. La sismicidad presente en el área puede atribuirse a actividad de la ZFLO, sin embargo, la cercanía al volcán Callaqui, y los constantes pulsos sísmicos permiten asociar, en su mayoría, a actividad propia del macizo.
- Al igual que en el año 2006, es probable que ocurra un sismo de mediana a gran intensidad en la zona, debido a la cercanía a la ZFLO, lo cual representa un peligro inminente para la generación de remociones en masa en la zona.
- La clasificación geomecánica de las rocas del área de estudio constituye un dato representativo importante, sin embargo, su aplicación en la zona es acotada, debido a la predominancia de capas de suelo en los alrededores del embalse.

- Los deslizamientos de suelo y suelo y roca tienen un potencial destructivo menor que las remociones en masa que involucran roca, sin embargo, constituye una amenaza para la empresa desde el punto de vista de la conectividad, ya que en su mayoría generarían cortes de camino, que en algunas ocasiones pueden afectar el desplazamiento de los trabajadores y las personas de las comunidades en la zona, significando una pérdida económica.
- En particular, las zonas más susceptibles a la generación de remociones en masa corresponden a Camino a Chenqueco km 10.6, el final del brazo del río Quepuca (ubicación punto B-03) y en el Camino a Chenqueco km 2.5 (ubicación punto A-01).

7.2. RECOMENDACIONES

Gracias a las conclusiones obtenidas en el presente trabajo, se procede a realizar recomendaciones a la empresa, con el objetivo de reducir los posibles efectos que puedan generar remociones en masa en la zona.

- Se recomienda mantener un monitoreo periódico en la zona, no tan solo de los bordes del embalse, si no que de los taludes del camino. Lo anterior se puede realizar mediante visitas en terreno con apoyo de imágenes tomadas por dron, para posteriormente ser analizadas por un profesional a cargo, con la intención de integrar la información obtenida en ambas paredes del embalse con la obtenida en los cortes de camino.
- Las imágenes obtenidas con dron presentan una resolución mayor, lo cual permite analizar diferentes características de la zona, como por ejemplo estimar los volúmenes máximos que puedan tener las posibles remociones en masa en las zonas críticas, además de poder obtener curvas de nivel cada 1 metro, lo cual mejora de manera sustancial la precisión de los factores analizados en este trabajo como la exposición y el ángulo de las laderas.
- Previo a los meses más lluviosos, como por ejemplo, Agosto y Septiembre, se recomienda realizar una breve visita a zonas potenciales a removerse producto de lluvias de gran intensidad, ya delimitadas en este trabajo, donde al instalar medidas de mitigación puede reducir las probabilidades de ocurrencia.

- Realizar un mantenimiento a las medidas de seguridad presentes en el camino al borde del embalse. En los tramos de mayor peligro será necesario instalar nuevas mallas u otro método de contención.
- Se recomienda mantener un monitoreo constante de la sismicidad, ya sea a través de monitoreo de pulsos volcánicos, o bien, mediante estaciones sísmicas.
- Actualizar el mapa de susceptibilidad de manera periódica, además de complementarlo con un estudio de vulnerabilidad para obtener el peligro que puede afectar a personas e instalaciones.
- Para el caso de las laderas que presentan mayor susceptibilidad a generar remociones en masa, se recomienda realizar seguimientos en tiempo real mediante el uso de GPS, los cuales permiten una mejor detección de deslizamientos lentos de ellas.



