



Escuela de Ingeniería  
Ingeniería Civil Geológica

**Caracterización Geológica, Geomorfológica e Hidrológica de la Zona Sur de la Región de O'Higgins**

Nava Gómez Fernández  
Profesor(a) guía: Tania Villaseñor Jorquera

Memoria para optar al título de Ingeniera Civil Geóloga

Miembros de la Comisión:  
Josefina López  
Marisol Lara

Rancagua, Chile  
Marzo, 2022

## Agradecimientos

Agradezco a la Oficina Nacional de Emergencias (ONEMI) por darme la oportunidad de realizar esta memoria, en particular a Josefina López, por su apoyo y disposición tanto en la organización de los terrenos como en la recopilación de la información necesaria.

Agradezco también a los integrantes de la Mesa de Zonificación de Remociones en Masa: Carlos Gálvez (SERNAGEOMIN), Sebastián Flores (Gore O'Higgins), Lucas Ruminot (MINVU), Rafael Gutiérrez y Francisco Rojas (DGA), participantes de este estudio quienes hicieron posible el logro de los objetivos, especialmente a las Profesoras Tania Villaseñor y Alejandra Serey, quienes estuvieron presentes y atentas a las dudas que surgieron en el proceso, acompañándonos y guiándonos.

Por otra parte, agradezco a mi familia, en especial a mis padres, Lolito y Raúl, quienes han sido mi sostén principal durante todo mi desarrollo y crecimiento personal, por sus consejos, sabias palabras y amor entregado. También, doy gracias a mis hermanos, por su apoyo y por cuidarme incondicionalmente.

Agradezco a Leo, por sus palabras de aliento y por acompañarme en momentos de estrés (por soportarme). Gracias por siempre querer brindarme tu ayuda y por todo el cariño que me das.

Por último, agradezco a mis compañeros de carrera, por su compañerismo y por los buenos momentos que compartimos, son grandes personas y sé que también serán excelentes profesionales. Menciono especialmente a Lucho y a la Cata, por su amistad y compañía durante todo este proceso.

## Tabla de contenido

<b>RESUMEN .....</b>	<b>8</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>9</b>
<b>OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>10</b>
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>11</b>
<b>UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....</b>	<b>12</b>
<b>ANTECEDENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO .....</b>	<b>13</b>
MARCO GEOMORFOLÓGICO REGIONAL. ....	13
MARCO GEOLÓGICO .....	15
<i>Rocas Estratificadas</i> .....	15
<i>Rocas Intrusivas</i> .....	18
<i>Rocas Metamórficas</i> .....	19
<i>Estructuras</i> .....	22
MARCO GEODINÁMICO .....	25
MARCO CLIMÁTICO .....	26
<i>Cambio climático y Mega sequia</i> .....	26
<i>Tormenta estival del 2021 en Chile Central</i> .....	27
REMOCIONES EN MASA .....	29
<b>MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>32</b>
1. GENERACIÓN DE UN MAPA GEOLÓGICO UNIFICADO DE LA ZONA SUR DE LA REGIÓN DE O'HIGGINS .....	32
1.1. <i>Reunir información geológica.</i> .....	32
1.2. <i>Agrupar litologías.</i> .....	33
2. DENSIDAD DE DRENAJE Y FACTOR DE MELTON: .....	35
2.1. <i>Determinar Red de drenaje y Microcuencas (Orden 7).</i> .....	35
2.2. <i>Revisión de coberturas.</i> .....	37
2.3. <i>Densidad de drenaje (Dd).</i> .....	40
2.3. <i>Factor de Melton (FM).</i> .....	41
3. ELABORACIÓN DE UN MAPA GEOMORFOLÓGICO .....	42
3.1. <i>Modelo Geomorfológico.</i> .....	42
3.2. <i>Definición de Limites.</i> .....	45
4. CATASTRO DE EVENTOS DE REMOCIONES EN MASA GEORREFERENCIADO Y FACTOR DE CATASTRO .....	48
4.1. <i>Búsqueda de información.</i> .....	48
4.2. <i>Revisión y Homologación</i> .....	48
4.3. <i>Factor de Catastro.</i> .....	49
5. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL (UCS) .....	50
<b>RESULTADOS.....</b>	<b>53</b>
MAPA GEOLÓGICO.....	53

ORDEN DE DRENAJE Y MICROCUENCAS.....	55
MAPA GEOMORFOLÓGICO .....	60
CATASTRO DE REMOCIONES EN MASA .....	63
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL (UCS) .....	66
<b>DISCUSIÓN .....</b>	<b>67</b>
<b>CONCLUSIÓN .....</b>	<b>69</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>70</b>
Anexo I: Eventos de Remoción en masa del sector sur de la Región de O'Higgins -	74
Anexo I.a: Definición de los códigos referentes al Anexo I -	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación de la zona de estudio. A la izquierda se presenta la ubicación de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins y a la derecha un acercamiento de la zona de estudio.....	12
Figura 2: Principales morfoestructuras de la segmentación andina entre los 32° y 35° S (Charrier y Muñoz (1994), Giambiagi et al. (2001), Giambiagi et al. (2003a) y Tassara y Yañez (2003), como se citó en Escribano (2008)).	14
Figura 3: Geología del área sur de la región de O'Higgins. Elaboración propia con base en SERNAGEOMIN (2003). Leyenda en la figura 4.	20
Figura 4: Unidades geológicas del área sur de la Región de O'Higgins. Elaboración propia con base en SERNAGEOMIN (2003).	21
Figura 5: Mapa Geológico simplificado de los Andes centrales. Se presentan las principales fallas de la región de O'Higgins (33,85°–35°S). Extraído de Farías et al. (2010)	23
Figura 6: Se presentan las estructuras de la zona costera: las líneas rojas son fallas normales y las líneas negras son fallas del mapa geológico de Chile 1:1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2003). (Aron et al. (2012), como se citó en Palape (2014))	24
Figura 7: Mapa de los principales rasgos morfotectónicos de Chile central (Farías et al., 2008; Giambiagi, 2003). Los contornos representan la profundidad de la zona de Wadati–Benioff (en km).	25
Figura 8: Mapa de Chile central con las principales afectaciones producto de la tormenta de fines de enero 2021 (Oficina Nacional de Emergencia (2021), Dirección de Vialidad, MOP (2021) y FEDEFRUTA (2021), como se citó en Garreaud et al. (2021))	28
Figura 9: Remociones en masa según tipo de movimiento. A) Deslizamiento Rotacional. B) Caída de Bloques. C) Deslizamiento Traslacional. D) Flujos. (Valenzuela y Pino, 2022)	31
Figura 10: Fuentes de Información geológica y su extensión en la zona de estudio.	32
Figura 11: Modelo utilizado para la obtención de Red Hídrica y Microcuencas. Basado en Alfaro et al. (2018).	36
Figura 12: Jerarquías de drenaje según Strahler (1957). Obtenido de ESRI (2018)	37
Figura 13: Corrección de errores en cuencas destacadas. En la figura superior se presenta el resultado automático arrojado por Model Builder, mientras que en la figura inferior se muestra el ajuste realizado de forma manual.	38
Figura 14: Corrección de errores en cuencas destacadas. En la figura superior se presenta el resultado automático arrojado por Model Builder, mientras que en la figura inferior se muestra el ajuste realizado de forma manual.	38
Figura 15: Suavizado de drenes. A la derecha se presenta la herramienta utilizada y los parámetros escogidos, mientras que a la izquierda se muestra el contraste entre la cobertura anterior al suavizado (línea naranja) y la cobertura posterior (línea azul).	39
Figura 16: Suavizado de cuencas. A la derecha se presenta la herramienta utilizada y los parámetros escogidos, mientras que a la izquierda se muestra el contraste entre la situación anterior (línea naranja) y la situación posterior al suavizado (línea azul).	39
Figura 17: Herramienta principal para el cálculo de la densidad de drenaje en ArcGIS Pro. La clase de entidad de salida contiene las estadísticas calculadas.	41

Figura 18: Herramienta para el cálculo del Factor de Melton. ....	42
Figura 19: Modelo digital de elevación (DEM) SRTM, resolución de 30 m.....	43
Figura 20: A la derecha se presenta la herramienta “Topographic Modeling” con las variables fisiográficas seleccionadas. A la izquierda se presenta el modelo de salida. ....	43
Figura 21: A la derecha se presenta la herramienta “Forward PCA rotation new statistics” y a la izquierda el Modelo topográfico con aplicación de Análisis de componentes principales (ACP).44	44
Figura 22: A la derecha se presenta la herramienta “ISODATA” con los parámetros ingresados. A la izquierda se presenta el Modelo Geomorfológico. ....	44
Figura 23: A la derecha se presenta la herramienta “Reclassify”. A la izquierda se muestra la cobertura ráster resultante con las clases reclasificadas. ....	46
Figura 24: A la derecha se presenta el Filtro “Majority Filter” y los parámetros seleccionados. A la izquierda se presenta la cobertura ráster resultante “Filtro1”. ....	46
Figura 25: A la derecha se presenta la herramienta “Boundary Clean” y los parámetros seleccionados. A la izquierda se muestra la cobertura ráster resultante “Filtro 2”. ....	47
Figura 26: Metodología para realizar el mapa geomorfológico. Se utilizó ENVI 5.3 para la etapa inicial y ArcGIS Pro para finalizar. ....	47
Figura 27: Ubicación de los puntos de muestreo. ....	50
Figura 28: Ensayo de carga puntual. Foto tomada por A. Serey (2021).....	51
Figura 29: Requerimientos para el ensayo de bloques de roca irregulares. W = ancho, L = largo, D = diámetro, y De = diámetro del núcleo equivalente. Extraído de ASTM (1995). ....	51
Figura 30: Geología compilada de la zona sur de la Región de O’Higgins. Referencia Geodésica: UTM, Zona 19S, SIRGAS. Leyenda en figura 3. ....	53
Figura 31: Leyenda del Mapa Geológico Compilado. ....	54
Figura 32: Jerarquía de drenes, Región de O’Higgins. ....	55
Figura 33: Microcuencas del sector sur de la Región de O’Higgins. Referencia Geodésica: UTM, Zona 19S, SIRGAS. ....	56
Figura 34: Jerarquía de drenes sector sur de la Región de O’Higgins. Referencia Geodésica: UTM, Zona 19S, SIRGAS. ....	57
Figura 35: Densidad de drenaje (Dd) sector sur de la Región de O’Higgins. Referencia Geodésica: UTM, Zona 19S, SIRGAS. ....	58
Figura 36: Factor de Melton (FM) sector sur de la Región de O’Higgins. Referencia Geodésica: UTM, Zona 19S, SIRGAS. ....	59
Figura 37: Macrounidades Geomorfológicas sector sur de la Región de O’Higgins. Referencia Geodésica: UTM, Zona 19S, SIRGAS. ....	61
Figura 38: Mapa de Pendiente sector sur de la Región de O’Higgins. Referencia Geodésica: UTM, Zona 19S, SIRGAS. ....	62
Figura 39: Catastro de eventos de Remoción en masa en la zona sur de la Región de O’Higgins. Referencia Geodésica: UTM, Zona 19S, SIRGAS. Leyenda en Figura 40.....	63
Figura 40:Leyenda del catastro de eventos de remoción en masa. ....	64
Figura 41: Factor de catastro (FC) en la zona sur de la región de O’Higgins. Referencia geodésica: UTM, Zona 19S, SIRGAS. ....	65

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Remociones en masa según la Clasificación de Hungr et al. (2014). Se destaca en azul aquellas consideradas en este estudio. ....	31
Tabla 2: Litologías referentes a cada fuente de información con su respectiva unidad geológica. ....	34
Tabla 3: Clasificación de la red de drenaje según la densidad de drenaje. Tomado de Camino et al. (2018).....	40
Tabla 4: Número de remociones por fuente de información.....	49
Tabla 5: Cantidad de remociones por tipo de evento. ....	64
Tabla 6: Datos ensayo de carga puntual P1D1 .....	66
Tabla 7: Datos ensayo de carga puntual P2D1 .....	66

## Resumen

El cambio climático es un desencadenante de condiciones meteorológicas extremas que trae múltiples consecuencias, entre ellas, la generación de un mayor número de remociones en masa, un fenómeno natural que comprende la movilización de material constituyendo un gran riesgo para la población. En este aspecto, la región de O'Higgins se ha visto gravemente afectada, por ello, desde la ONEMI surge la necesidad de crear un mapa de susceptibilidad a las remociones en masa en la región, con el fin de prever y responder de forma oportuna ante estos eventos. El propósito principal del presente trabajo es recopilar los antecedentes geológicos, geomorfológicos e hidrológicos necesarios para la generación del mapa, utilizado como base la metodología de Alfaro et al. (2018). Inicialmente, se recopiló cartas geológicas, eventos de remoción en masa declarados y se descargó un modelo digital de elevación (DEM) SRTM de 30m, el que se utilizó como base para la caracterización hidro y geomorfológica. Estos, fueron los insumos principales que se utilizaron para el desarrollo de la metodología en los softwares ArcGIS Pro y ENVI 5.3. A partir del análisis de los resultados, se plantea que la cordillera de los Andes es la unidad morfoestructural más propensa a generar remociones en masa, mientras que la depresión central es el rasgo menos propenso. Por otra parte, la cordillera de la Costa se considera moderadamente propenso por la mayor variabilidad en sus características. Los resultados preliminares implican que se deben enfocar estudios de mayor detalle en la cordillera de la Costa, por ser una zona con mayor población y por los antecedentes que dejó la tormenta estival del 2021.