REFERENCIAS

- BAR N. & BARTON N. 2017.** The Q-Slope method for rock slope engineering. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 50 pp (12): 3307-3322.
- BÖRGEL J. 1983.** Geomorfología y Geografía de Chile, Tomo II. Instituto Geográfico Militar: 373 pp. Santiago.
- CARDONA, O.D. 1991.** Evaluación de la Amenaza, la Vulnerabilidad y el Riesgo. Taller Regional de Capacitación para la Administración de Desastres. ONAD/PNUD/OPS/OEA. Bogotá.
- CECIONI, A.; ALFARO, G.; PINCHEIRA, M.; PINEDA, V.; ARCE, M.; CARES, R; REYES, M.; VALENZUELA, G. Y MELNICK, D. 2000.** Elaboración de Mapas Zonificados de Peligrosidad Volcánica. Universidad de Concepción – Departamento Ciencias de la Tierra – INGENDESA S.A., Informe Inédito. Tres Volúmenes. 250 p., 4 mapas 1:50.000 y 1 mapa 1:100.000.
- CEMBRANO, J.; HERVÉ, F. Y LAVENU, A. 1996.** The Liquiñe Ofqui fault zone: a long-lived intra-arc fault system in southern Chile. *Tectonophysics*, 259, pp. 55-66.
- CRUDEN, D.M. 1991.** A Simple Definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. Vol. 43: 27 pp.
- CRUDEN, D. & VARNES, D. 1996.** Landslide Types and Processes. In Turner, A.K. & Schuster, R.L., 1996: *Landslides: Investigation and Mitigation*. Special Report 247. Transportation Research Board, National Research Council. National Academy Press, Washington, D.C: 675 pp. Washington.
- DEERE, D.U., HENDRON, A.J., Jr., PATTON, F.D., & CORDING, E.J. 1967.** Design of Surface and Near-Surface Construction in Rock, in *Failure and Breakage of Rock*, C. Fairhurst, Ed., Society of Mining Engineers of AIME, New York, pp. 237-302.
- EMPARÁN, C., SUÁREZ, M. Y MUÑOZ J. 1992.** Hoja Curacautín, regiones de Araucanía y Bío-Bío. Carta Geológica de Chile 1:250000, N° 71. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago, Chile. pp. 1.
- FOLGUERA, A., MELNICK, D., RADIC, J.P., IAFFA, D., RAMOS V.A. 2002.** 37° to 39°S intraarc basin in the Southern Central Andes -Cenozoic activity of western Neuquén basin-. *Actas 7° Congreso Internacional de Ciencias de la Tierra. Simposio Internacional “Interacciones entre los volcanes y sus basamentos y los riesgos geológicos relacionados”*. Electronic Files. Santiago de Chile. pp. 1-18.

GONZÁLEZ DE VALLEJO, V.; FERRER, M.; ORTUÑO, L. & OTEO, C. 2002. Ingeniería Geológica. Pearson Educación: 744 pp. Madrid.

GONZÁLEZ-FERRÁN, O.; VERGARA, M. 1962. Recocimiento geológico de la Cordillera de los Andes entre los paralelos 35°S y 38°S latitud sur. Universidad de Chile, Instituto Geológico, No. 24, 119 p.

HAUSER A. 1993. Remociones en masa en Chile. Nacional de Geología y Minería. Boletín N° 45, 7-29. Santiago.

HERVÉ, F., ARAYA, E. FUENZALIDA, J.L., SOLANO, A. 1979. Edades radiométricas y tectónica neógena en el sector costero de Chiloé continental, X Región. Actas de II Congreso Geológico Chileno, 1, pp. F1-F18.

HIGHLAND, L. M., & BOBROWSKY, P. 2008. The landslide handbook: A guide to understanding landslides. U.S. Geological Survey Circular 1.325: 129 pp. Virginia.

KARZULOVIC, J.; HAUSER, A. & VELASCO, L., 1979. Informe Geológico para evaluación geotécnica de los Proyectos Hidroeléctricos Ralco y Pangué en el Alto Biobío. ENDESA.

KEEFER, D.K., (1984). Landslides caused by earthquakes. Bulletin of the Geological Society of America, 95(4): 406-421.

LANGE, D.; CEMBRANO, J.; RIETBROCK, A.; HABERLAND, C.; DAHM, V.; BATAILLE, K. 2008. First seismic record for intra-arc strike-slip tectonics along the Liquiñe-Ofqui fault zone at the obliquely convergent plate margin of the southern Andes. Tectonophysics 455: 14-24.

LARA, L., CEMBRANO, J., LAVENU, A. 2006. La Zona de Falla Liquiñe-Ofqui: Antecedentes de su evolución cuaternaria e implicancias para el volcanismo activo en los Andes del Sur. XI Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, Chile. Actas, Vol. 2, Geodinámica Andina.

LARA, M. & SEPÚLVEDA, S. 2008. Remociones en Masa. Apuntes del curso, Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 63 pp. Santiago.

LLIBOUTRY, L. 1965. Traité de Glaciologie, Tome 2: Glaciers, Variations du Climat, Sols Gelés.. Masson, Paris. 246 pp.

MELNICK, D., FOLGUERA, A., RAMOS, V.A. 2006. Structural control on arc volcanism: The Cavihue-Copahue complex, Central to Patagonian Andes transition (38°S). Journal of South American Earth Science. N° 22, p. 66-88.

- MELNICK, D. MORENO, M.S., LANGE, D., STRECKER, M.R., Y ECHTLER, H.P. 2008.** Tectonic control on the 1960 Chile earthquake rupture segment. 7th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG, Nice). Resumen extendido, pp. 326-329.
- MORENO, M.S., KLOTZ, J., MELNICK, D., ECHTLER, H. Y BATAILLE, K., 2008.** Contemporary forearc deformation in south-central Chile from GPS observations (36-39°S). 7th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG, Nice). Resumen extendido, pp. 348-350.
- MORENO, H.; PARADA, M.A. 1974.** Geología del área de Liquiñe-Neltume y Lago Pihueico. Instituto de Investigaciones Geológicas (inédito). 41 p.
- MORENO, H.; THIELE, R.; LAHSEN, A., VARELA, J. y LÓPEZ, L., 1984.** Estudio del Volcán Callaqui: Geología y Riesgo Volcánico; Contrato OICB-01, ENDESA-Departamento de Geología y Geofísica, U. de Chile.
- MUÑOZ B., J.; NIEMEYER R., H. 2010.** Petrología de la Formación Trapa-Trapa y consideraciones acerca del volcanismo mioceno entre los 36° y 39° lat. S (Cordillera Principal). Revista Geológica de Chile (23).
- NAVARRO, J. 2012.** Susceptibilidad y Amenaza de Movimientos de Ladera mediante SIG en el Municipio de Berlín, El Salvador. Trabajo Fin de Máster: Tecnologías de la Información Geográfica. Universidad Complutense de Madrid. 78 pp.
- NIEMEYER, H., MUÑOZ, J. 1983.** Hoja Laguna de la Laja, Región del Biobío. Carta Geológica de Chile, 1:250.000. No. 57, p. 52. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile.
- PESCE, A. 1981.** Estratigrafía de las nacientes del río Neuquén y Nahuever, Provincia del Neuquén. *In* Congreso Geológico Argentino, No. 8, Actas 3: 439-455. San Luis.
- POPESCU, M.E. 2002.** Landslide Causal Factors and Landslide Remedial Options. Keynote Lecture, proceedings 3rd International Conference on Landslides, Slope Stability and Safety of Infra-Structures Singapore, p. 61-81.
- SAURET, B., 1987.** Coulées boueuses. Laves torrentielles, Bull. Lias. Labo. P et Ch. 150/151, 65-77.
- SIELFELD, G. 2008.** Cordón fisural Callaqui: Antecedentes tectónicos de la naturaleza y geometría del volcanismo fisural en el volcán Callaqui, Zona Volcánica Sur, Región del Biobío, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Concepción. 87 pp.

SIELFELD, G.; CEMBRANO, J.; LARA, L. 2017. Transtension driving volcano-edifice anatomy: Insights from Andean transverse-to-the-orogen tectonic domains. *Quaternary International*.

STEFFEN, H. 1944. Patagonia occidental. Las cordilleras patagónicas y sus regiones circundantes. *Ediciones de la Universidad de Chile*, Vol 1, 333 p. Santiago.

THIELE, R.; LAHSEN, A.; MORENO, H.; VARELA, J.; VERGARA, M. Y MUNIZAGA, F. 1987. Estudio Geológico a escala 1:100000 de la Hoya Superior y Curso Medio del río Biobío. Informe Final. Convenio OICP-8601, ENDESA-Departamento de Geología y Geofísica, U. de Chile.

VAN WESTEN, C.J.; VAN DUREN, I.; KRUSE, H.M.G. & TERLIEN, M.T.J. 1993. GISSIZ: training package for Geographic Information System in Slope instability zonation. ITC. Publication. Vol. 1 N°15: 245 pp. Enschede

VARELA J.; THIELE R.; MORENO H.; MUNIZAGA F.; ARANEDA M.; MORENO A. 1987. Estudio Geológico a Escala 1:10000 del área del Proyecto Ralco, Alto Biobío, Región del Biobío. Convenio OICP-860I. Departamento de Geología y Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago de Chile. (Inédito). 62 pp.

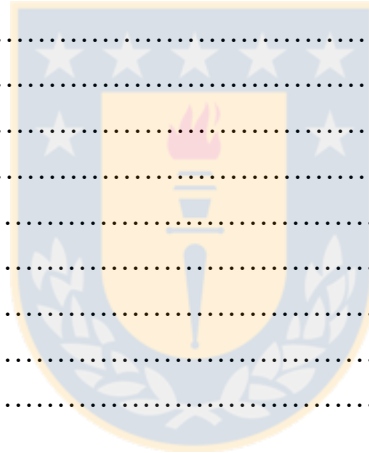
VARNES, J.D. 1984. Landslide Hazard zonation: a review of principles and practice. *Natural Hazards*. UNESCO. Vol 3: 63 pp. Paris.