*Palabras claves:* Remoción en masa, región de O'Higgins, mapa de susceptibilidad, megasequía.

## Introducción

Las Remociones en masa son un fenómeno natural que comprende la movilización de material, ya sea, detritos, rocas y/o suelo, debido a la fuerza de gravedad que domina en morfologías montañosas. Este tipo de amenaza constituye un gran riesgo para las comunidades y bienes emplazados o cercanos al piedemonte, en especial, los flujos, que pueden arrastrar una cantidad importante de material y recorrer grandes distancias desde su origen, por lo que posee una gran capacidad destructiva.

Las remociones en masa pueden desencadenarse por diferentes causas, las que pueden ser de origen antrópico o natural, siendo los sismos y eventos de precipitación los más influyentes. En este sentido, el cambio climático, y con ello la megasequía que afecta a Chile central, ha generado déficit de lluvia, pero precipitaciones notablemente más intensas, las cuales han afectado a zonas sin registro reciente de eventos de remociones importantes, como es el caso de la comuna de Malloa en la región de O'Higgins, que sufrió importantes aluviones durante la época estival del 2021 y que afectaron directamente a la comunidad, causando 200 heridos y 73 viviendas dañadas (Romero et al., 2022)

En base a lo anterior, desde la Oficina Nacional de Emergencias (ONEMI) surge el interés por generar un instrumento técnico que permita visualizar y priorizar las zonas con mayor potencial ante la ocurrencia de eventos de remoción en masa en la región de O'Higgins, que, además, funcione como apoyo para implementar las acciones de respuesta en caso de una emergencia ante dicho peligro, y permita focalizar capacitaciones hacia esas comunidades más vulnerables, como también a otros Servicios Públicos, dirigir recursos o estudios de detalle. Así pues, el presente proyecto se enmarca dentro del Plan Específico de emergencia por variable de riesgo "Remoción en Masa", abordando la preparación de insumos necesarios mediante la metodología propuesta por Alfaro et al. (2018) y desarrollada para el Servicio Nacional de Geología y Minería, con un enfoque en un subconjunto de remociones en masa tales como deslizamientos y caídas, y con un mayor énfasis en los flujos de detritos. La elección de esta metodología fue establecida en la Mesa de Zonificación, conformada para el trabajo del plan e integrada por MINVU, Gobierno Regional, DGA, ONEMI, Universidad O'Higgins y SERNAGEOMIN.

### **Objetivo general**

- Caracterizar geológica, geomorfológica e hidrológicamente la zona sur de la Región de O'Higgins (34,415°S–34,98°S) con la finalidad de proporcionar los insumos necesarios que servirán de base para generar un mapa de susceptibilidad a las Remociones en Masa.

### **Objetivos específicos**

- Preparar mapas temáticos concernientes a los factores influyentes en la susceptibilidad de remociones en masa según la metodológica de Alfaro et al. (2018) para la zona sur de la región de O'Higgins a escala 1:250.000.
- Analizar los mapas resultantes para plantear de forma preliminar la susceptibilidad a las remociones en masa en la zona de estudio.

## Ubicación de la Zona de Estudio

La zona de estudio se encuentra en el sector sur de la región de O'Higgins, comprendiendo parte de las provincias de Colchagua, Cachapoal y Cardenal Caro. Sus coordenadas son entre los paralelos 34,415° y 34,98°S, limitando al sur con la región del Maule (Figura 1).

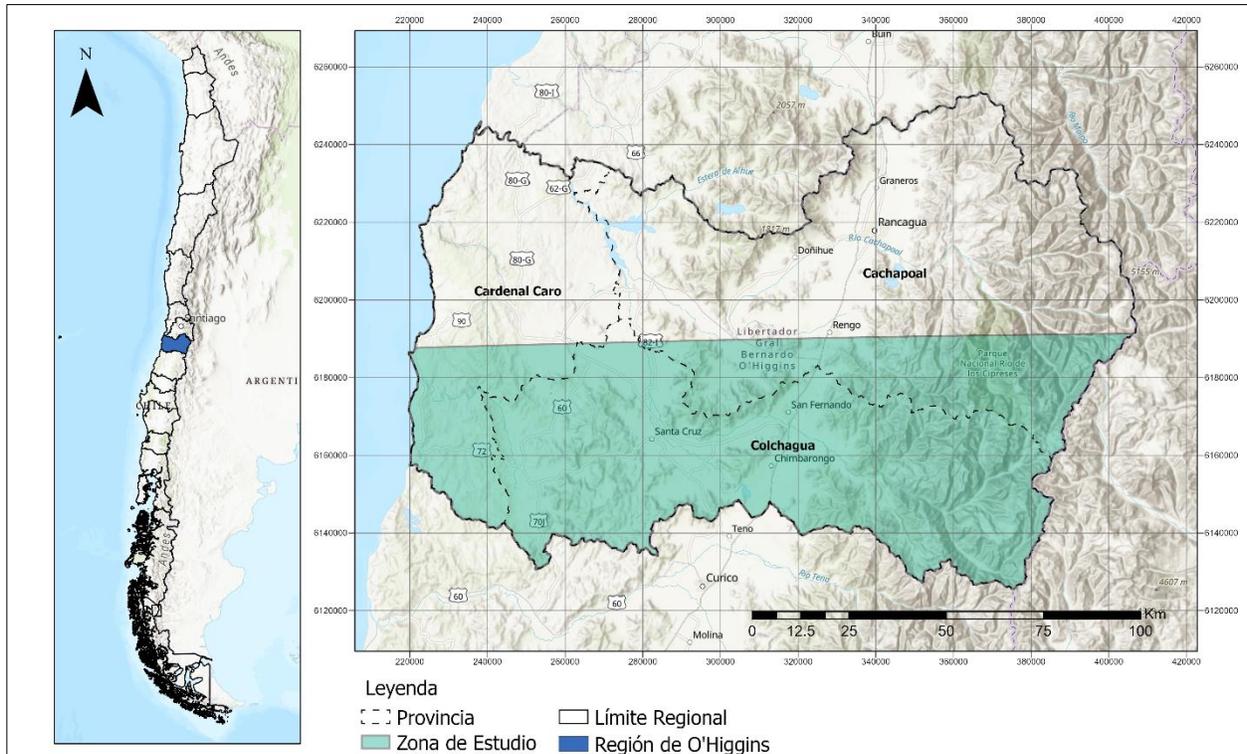


Figura 1: Ubicación de la zona de estudio. A la izquierda se presenta la ubicación de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins y a la derecha un acercamiento de la zona de estudio.

## Antecedentes del Área de estudio

### Marco Geomorfológico Regional.

La Región de O'Higgins se emplaza en los Andes Centrales del sur, que se caracteriza por presentar cinco unidades morfoestructurales que se disponen con una orientación NNE-SSW desde los 34°S y de forma paralela al margen continental (Tapia, 2015). Dentro de la zona de estudio es posible reconocer de oeste a este: Cordillera de la Costa, Depresión Central y Cordillera Principal (Figura 2).

La Cordillera de la Costa posee alturas máximas de 2200 msnm y se compone por secuencias volcánicas y sedimentarias de edad Mesozoica en su vertiente oriental, mientras que, en su parte más occidental, está conformada por granitoides y basamento metamórfico del Paleozoico (Sellés y Gana, 2001)

La Depresión Central es un valle que se extiende desde los 33°S hasta los 40°S, y se caracteriza por constituirse de depósitos aluviales y volcánicos del Cuaternario (Farías et al., 2008)

La Cordillera Principal se conforma por rocas del Cenozoico correspondientes a las formaciones Abanico (Coya-Machalí) y Farellones, las cuales se extienden por toda la morfología, y por rocas de edad Mesozoica con una importante deformación que se distribuyen en su flanco más oriental principalmente (Farías et al., 2008), que corresponden a las formaciones Nacientes del Teno, Río Damas, Leñas Espinoza y Baños del Flaco.

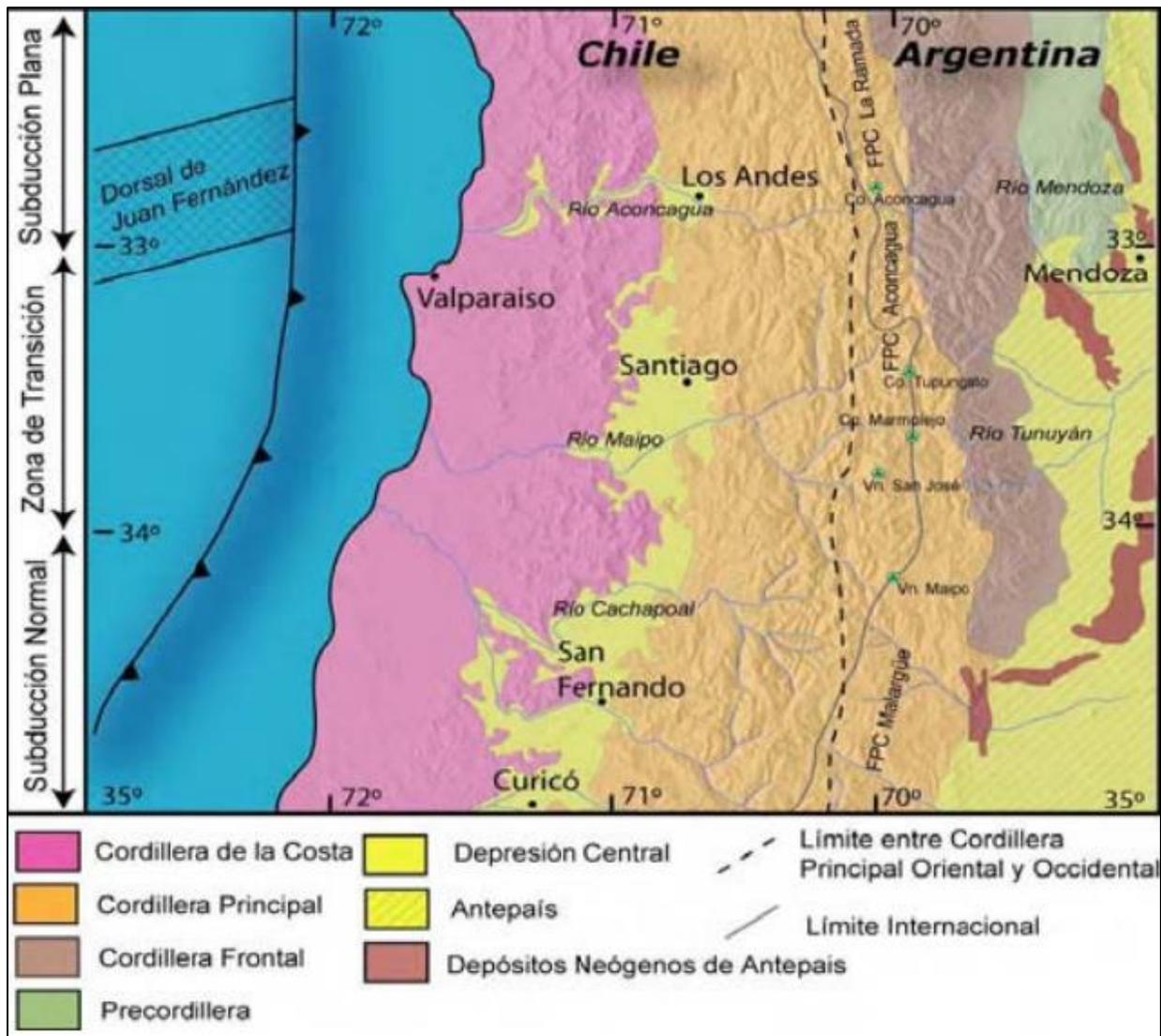


Figura 2: Principales morfoestructuras de la segmentación andina entre los 32° y 35° S (Charrier y Muñoz (1994), Giambiagi et al. (2001), Giambiagi et al. (2003a) y Tassara y Yañez (2003), como se citó en Escribano (2008)).

## Marco Geológico

La región de O'Higgins, entre los 33,85°–35°S, se constituye de 3 unidades morfoestructurales: la Cordillera de la Costa, la cual se compone por basamento del Paleozoico tardío–triásico en su vertiente más occidental y por secuencias volcanosedimentarias y volcanoclásticas del Jurásico superior–Cretácico inferior, las cuales se encuentran intruidas por intrusivos del Cretácico superior; la Depresión Central, conformada por depósitos aluviales que rellenan la llanura aluvial, y por depósitos de remoción en masa, fluviales, coluviales y morrénicos del Pleistoceno–Holoceno y por la Cordillera Principal, compuesta por secuencias volcánicas del Eoceno–Mioceno intruidas por cuerpos plutónicos de edad Mioceno y por depósitos de ignimbrita y de remoción en masa (avalancha de detritos Colón–Coya) del Pleistoceno que se encuentran localmente en la unidad (Godoy et al. (2009), como se citó en Chacón (2019)).

### *Rocas Estratificadas*

Se describen las formaciones presentes en el área de estudio, desde la más antigua a la más reciente:

- Formación Nacientes del Teno: Se presenta escasamente en el sector noreste de la zona de estudio (Js1m en Figura 3) y subyace concordantemente a la formación Río Damas. Esta unidad corresponde a rocas sedimentarias clásticas y químicas con intercalaciones de material piroclástico depositadas durante el Jurásico, específicamente en el ciclo marino Bajociano–Kimmeridgiano (Charrier, 1973). Según Davidson y Vicente (1973) se compone de dos miembros, el superior, denominado por Klohn (1960) como Santa Elena, el cual posee una deformación intensa y está compuesto principalmente por 80 a 120 m de yeso y anhidrita; y el miembro inferior, denominado Rinconada, el cual está conformado por 450 m de material detrítico y calcáreo. Davidson (1971) le atribuyó una edad Bajociano Inferior–Oxfordiano superior de acuerdo a su contenido fosilífero.
- Formación Río Damas: Esta formación se dispone como una franja de orientación NS (Js1c en la Figura 3) que se emplaza en el sector más oriental de la Cordillera Andina. Fue

definida por Klohn (1960) y se constituye por rocas sedimentarias clásticas con intercalación de material volcánico, siendo su mayor desarrollo en el valle del Río Damas, con un espesor de 3000 m. Sobreyace a la formación Nacientes del Teno y subyace a la formación Baños del Flaco, ambas con un contacto concordante. En cuanto a su edad, no se han encontrado fósiles de valor cronológico, sin embargo, Klohn (1960) plantea una edad Kimmeridgiano de acuerdo a la edad de las formaciones infra y suprayacentes.

- **Formación Leñas-Espinoza:** La formación Leñas-Espinoza se ubica al oriente de la Cordillera Andina en bandas de rumbo NS (Js1c en la Figura 3). Fue asignada inicialmente por Klohn (1960), refiriéndose a una serie de rocas sedimentarias detríticas que subyacen a rocas calcáreas fosilíferas, con una potencia de 1200 m. Posteriormente, fue redefinida por Charrier (1981), quien la acotó solo a su piso clástico inferior planteándola equivalente a la formación Río Damas, mientras que la parte superior la incluyó en la formación Baños del Flaco, a la cual subyace de forma concordante y gradual, al igual que a la formación Coya-Machalí, pero de forma discordante. Tavaera (1972, como se citó en Charrier y Lillo (1973)) propuso una edad Titoniana para esta formación, aunque en Charrier (1981) no se encontró contenido fosilífero que permitiera una asignación cronológica.
- **Formación Baños del Flaco:** Esta formación corresponde a una serie de rocas sedimentarias calcáreas de origen marino con presencia de intercalaciones de rocas volcánicas y detríticas según Klohn (1960). Se presenta escasamente al oeste de la cordillera de los Andes (JK1m en la Figura 3), con un espesor promedio de 1000 m (Rojas, 2014). Presenta una deformación intensa, y en algunas áreas la formación Coya-Machalí la sobreyace de forma discordante. Biro-Bagoczky (1984, como se citó en Parada (2008)) le atribuyó una edad Titoniana.

- Formación la Lajuela: Fue denominada por Muñoz Cristi y Karzulovic en 1958, y hace referencia a una serie de rocas volcánicas y sedimentarias continentales y marinas que se exponen en la cuesta La Lajuela, al oeste de Santa Cruz, Cordillera de la costa. Principalmente, está constituida por volcanitas queratófíricas y andesíticas, además por algunos niveles riolíticos. Se destacan también potentes intercalaciones sedimentarias continentales y marinas: lutitas, calizas, areniscas y conglomerados, que han permitido determinar la edad de esta formación a partir de sus fósiles, los cuales datan una edad Valanginiana superior para los niveles sedimentarios marinos. En general, Charrier y Lillo (1973) proponen una edad comprendida entre el Titoniano y el Hauteriviano. Según Vergara (1969, como se citó en Charrier y Lillo (1973)) esta formación posee un espesor estimado de 13000 m. En su techo, sobreyace la formación Farellones en discordancia angular.
- Formación Coya-Machalí: La formación Coya-Machalí (OM2c en la Figura 3) fue denominada por Klohn (1960) y corresponde a los estratos que se ubican de forma longitudinal al margen continental a lo largo de dichas comunas. Se dispone de dos franjas principales separadas por la formación Farellones y se caracteriza por constituirse de rocas volcánicas con intercalaciones sedimentarias lacustres, alcanzando un espesor total de 3000 m. La franja oriental se encuentra en la Cordillera Principal mientras que la franja occidental limita al oeste con la Depresión Central (Charrier et al., 1994). Se sobrepone de forma discordante con algunas formaciones más antiguas, tales como, formación Río Damas y formación Colimapu, mientras que, en su parte superior, la formación Farellones sobreyace de forma discordante. En la zona del río Aconcagua es correlacionable a la formación Abanico (Klohn, 1960) y su equivalente en la cordillera de la Costa es la formación Las Chilcas (Charrier, 1973). Según Charrier et al. (1994), data una edad Eoceno superior-Oligoceno Inferior.

- **Formación Farellones:** La formación Farellones (M3i en Figura 3) fue asignada por Muñoz Cristi (1953, verbalmente) y se refiere a la secuencia volcánica–continental que separa a las franjas de la formación Coya–Machalí y que se emplaza en la Cordillera Principal con un rumbo norte–sur. Se distribuye entre los 34°S y 35°20'S, aflorando en la localidad de Farellones (Klohn, 1960) y en el cerro la Gloria, al norte del Río Aconcagua (Rivano et al., 1990), en donde, está constituida de dos componentes principales: El superior, conformado por flujos andesíticos–basálticos intruidos por domos riodacíticos con un espesor máximo de 1500 m, y otro inferior, conformado por ignimbritas y tobas de composición riolítica a dacítica de espesor variable; mientras que el afloramiento emplazado en la localidad de Farellones y definido por Klohn (1960) solo se compone por el miembro superior y posee un espesor estimado de 2400 m. Se relaciona de forma discordante con la formación Coya–Machalí, a la cual sobreyace, sin embargo, en algunas zonas su diferenciación se dificulta, ya que poseen un límite concordante (Klohn, 1960). En Godoy et al. (2009), se establece una edad Mioceno para esta formación.
- **Formación Colón–Coya:** Gómez (2001) la definió como una serie de depósitos laháricos con intercalaciones de ceniza, coladas andesíticas y gravas fluviales, cuya potencia total alcanza hasta 150 m. Su nivel superior es la superficie de erosión actual, sobreponiéndose discordantemente a las formaciones Coya–Machalí y Farellones. Se plantea una edad Plioceno–Pleistoceno para esta formación (Rojas, 2014). Corresponde a Q3av en la Figura 3.

### ***Rocas Intrusivas***

Las unidades intrusivas se distribuyen en toda la zona de estudio y comprenden edades desde los 6 Ma, las que se emplazan en el sector más oriental, hasta los 328 Ma, que se localizan al oeste. A continuación, se presentan las rocas intrusivas de acuerdo a SERNAGEOMIN (2003):

- Granodioritas de hornblenda y biotita del Mioceno Superior (Msg).
- Granodioritas, dioritas y tonalitas del Mioceno (Mg).

- Granodioritas, monzogranitos, monzodioritas, monzonitas y dioritas de biotita y hornblenda del Mioceno Inferior–Medio (Mimg).
- Dioritas y monzodioritas de piroxeno y hornblenda, granodioritas, monzogranitos de hornblenda y biotita del Cretácico Inferior alto–Cretácico Superior bajo (Kiag).
- Dioritas, gabros y monzodioritas de piroxeno, dioritas cuarcíferas y granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita del Jurásico Inferior (Jig).
- Granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, de hornblenda y biotita, localmente de muscovita del Carbonífero–Pérmico (CPg).

### ***Rocas Metamórficas***

Las unidades metamórficas se exhiben en el sector occidental de la cordillera de la Costa y presentan una edad Paleozoica (Silúrico–Carbonífero). La unidad más occidental (Pz4a en Figura 3) está conformada por esquistos, metabasitas, metachert y serpentinitas que se caracterizan por un metamorfismo de alto gradiente P/T del Carbonífero temprano (SERNAGEOMIN, 2003). Por otra parte, según Moreno y Gibbons (2007), la serie oriental (Pz4b en Figura 3) está conformada principalmente de metawackas de origen turbidítico con presencia de lentes calcosilicatados, con un metamorfismo de baja presión (3+0.5 kbar) y alta temperatura (400–720°C).