ANEXOS





ÍNDICE DE TABLAS


Tabla	Página
A-01. Ficha A-01	88
A-02. Ficha A-02.....	89
A-03. Ficha A-03.....	90
A-04. Ficha A-04.....	91
A-05. Ficha A-05.....	92
A-06. Ficha A-06.....	93
A-07. Ficha A-07.....	94
A-08. Ficha A-08.....	95
A-09. Ficha A-09.....	96
A-10. Ficha A-10.....	97
A-11. Ficha A-11.....	98
A-12. Ficha A-12.....	99
A-13. Ficha A-13.....	100
A-14. Ficha A-14.....	101
A-15. Ficha A-15.....	102
B-01. Ficha B-01.....	103
B-02. Ficha B-02.....	104
B-03. Ficha B-03.....	105
B-04. Ficha B-04.....	106
B-05. Ficha B-05.....	107





Punto	A-01	RQD	25
GPS	0285240/5785754	Jn	15
Familias de discontinuidades	3+1	Jr	1.5
Litología	Lutitas	Ja	8
Estructuras	Zona de falla Estrías de falla	Jwice	0.3
DD/D	301/69; 85/166	SRF _{Slope}	10
Medidas de seguridad	No presenta	Ángulo talud	70°
Fotografía			


Punto	A-02	RQD	60
GPS	0285206/578555	Jn	12
Familias de discontinuidades	3+1	Jr	3
Litología	Andesita	Ja	1
Estructuras	Falla (231/75)	Jwice	0.7
DD/D	293/86; 203/54	SRF _{Slope}	1
Medidas de seguridad	Pernos de anclaje y malla	Ángulo talud	80°
Fotografía			


Punto	A-03	RQD	45
GPS	0285233/5785754	Jn	9
Familias de discontinuidades	3	Jr	3
Litología	Lutitas	Ja	6
Estructuras	Falla con relleno de arcillas	Jwice	0.6
DD/D	267/31; 109/70; 184/45	SRF _{slope}	1
Medidas de seguridad	Malla y pernos de anclaje	Ángulo talud	75°
Fotografía			


Punto	A-04	RQD	35
GPS	0285484/5785511	Jn	15
Familias de discontinuidades	3+1	Jr	2
Litología	Lutitas	Ja	5
Estructuras	Zona de falla. Presenta estrías	Jwice	0.3
DD/D	175/41; 79/82; 75/73; 249/09	SRF _{slope}	7
Medidas de seguridad	No presenta	Ángulo talud	65°
Fotografía			


Punto	A-05	RQD	35
GPS	0285484/5785511	Jn	15
Familias de discontinuidades	3+1	Jr	2
Litología	Lutitas	Ja	5
Estructuras	Zona de falla. Presenta estrías	Jwice	0.3
DD/D	175/41; 79/82; 75/73; 249/09	SRF _{slope}	7
Medidas de seguridad	No presenta	Ángulo talud	65°
Fotografía			


Punto	A-06	RQD	75
GPS	0285669/5785411	Jn	9
Familias de discontinuidades	3	Jr	3
Litología	Lutitas	Ja	2
Estructuras	Falla: 029/84	Jwice	0.7
DD/D	238/67; 174/40	SRF _{slope}	1
Medidas de seguridad	Presenta, en mal estado	Ángulo talud	70°
Fotografía			


Punto	A-07	RQD	45
GPS	0285798/5785387	Jn	9
Familias de discontinuidades	3	Jr	1
Litología	Sedimentaria	Ja	4
Estructuras	Plegamiento	Jwice	0.5
DD/D	237/44; 053/85; 086/64	SRF _{slope}	1
Medidas de seguridad	No presenta	Ángulo talud	60°
Fotografía			


Punto	A-08	RQD	60
GPS	0285981/5785280	Jn	9
Familias de discontinuidades	3	Jr	2
Litología	Andesita	Ja	1
Estructuras	No presenta	Jwice	0.6
DD/D	285/61; 198/41; 046/72	SRF _{slope}	2
Medidas de seguridad	No presenta	Ángulo talud	75°
Fotografía			


Punto	A-09	RQD	50
GPS	0286284/5785178	Jn	9
Familias de discontinuidades	3	Jr	3
Litología	Andesita	Ja	2
Estructuras	No presenta	Jwice	0.5
DD/D	331/70; 064/73; 229/45	SRF _{Slope}	1
Medidas de seguridad	No presenta	Ángulo talud	70°
Fotografía			


Punto	A-10	RQD	45
GPS	0286824/5785049	Jn	9
Familias de discontinuidades	3	Jr	3
Litología	Andesita	Ja	3
Estructuras	No presenta	Jwice	0.5
DD/D	108/42; 303/81; 229/86	SRF _{slope}	1
Medidas de seguridad	No presenta	Ángulo talud	65°
Fotografía			


Punto	A-11	RQD	40
GPS	0287146/5785339	Jn	9
Familias de discontinuidades	3	Jr	1
Litología	Andesita	Ja	2
Estructuras	Zona de fallas.	Jwice	0.3
DD/D	232/64	SRF _{slope}	3
Medidas de seguridad	No presenta	Ángulo talud	55°
Fotografía			


Punto	A-12	RQD	40
GPS	0287478/578449	Jn	9
Familias de discontinuidades	3	Jr	1
Litología	Andesita	Ja	2
Estructuras	Zona de fallas	Jwice	0.5
DD/D	246/65; 110/80	SRF _{Slope}	1
Medidas de seguridad	No presenta	Ángulo talud	70°
Fotografía			


Punto	A-13	RQD	70
GPS	0289982/5781743	Jn	9
Familias de discontinuidades	3+1	Jr	3
Litología	Andesita	Ja	2
Estructuras	Zona de fallas	Jwice	0.7
DD/D	071/26; 120/85; 205/85	SRF _{slope}	1
Medidas de seguridad	No presenta	Ángulo talud	80°
Fotografía			


Punto	A-14	RQD	65
GPS	0287778/5783377	Jn	9
Familias de discontinuidades	3	Jr	2
Litología	Pórfido andesítico	Ja	1
Estructuras	No presenta	Jwice	0.6
DD/D	252/59; 012/80; 141/26	SRF _{slope}	1
Medidas de seguridad	No presenta	Ángulo talud	60
Fotografía			

Punto	A-15	RQD	40
GPS	0287246/5783587	Jn	9
Familias de discontinuidades	3	Jr	1
Litología	Andesita	Ja	2
Estructuras	Zona de falla	Jwice	0.3
DD/D	231/60; 115/82; 062/34	SRF _{slope}	1
Medidas de seguridad	Hormigón intermitente	Ángulo talud	70
Fotografía			

Punto	B-01	RQD	40
GPS	0287657/5785391	Jn	9
Familias de discontinuidades	3	Jr	1
Litología	Lutitas	Ja	2
Estructuras	No presenta	Jwice	0.5
DD/D	293/76; 006/52; 154/12	SRF _{slope}	1
Medidas de seguridad	Malla en la parte superior	Ángulo talud	60
Fotografía			

Punto	B-02	RQD	20
GPS	0287481/5785590	Jn	9
Familias de discontinuidades	3+1	Jr	1
Litología	Lutitas	Ja	4
Estructuras	Vetillas con relleno arcilloso, estrías y espejos de falla	Jwice	0.5
DD/D	135/65; 203/46; 247/56	SRF _{slope}	4
Medidas de seguridad	No presenta	Ángulo talud	50°
Fotografía			

Punto	B-03	RQD	20
GPS	0287348/5785520	Jn	9
Familias de discontinuidades	3	Jr	1
Litología	Lutitas	Ja	4
Estructuras	Vetillas con relleno arcilloso, plegamiento	Jwice	0.3
DD/D	110/47; 182/44; 064/82	SRF _{Slope}	1
Medidas de seguridad	No presenta	Ángulo talud	70°
Fotografía			

Punto	B-04	RQD	80
GPS	0284300/5786336	Jn	9
Familias de discontinuidades	2+1	Jr	3
Litología	Andesitas con sectores brechosos	Ja	2
Estructuras	Vetillas con relleno arcilloso	Jwice	0.7
DD/D	184/15; 237/28; 259/32	SRF _{slope}	1
Medidas de seguridad	No presenta	Ángulo talud	80°
Fotografía			

Punto	B-05	RQD	65
GPS	0284755/5786306	Jn	9
Familias de discontinuidades	2+1	Jr	3
Litología	Andesitas	Ja	2
Estructuras	Vetillas con relleno arcilloso	Jwice	0.7
DD/D	287/36; 252/82	SRF _{slope}	1
Medidas de seguridad	No presenta	Ángulo talud	70°
Fotografía	