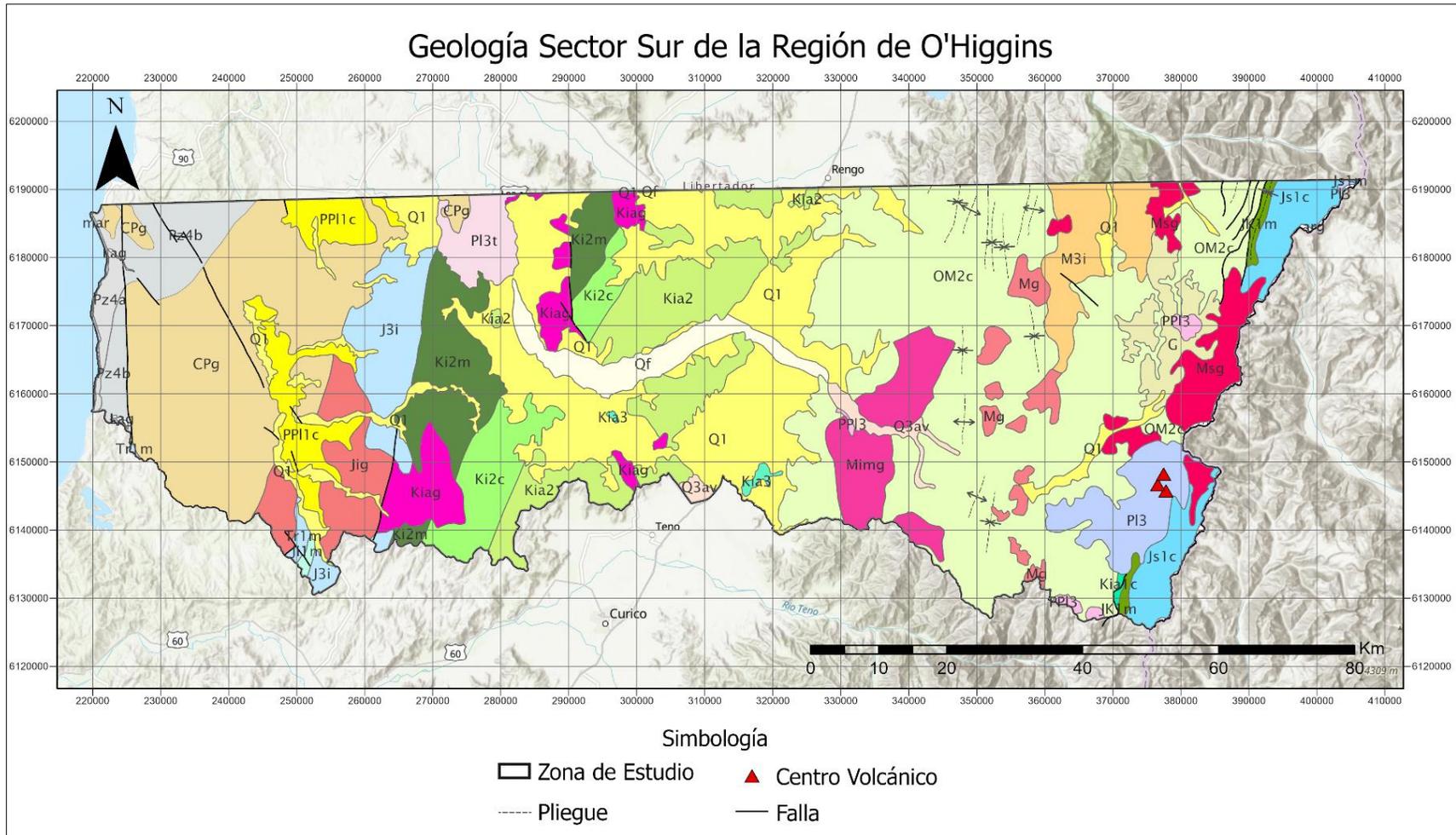


Figura 3: Geología del área sur de la región de O'Higgins. Elaboración propia con base en SERNAGEOMIN (2003). Leyenda en la figura

4.

	Secuencias Sedimentarias	Secuencias Volcanosedimentarias	Secuencias Volcánicas	Rocas Intrusivas	Rocas Metamórficas
CENozoico	<p><b>Q1</b> Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvio-glaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados.</p> <p><b>Qf</b> Depósitos fluviales: gravas, arenas y limos del curso actual de los ríos mayores o de sus terrazas subactuales y llanuras de inundación.</p>		<p><b>Q3av</b> (Formación Colón-Coya) Depósitos de avalancha volcánica, asociados a colapso parcial de edificios volcánicos.</p> <p><b>P13</b> Secuencias lávicas y centros volcánicos básicos e intermedios; depósitos piroclásticos andesítico-basálticos.</p> <p><b>P13t</b> (igimbrita de Pudahuel) Depósitos piroclásticos principalmente riolíticos, asociados a calderas de colapso.</p>		
	<p><b>PP1c</b> Conglomerados, areniscas, limolitas y arcilolitas, generalmente consolidados, de facies principalmente aluviales, subordinadamente lacustres y eólicas.</p>		<p><b>PP1</b> Secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados: lavas principalmente basálticas con intercalaciones de tobas y conglomerados.</p> <p><b>M3i</b> (Formación Farellones) Complejos volcánicos parcialmente erosionados y secuencias volcánicas: lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesítico-basálticas a dacíticas.</p>	<p><b>M5g</b> Granodioritas de hornblenda y biotita, en menor proporción monzogranitos, monzonitas, cuarcíferas y monzodioritas.</p> <p><b>Mg</b> Granodioritas, dioritas y tonalitas.</p> <p><b>Mimg</b> Granodioritas, monzogranitos, monzodioritas, monzonitas y dioritas de biotita y hornblenda.</p>	
			<p><b>OM2c</b> (Formación Coya-Machali) Secuencias volcanosedimentarias: lavas basálticas a dacíticas, rocas epiclásticas y piroclásticas.</p>		
MESozoico	<p><b>K1a1c</b> Secuencias sedimentarias continentales aluviales, fluviales y lacustres; areniscas, conglomerados, limolitas, calcilitas y brechas sedimentarias con intercalación de tobas.</p>	<p><b>K1a2</b> Secuencias sedimentarias y volcánicas: rocas epiclásticas, piroclásticas y lavas andesíticas y basálticas con intercalaciones lacustres, localmente marinas.</p> <p><b>K1z</b> Secuencias sedimentarias y volcánicas continentales, con escasas intercalaciones marinas: brechas sedimentarias y volcánicas, lavas andesíticas, ocoitas, conglomerados, areniscas, limolitas calcáreas lacustres con flora fosil; localmente calizas fosilíferas marinas en la base.</p> <p><b>K1z1m</b> Secuencias volcánicas y sedimentarias marinas: lavas andesíticas y basálticas, tobas y brechas volcánicas y sedimentarias, areniscas y calizas fosilíferas.</p>	<p><b>K1a3</b> Secuencias y complejos volcánicos continentales: lavas y brechas basálticas a andesíticas, rocas piroclásticas andesíticas a riolíticas, escasas intercalaciones sedimentarias.</p>	<p><b>K1ag</b> Dioritas y monzodioritas de piroxeno y hornblenda, granodioritas, monzogranitos de hornblenda y biotita.</p>	
	<p><b>JK1m</b> (FLV y FBF) Secuencias sedimentarias marinas litorales o plataformales: calizas, lutitas, areniscas calcáreas, areniscas y coquinas.</p> <p><b>Js1c</b> (FRD y FLE) Secuencias sedimentarias continentales y transicionales, en parte lacustres: brechas sedimentarias, conglomerados y areniscas rojas con intercalación de tobas y niveles evaporíticos.</p> <p><b>Js1m</b> (FNT) Secuencias sedimentarias marinas litorales: calizas, areniscas, lutitas, calcáreas, en parte bituminosas, con intercalaciones epiclásticas y niveles evaporíticos superiores.</p> <p><b>J11m</b> Secuencias sedimentarias marinas litorales o de plataforma: calizas, areniscas calcáreas, lutitas, conglomerados y areniscas con intercalaciones volcanoclasticas y lávicas: basaltos almohadillados.</p>		<p><b>J3i</b> Secuencias volcánicas continentales y marinas: lavas y aglomerados basálticos a andesíticos, tobas riolíticas, con intercalaciones de areniscas, calizas marinas y conglomerados continentales.</p>	<p><b>J1g</b> Dioritas, gabros y monzodioritas de piroxeno, dioritas cuarcíferas y granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita.</p>	
	<p><b>Tr1m</b> Secuencias sedimentarias marinas y transicionales: areniscas, conglomerados, limolitas y calizas.</p>				
PALEozoico				<p><b>CPg</b> Granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, de hornblenda y biotita, localmente de muscovita.</p>	<p><b>P24a</b> Esquistos muscovíticos y metabasitas, metachert y serpentinitas con metamorfismo de alto gradiente P/T (Serie Occidental) y metamorfismo del Carbonífero temprano.</p> <p><b>P24b</b> Pizarras, filitas y metaareniscas con metamorfismo de bajo gradiente P/T (Serie Oriental) del Carbonífero temprano.</p>

Figura 4: Unidades geológicas del área sur de la Región de O'Higgins. Elaboración propia con base en SERNAGEOMIN (2003).

## ***Estructuras***

Charrier (1983) plantea que la Cordillera Andina se compone de diferentes pisos estructurales. El nivel superior es el primer piso estructural que data una edad Plioceno superior–reciente y contempla depósitos de volcanismo joven y material no consolidado. El segundo piso estructural corresponde a la formación Farellones, que se caracteriza por la presencia de fallas y pliegues suaves con flancos que presentan una inclinación de 15 a 20°, amplitudes de 500 m y longitudes de onda hasta los 7000–8000 m. El tercer piso corresponde a la formación Coya–Machalí, que se diferencia por la presencia de fallas y pliegues inclinados que vergen hacia el oeste con una amplitud de 1500 m y longitud de onda hasta los 3600 m. El último piso se compone de depósitos que datan una edad Jurásico superior–Cretácico medio, los que poseen una intensa deformación que se evidencia por la presencia de pliegues sinclinales concéntricos volcados.

Por otra parte, las estructuras más importantes presentes en la región son el sistema de fallas inverso Las Leñas– Espinoza (denominado “El Diablo” hacia el norte y “El Fierro” hacia el sur”), el que posee una vergencia hacia el este y una extensión de 300 km; el sistema de fallas San Ramón–Pocuro, que se caracteriza por un mecanismo inverso y vergencia hacia el oeste, y el sistema Los Ángeles–Infiernillo, que posee un mecanismo normal (Farías et al., 2010). Se presentan de este a oeste en la Figura 5:

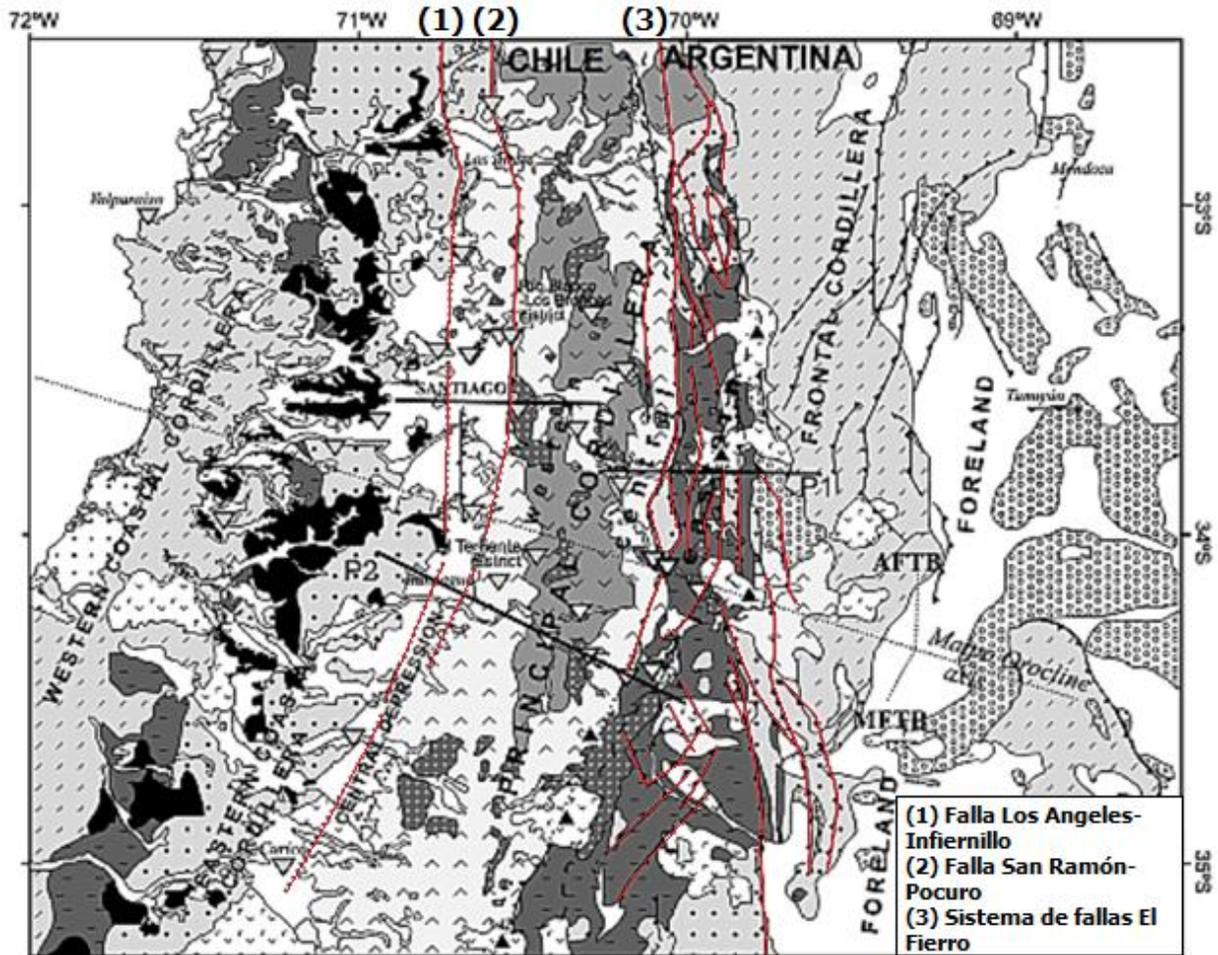


Figura 5: Mapa Geológico simplificado de los Andes centrales. Se presentan las principales fallas de la región de O'Higgins (33,85°–35°S). Extraído de Farías et al. (2010)

Hacia la costa se emplaza el sistema de fallas Pichilemu–Vichuquén, el que corresponde a una serie de fallas inversas con dirección NS a NNE–SSE, emplazadas en el complejo metamórfico Pichilemu. También, se presenta la falla Topocalma (Figura 6), que corresponde a una serie de estructuras con orientación NW y de cinemática normal (Farías et al., 2011).

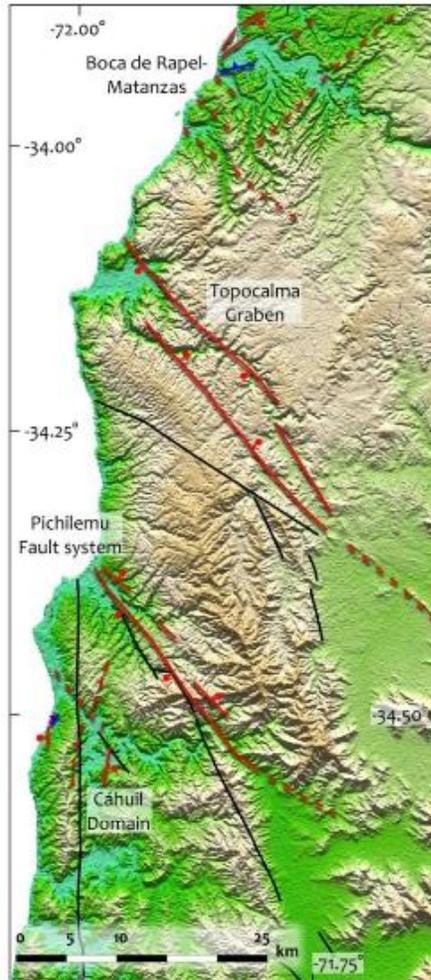


Figura 6: Se presentan las estructuras de la zona costera: las líneas rojas son fallas normales y las líneas negras son fallas del mapa geológico de Chile 1:1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2003).

(Aron et al. (2012), como se citó en Palape (2014))

## Marco Geodinámico

La Cordillera Andina de Chile Central es la consecuencia del régimen tectónico característico del país: dominado por un margen convergente, en donde subducta la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana a una velocidad relativa actual de 8–10 (cm/año) y en dirección N78°E (Pardo-Casas y Molnar, 1987). El proceso de subducción se asocia a la actividad tectónica y magmática, cuya actividad data desde el Jurásico hasta el presente (Charrier et al., 2007) y varía de forma latitudinal a lo largo del país en función de ángulo de subducción. En este sentido, se presenta una zona de transición entre los 33°–34°S que diferencia el segmento de subducción subhorizontal hacia el norte, el cual se asocia a un rumbo NS de las estructuras con una ausencia de volcanismo, del segmento de subducción normal hacia el sur, en donde el arco volcánico aparece y las estructuras regionales junto con el margen continental se disponen con orientaciones NNE–SSW (Farías et al., 2008) (Figura 7).

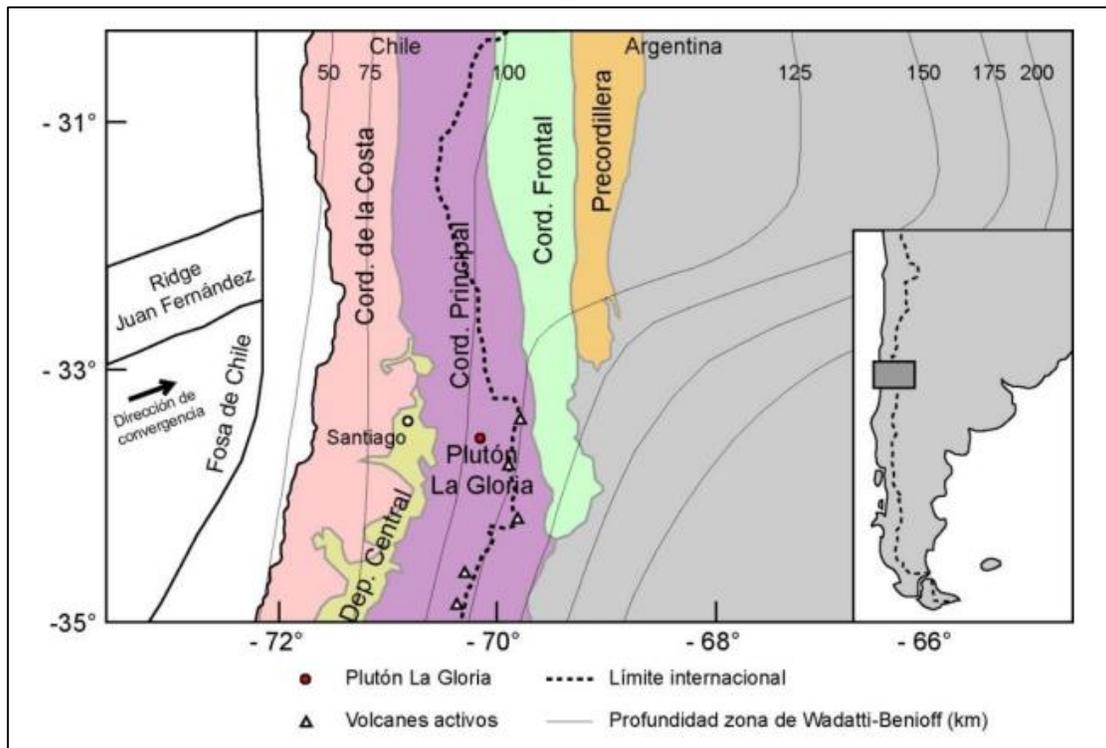


Figura 7: Mapa de los principales rasgos morfotectónicos de Chile central (Farías et al., 2008; Giambiagi, 2003). Los contornos representan la profundidad de la zona de Wadati-Benioff (en km).

## Marco Climático

En la región de O'Higgins predomina el clima mediterráneo con variaciones longitudinales debido a la topografía. Por un lado, la zona costera se caracteriza por presentar una alta nubosidad con precipitaciones que oscilan entre 500 y 1000 mm anuales concentrados mayormente entre los meses comprendidos desde mayo a agosto y por una amplitud térmica máxima de 7°C. El clima en la depresión intermedia posee características similares, sin embargo, la precipitación varía latitudinalmente, aumentando desde norte a sur, mientras que la amplitud térmica anual supera los 13°C. Dentro de las zonas cordilleranas se establece un clima templado con una estación seca de 4-5 meses que se caracteriza por precipitaciones cercanas a los 2000 mm sobre los 3500 m de altitud, y por valores cercanos a 0°C de temperatura promedio durante la época invernal (Alvarado y Moya, 2007)

### *Cambio climático y Mega sequía*

Chile Central (30-38°S) está siendo afectada por una Megasequía desde el 2010, una de las consecuencias del cambio climático que ha provocado efectos perjudiciales en la disponibilidad de agua, en la vegetación y en los incendios forestales (Garreaud et al., 2017). Esta secuencia de años secos se caracteriza por déficits anuales de lluvia que oscilan entre el 25 y el 45%, lo que ha producido la disminución de la capa de nieve andina y con ello una disminución de hasta el 90% del caudal de los ríos (Garreaud et al., 2017). Por otra parte, ha aumentado la altitud de la isoterma 0°C (H0), en este sentido, Garreaud et al. (2020) plantea que los valores infrecuentes de H0, que actualmente ocurren el 5% del tiempo, en un futuro serán más frecuentes abordando cerca del 25% de los días de lluvia para el final del siglo (bajo un escenario desfavorable RCP 8.5<sup>1</sup>). Esto es de suma importancia, debido a que un evento de lluvia que actualmente se considera intenso, será más frecuente en el futuro y podría generar un aumento

---

<sup>1</sup> Escenario pesimista que considera un incremento de emisiones de GEI (Gases de efecto invernadero) a lo largo del tiempo, es decir, sin acciones de mitigación (FUNO, 2020)

peligroso de los caudales, y, en consecuencia, importantes remociones en masa en la Región de O'Higgins.

### ***Tormenta estival del 2021 en Chile Central***

Durante la época estival, los eventos de precipitación son muy infrecuentes en Chile central. Principalmente, estos eventos ocurren en días donde el flujo de aire sopla desde el este y transporta humedad desde Argentina, lo que favorece la generación de tormentas en la Cordillera Principal. Estas tormentas de tipo convectivas son altamente peligrosas, puesto que se caracterizan por ser precipitaciones de alta intensidad que pueden ocurrir hasta 5 km de altura, ocasionando aluviones, crecidas súbitas y mayor turbiedad en los ríos cordilleranos (Garreaud et al., 2021)

Por otro lado, una causa importante de las precipitaciones invernales es el arribo de un sistema frontal frío junto a un Río atmosférico (RA) a las costas de Chile. Los RA son filamentos delgados con orientación NW-SE de alta humedad y fuertes vientos que transportan altas cantidades de vapor de agua desde los trópicos, en donde se originan, hacia latitudes medias o altas. El vapor asciende por sobre las cordilleras de la Costa y de los Andes, por lo que se enfría, condensa y precipita (Garreaud, 2019). Se caracterizan también por valores de H0 alrededor de los 2,3 km de altura, en donde la precipitación sólida sobre este nivel forma el manto de nieve en la cordillera principal (Garreaud et al., 2021)

La tormenta ocurrida durante enero del 2021 fue bajo condiciones diferentes a las mencionadas anteriormente. Se originó a partir de un Río atmosférico zonal (RAZ), el cual se caracteriza por presentarse como una banda de orientación E-O que arribó de forma casi perpendicular a la cordillera de los Andes. Este fenómeno es muy inusual, incluso en invierno (uno o dos por año), sin embargo, conllevan una amenaza significativa, ya que las precipitaciones ocurren con temperaturas elevadas, delante de un frente estacionario, lo que mantiene un valor alto de H0 aumentando el área pluvial en la cordillera. El fenómeno se caracterizó por un valor de H0 igual a 3700 msnm. Cabe mencionar, que, de acuerdo a la cantidad de vapor de agua transportada, el RAZ califico como moderado (Garreaud et al., 2021).

La llegada del RAZ a Chile central resultó en numerosos impactos a la población. En particular, las comunas más afectadas en la región de O'Higgins fueron Las Cabras, Coinco, Malloa, Quinta de Tilcoco y San Vicente (Figura 8).



Figura 8: Mapa de Chile central con las principales afectaciones producto de la tormenta de fines de enero 2021 (Oficina Nacional de Emergencia (2021), Dirección de Vialidad, MOP (2021) y FEDEFruta (2021), como se citó en Garreaud et al. (2021))

## Remociones en Masa

Las remociones en masa pueden ser clasificadas según el tipo de mecanismo y material que es desplazado, en este sentido, la clasificación de Hungr et al. (2014) es una opción sencilla de utilizar y que compatibiliza con la terminología geológica y geotécnica de los materiales que se utiliza actualmente, además de ser la modificación al reconocido sistema de clasificación desarrollado por Varnes (1978). Por ello y con la finalidad de homologar el catastro puntual, se consideran un subconjunto de tales remociones (tabla 1) y se presentan las definiciones de cada una de ellas:

- Caída de Roca: Corresponde a un desprendimiento, caída, rodadura y rebote de fragmentos de roca que poseen un volumen limitado y se desplazan individualmente o en grupo, interactuando mayormente con el camino y en menor medida entre ellos.
- Deslizamiento rotacional de Roca: Se define como un deslizamiento lento/moderadamente lento de una masa rocosa débil sobre una superficie de falla cóncava. Morfológicamente se caracteriza por un escarpe y por poseer una deformación interna limitada.
- Deslizamiento planar de Roca: Se define como un deslizamiento de una masa rocosa sobre una superficie plana de rotura. Se caracteriza por una escasa o nula deformación interna y suele ser un movimiento rápido, a excepción en rocas muy débiles o en planos de discontinuidad poco inclinados.
- Deslizamiento de Detritos: Se define como un deslizamiento de una masa que se desplaza en una superficie poco profunda y plana, paralela al suelo, de material granular, el cual puede ser suelo meteorizado, depósitos piroclásticos o una capa de coluvión, que cubre un sustrato más resistente.

- **Deslizamiento Irregular de Roca:** Se define como un deslizamiento de material rocoso sobre una superficie de rotura irregular, es decir, que está formada por fracturas sin una orientación preferente y con poca persistencia, separadas por segmentos de roca intacta. Se caracteriza por generarse en rocas fuertes y por ser un proceso generalmente rápido y repentino.
- **Propagación de Licuefacción:** Se define como una propagación lateral provocado por una licuefacción espontánea o sísmica. Se caracteriza por ser un proceso extremadamente rápido, cuyo material licuable solo corresponde a una pequeña parte del volumen inestable.
- **Flujo de Detritos:** Se define como un flujo de detritos saturado que se desplaza a lo largo de una quebrada, por lo que posee una trayectoria determinada. Suele ser un proceso rápido a extremadamente rápido, que va erosionando y arrastrando material a medida que avanza ladera abajo.
- **Avalancha de Detritos:** Se define como un flujo rápido a extremadamente rápido de detritos sobre una pendiente importante sin una trayectoria determinada. Se caracteriza por ser un material parcial o totalmente saturado y por su poca profundidad.

Es preciso señalar que dichas remociones pueden originarse a partir de otras, como es el caso de los flujos, que pueden iniciarse por un deslizamiento, una avalancha o una caída de rocas. Esto enfatiza la importancia de considerar tales remociones por su influencia en la generación de los flujos de detritos. En la figura 9 se ilustran algunas remociones según el tipo de movimiento.

Tabla 1: Remociones en masa según la Clasificación de Hungr et al. (2014). Se destaca en azul aquellas consideradas en este estudio.

Tipo de movimiento	Roca	Suelo
Caída	Caída de Roca	Caída de bloques/detritos
Volcamiento	Volcamiento de bloques de roca	Volcamiento de grava/arena/limo
	Volcamiento flexural de roca	
Deslizamiento	Deslizamiento rotacional de roca	Deslizamiento rotacional de arcilla/limo
	Deslizamiento planar de roca	Deslizamiento planar de arcilla/limo
	Deslizamiento en cuña de roca	Deslizamiento de grava/arena/detritos
	Deslizamiento compuesto de roca	Deslizamiento compuesto de arcilla/limo
	Deslizamiento Irregular de roca	
Extensión	Extensión de ladera de roca	Licuefacción extensional de arena/limo
		Extensión en arcilla sensible
Flujo	Avalancha de rocas/hielo	Flujo seco de arena/limo/detritos
		Tobogán de arena/limo/detritos
		Tobogán de arcilla sensible
		Flujo de detritos
		Flujo de lodo
		Inundación de detritos
		Avalancha de detritos
		Flujo de tierra
Flujo de turba		
Deformación de laderas	Deformación de laderas en montaña	Deformación de suelo en laderas
	Deformación de laderas rocosas	Reptación de suelo
		Soliflucción

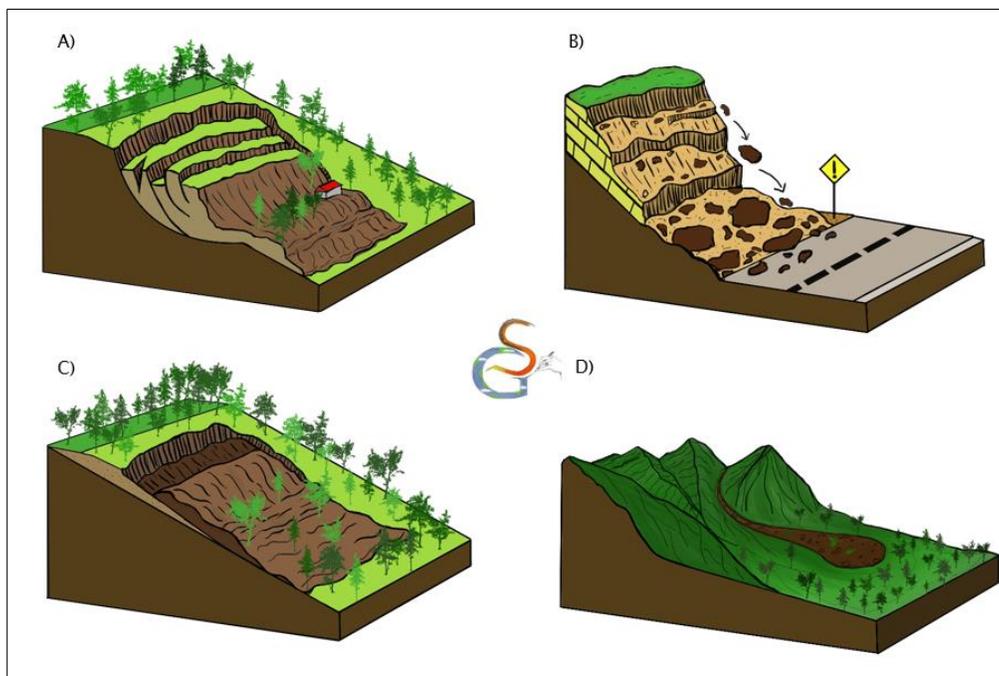


Figura 9: Remociones en masa según tipo de movimiento. A) Deslizamiento Rotacional. B) Caída de Bloques. C) Deslizamiento Traslacional. D) Flujos. (Valenzuela y Pino, 2022)

## Marco metodológico

El procedimiento a seguir se divide en las siguientes etapas y se basa en la metodología descrita en Alfaro et al. (2018):

### 1. Generación de un Mapa Geológico unificado de la zona sur de la Región de O'Higgins

**1.1. Reunir información geológica.** Primeramente, se recopiló información referente a la zona de estudio, en este sentido, los insumos disponibles son los siguientes, cuyas áreas abordadas por cada uno se ilustra en la figura 10:

- Carta geológica del Área San Fernando–Curico, escala 1:100.000 (Contreras y Schilling, 2012)
- Carta geológica del Área de Rancagua–San Vicente de Tagua Tagua, escala 1:100.000 (Godoy et al., 2009)
- Avance Geológico de las hojas Rancagua–Curico, Talca–Linares, Chanco y Concepción–Chillán, escala 1:250.000 (Escobar et al., 1977)
- Mapa geológico de Chile, escala 1:1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2003)

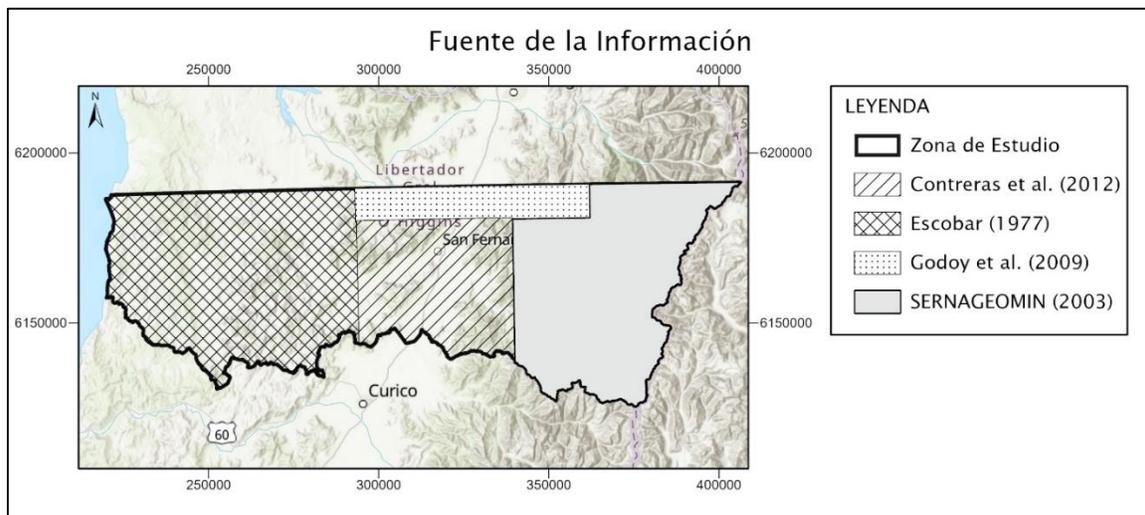


Figura 10: Fuentes de Información geológica y su extensión en la zona de estudio.

**1.2. Agrupar litologías.** Para cada carta geológica, se agrupó su litología en base al tipo de material y a edad, según el trabajo de Serey et al. (2019), con la finalidad de simplificar la abundante información geológica y para facilitar el entendimiento de otras entidades. En base a esto, se simplificó a las siguientes unidades geológicas, cuyo detalle de las litologías contempladas por cada una se observa en la Tabla 2.

- Depósitos Cuaternarios
- Rocas Volcánicas y Volcanosedimentarias del Paleógeno–Neógeno
- Rocas Intrusivas del Cenozoico
- Rocas Sedimentarias del Cenozoico
- Rocas Volcanosedimentarias del Mesozoico
- Rocas Sedimentarias del Mesozoico
- Rocas Intrusivas del Mesozoico
- Rocas Intrusivas del Paleozoico
- Rocas Metamórficas del Paleozoico

Cabe mencionar que se realizaron modificaciones en la zona que abarca la carta geológica de Escobar et al. (1977) debido a la antigüedad del documento, el cual posee algunos errores con respecto a la edad geológica de algunos materiales, de modo que se reasignó la categoría de algunas unidades a partir de la extrapolación de las cartas con mayor detalle y de la comparación con el Mapa Geológico de Chile. En particular, las unidades volcanosedimentaria “Tf” e intrusiva “Kgd”, inicialmente definidas con edades Paleogeno–Neogeno y Cenozoico, respectivamente, se reasignaron a una edad Mesozoica.

Tabla 2: Litologías referentes a cada fuente de información con su respectiva unidad geológica.

Categoría	Litología	Fuente
Depósito Cuaternario	Hf, Hrm, Pl-Hq, PIHf, PIHa, PIHav, PIHfdt, PIHrm, Plavpt, Pltr, Plisb	Contreras et al (2012)
	Q, Qcv, Qe, Qva, Qpv, Qdg	Escobar et al (1977)
	Q1, Q3av, PI3	SERNAGEOMIN (2002)
	Hc, Hf, PIHa, PIHav, PIHl, PIHq, PIHf, PIHg, PIHrm.	Godoy et al (2009)
Roca Volcánica y volcanosedimentaria del Paleógeno-Neógeno	OIMa	Contreras et al (2012)
	Tcz, Tcf, Kcm, Ka, Kpy	Escobar et al (1977)
	OM2c, PPI3, M3i	SERNAGEOMIN (2002)
	Ksdl, Ema, Mf	Godoy et al (2009)
Roca Intrusiva del Cenozoico	Mgc, Mhcv	Contreras et al (2012)
	Mimg, Mg, Msg, Msh	SERNAGEOMIN (2002)
	Mgh	Godoy et al (2009)
Roca Volcanosedimentaria del Mesozoico	Kilc, Jkilp	Contreras et al (2012)
	Kl, Jcm, Tf	Escobar et al (1977)
	Kilc, Jkilp	Godoy et al (2009)
Roca Sedimentaria del Mesozoico	Ksm, Jim, Tr, Kc, Kbf, Jrd	Escobar et al (1977)
	Jk1m, Js1m, Js1c, Kia1c	SERNAGEOMIN (2002)
Roca Intrusiva del Mesozoico	Ksh, Ksl, Ksca, JKhm	Contreras et al (2012)
	Mg, Kgd	Escobar et al (1977)
	Ksgca	Godoy et al (2009)
Roca Intrusiva del Paleozoico	Bg	Escobar et al (1977)
Roca Metamórfica del Paleozoico	Bm	Escobar et al (1977)

## 2. Densidad de drenaje y Factor de Melton:

**2.1. Determinar Red de drenaje y Microcuencas (Orden 7).** De acuerdo a la metodología propuesta por Alfaro et al. (2018), se utilizó el procedimiento de Agua y SIG (2018), el que plantea el uso del Módulo “Hidrology” del software ArcGIS, metodología que se sistematizó mediante la herramienta “Model Builder” de dicho programa. En la figura 11 se observa el modelo realizado, en donde se ingresó un Modelo digital de elevación (DEM) como única entrada, el cual se descargó desde la plataforma web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y corresponde a un DEM SRTM de resolución igual a 30 m.

Para la obtención de una red de drenaje hasta orden 7 según el método de Strahler (1957) (Figura 12), el número de pixel (Figura 11) se dejó como parámetro de entrada en la “Calculadora Ráster” con la finalidad de probar diferentes valores hasta alcanzar el orden 7 para toda la región de O’Higgins. En este sentido, se escogió un número de pixel relativamente bajo (5000) al compararlo con lo que propone la metodología (20000), lo cual permitió que el proceso considerara ríos de menor tamaño, y, por ende, un mayor número de drenes, cuencas, y que se alcancen ordenes mayores.

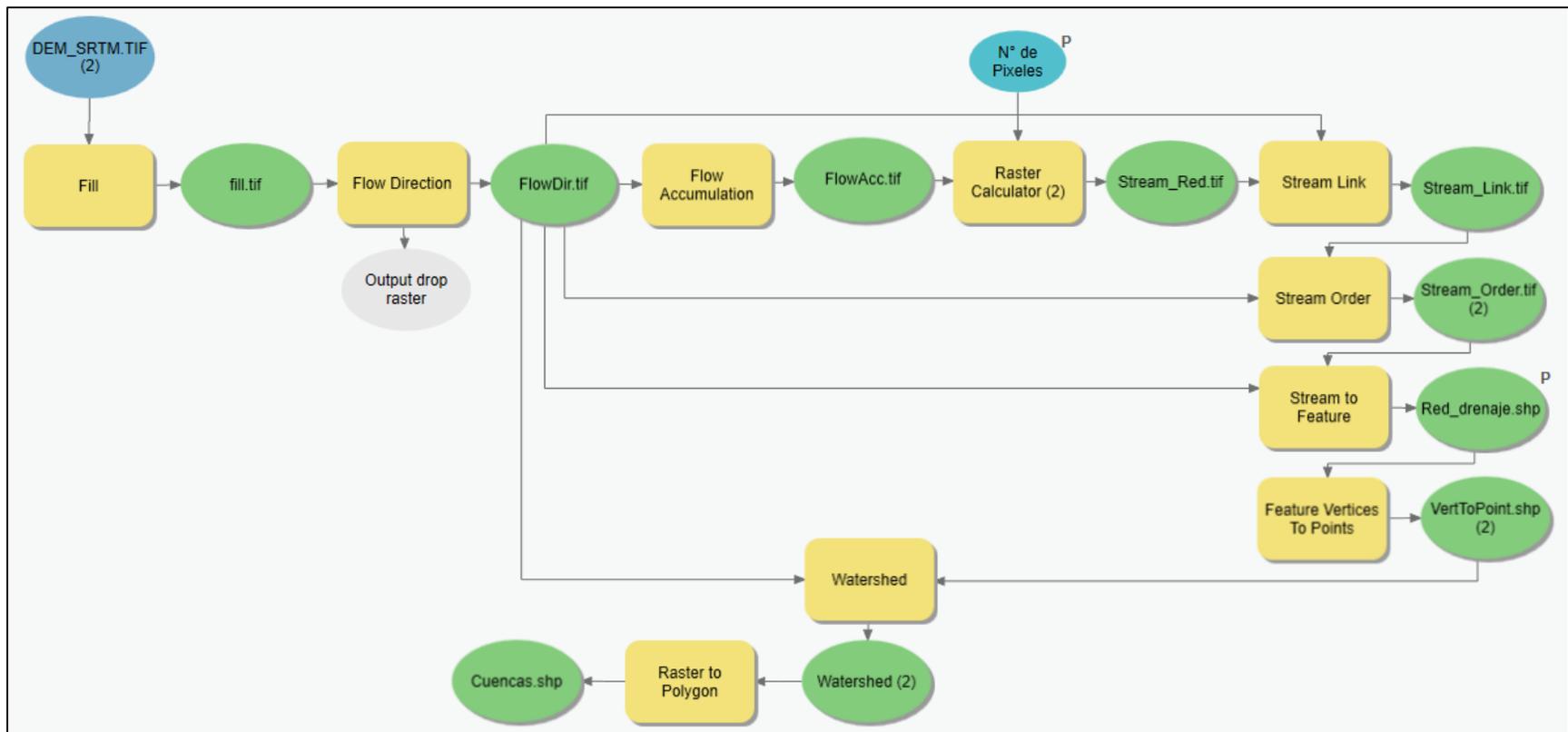


Figura 11: Modelo utilizado para la obtención de Red Hídrica y Microcuencas. Basado en Alfaro et al. (2018).

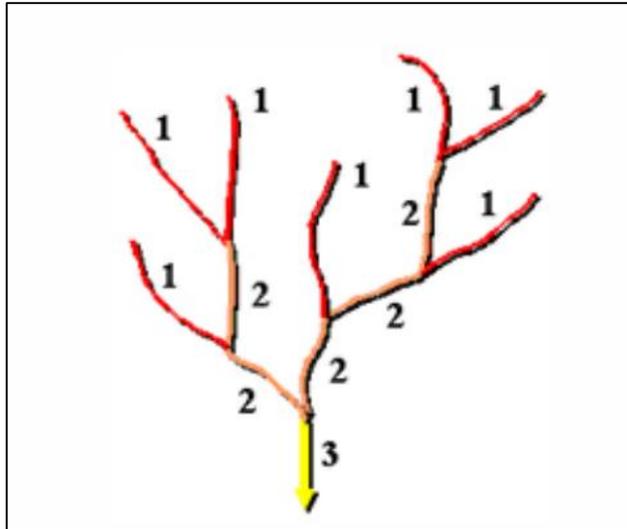


Figura 12: Jerarquías de drenaje según Strahler (1957). Obtenido de ESRI (2018)

**2.2 Revisión de coberturas.** Se utilizó la topografía e imágenes satelitales con la finalidad de corregir posibles errores de la capa de drenes y de la capa de microcuencas; En este aspecto, se revisó las líneas divisorias de aguas (Figuras 13 y 14), el trazado de los drenes y se ajustó la extensión de las coberturas en la zona costera, además, se corroboró que el orden de drenaje fuera el correcto según la metodología de Strahler (1957). Posteriormente, se aplicó la herramienta "Smooth" con la finalidad de otorgarle a las capas una apariencia más natural (Figuras 15 y 16). Finalmente, se revisó nuevamente, poniendo énfasis en los drenes y en que estos se encontraran contenidos dentro de las cuencas correspondientes.

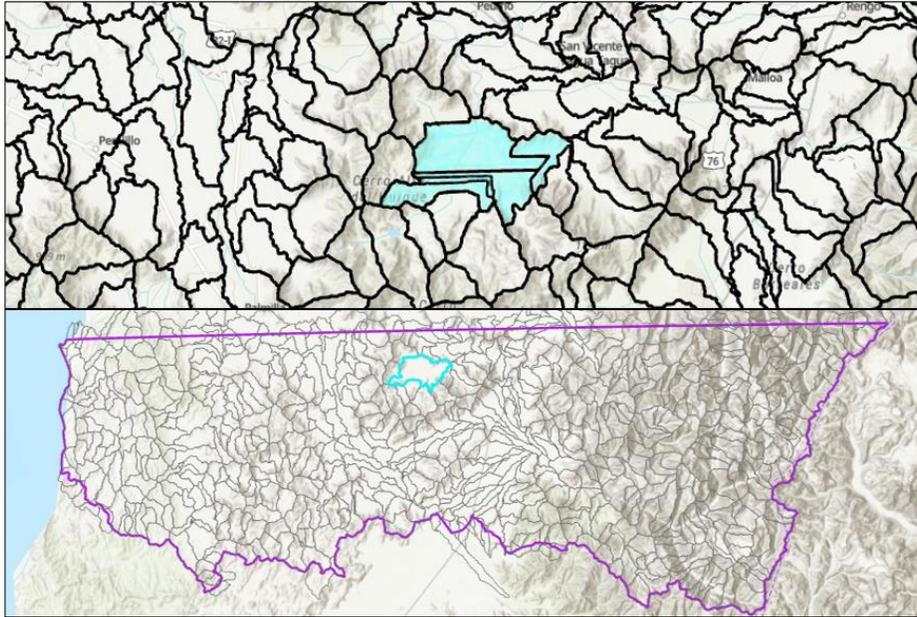


Figura 13: Corrección de errores en cuencas destacadas. En la figura superior se presenta el resultado automático arrojado por Model Builder, mientras que en la figura inferior se muestra el ajuste realizado de forma manual.

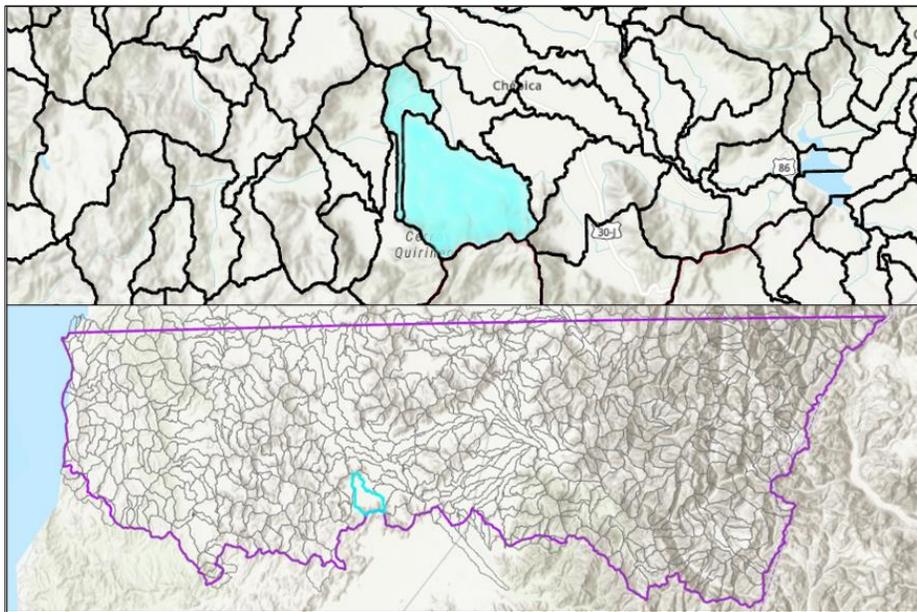


Figura 14: Corrección de errores en cuencas destacadas. En la figura superior se presenta el resultado automático arrojado por Model Builder, mientras que en la figura inferior se muestra el ajuste realizado de forma manual.

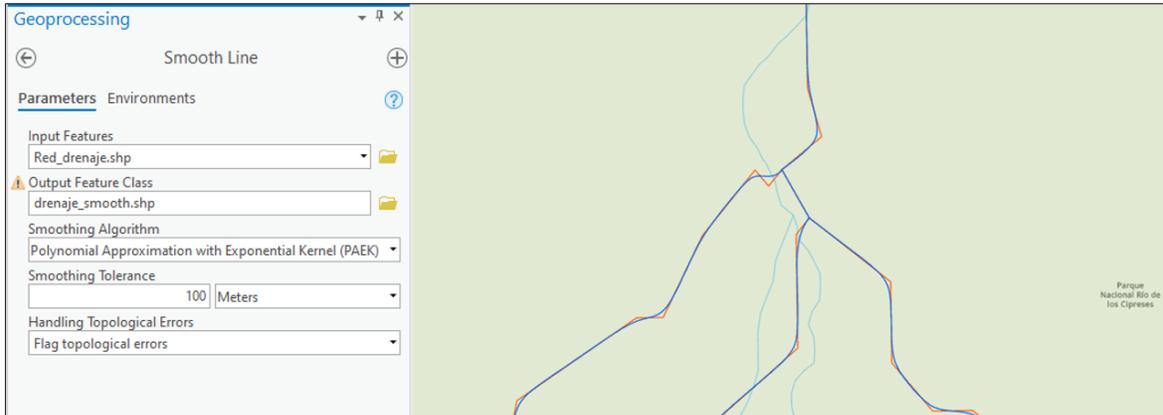


Figura 15: Suavizado de drenes. A la derecha se presenta la herramienta utilizada y los parámetros escogidos, mientras que a la izquierda se muestra el contraste entre la cobertura anterior al suavizado (línea naranja) y la cobertura posterior (línea azul).

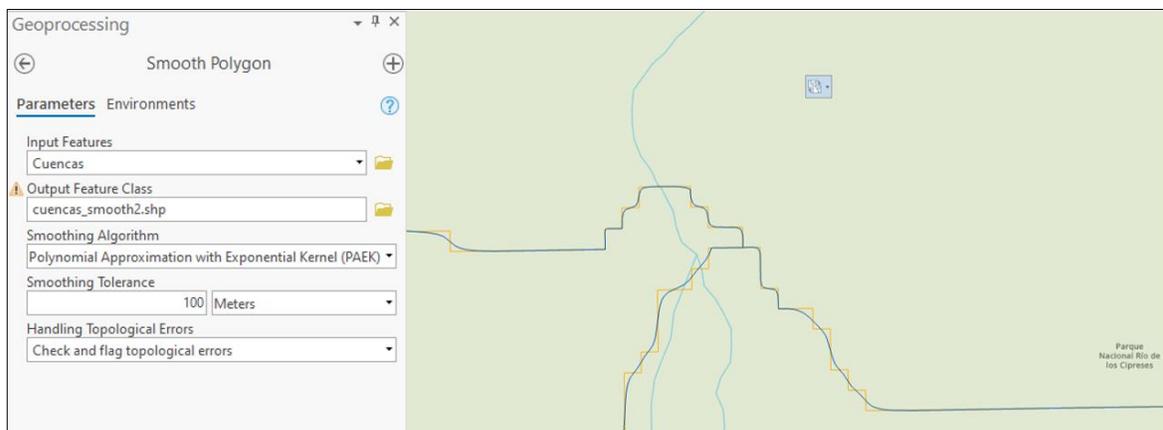


Figura 16: Suavizado de cuencas. A la derecha se presenta la herramienta utilizada y los parámetros escogidos, mientras que a la izquierda se muestra el contraste entre la situación anterior (línea naranja) y la situación posterior al suavizado (línea azul).

**2.3. Densidad de drenaje (Dd).** Es la relación entre la sumatoria del largo de todos los cursos de agua presentes en una cuenca y su área total (Ecuación 1).

$$Dd = \frac{Lt}{A} \quad (\text{Ecuación 1})$$

En donde, Lt corresponde a la longitud total de los cursos de agua en km y A es el área total de la cuenca en km<sup>2</sup>.

Junco (2004, como se citó en Camino et al. (2018)) indica que “Es el parámetro que cuantifica el grado de desarrollo de un sistema hidrográfico y permite conocer su complejidad”, en otras palabras, es la capacidad de una cuenca para evacuar el agua que se transporta en su superficie. Este parámetro se asocia a diferentes factores, tales como la litología, la permeabilidad, la capacidad de infiltración y el uso de suelo (Henríquez, 2019), como también al fracturamiento de la roca, aumentando la susceptibilidad a la generación de las remociones en masa con un mayor fracturamiento (Molina, 2016).

Tabla 3: Clasificación de la red de drenaje según la densidad de drenaje. Tomado de Camino et al. (2018).

Fuente: Junco (2004)		Fuente: Delgadillo y Páez (2008)	
Rango	Clase	Rango	Clase
0.1–1.8	Baja	<1.0	Baja
1.9–3.6	Moderada	1.0–2.0	Moderada
3.7–5.6	Alta	2.0–3.0	Alta
		>3.0	Muy Alta

Para el cálculo de este parámetro, inicialmente, se extrajo el área geodésica para la capa de cuencas y la longitud geodésica para la capa de drenaje a partir de la herramienta “Calcular Geometría”, disponible en la tabla de atributos de capa shape. Por otro lado, mediante “Resumir Dentro” presente en “Herramientas de análisis”, se obtuvo la sumatoria de la longitud de todos los cursos de agua dentro de una cuenca (Figura 17). Ya con ambos factores fue posible obtener la densidad de drenaje a través de la herramienta “Calcular campo” de la tabla de atributos. Finalmente, los valores de densidad de drenaje se clasificaron según el método de “Desviación estándar”.

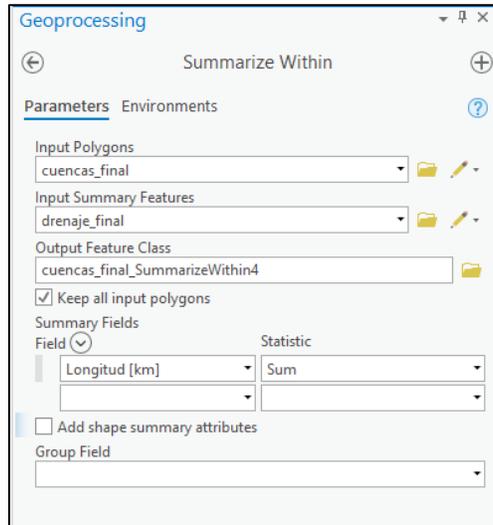


Figura 17: Herramienta principal para el cálculo de la densidad de drenaje en ArcGIS Pro. La clase de entidad de salida contiene las estadísticas calculadas.

**2.4. Factor de Melton (FM).** Este parámetro fue definido por Melton (1957) y corresponde a la relación entre el relieve y la raíz cuadrada del área de la cuenca, e indica la capacidad de esta para generar flujos. Según Bovis y Jakob (1999) es una aproximación al valor de rugosidad de una subcuenca y señalan que aquellas más disectadas o con un mayor valor de factor de Melton son más propensas a producir flujos de detritos durante eventos climáticos extremos. Su ecuación es:

$$FM = \frac{H_{m\acute{a}x} - H_{m\acute{i}n}}{\sqrt{A}} \quad (\text{Ecuaci3n 2})$$

En donde,  $H_{m\acute{a}x}$  y  $H_{m\acute{i}n}$  son la altura máxima y la altura mínima de la cuenca en metros, respectivamente, mientras que  $A$  es el área de la cuenca en metros.

Para su obtenci3n, se utiliz3 la herramienta "Estadísticas zonales por tabla" que a partir del DEM permite obtener las estadísticas necesarias para la f3rmula (Figura 18). Finalmente, los valores se clasificaron según el m3todo de "Rupturas naturales (Jenks)".

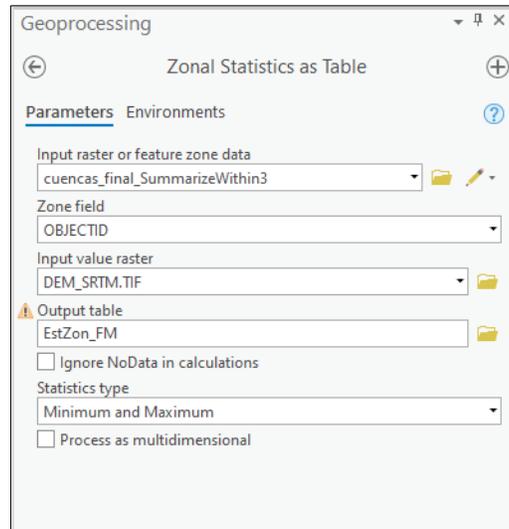


Figura 18: Herramienta para el cálculo del Factor de Melton.

### 3. Elaboración de un Mapa Geomorfológico

**3.1. Modelo Geomorfológico.** Para esta primera etapa se utilizó el software ENVI 5.3, el que necesita el modelo digital de elevación o DEM (Figura 19) como insumo de entrada. Inicialmente, se generaron variables fisiográficas a partir de la herramienta “Topographic Modeling” (Figura 20), tales como: Sombreado, pendiente medida en porcentaje, curvatura en perfil/planta/longitudinal/transversal, máxima curvatura y mínima curvatura.

Luego, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) mediante la herramienta “Forward PCA rotation new statistics” (Figura 21) con la finalidad de simplificar la complejidad de la información de las variables. Esta herramienta genera la matriz de covarianza de acuerdo al número de bandas seleccionado, que, en este caso, se dejó igual al número de variables fisiográficas. Finalmente, se clasificó las variables a través de la herramienta ISODATA, que corresponde a un proceso de clasificación no supervisada.

En la figura 22 se presentan los parámetros ingresados: número de clases entre 10 a 20, un valor mínimo de 5000 píxeles por clase y 5 iteraciones como máximo; y el modelo resultante con 11 clases.

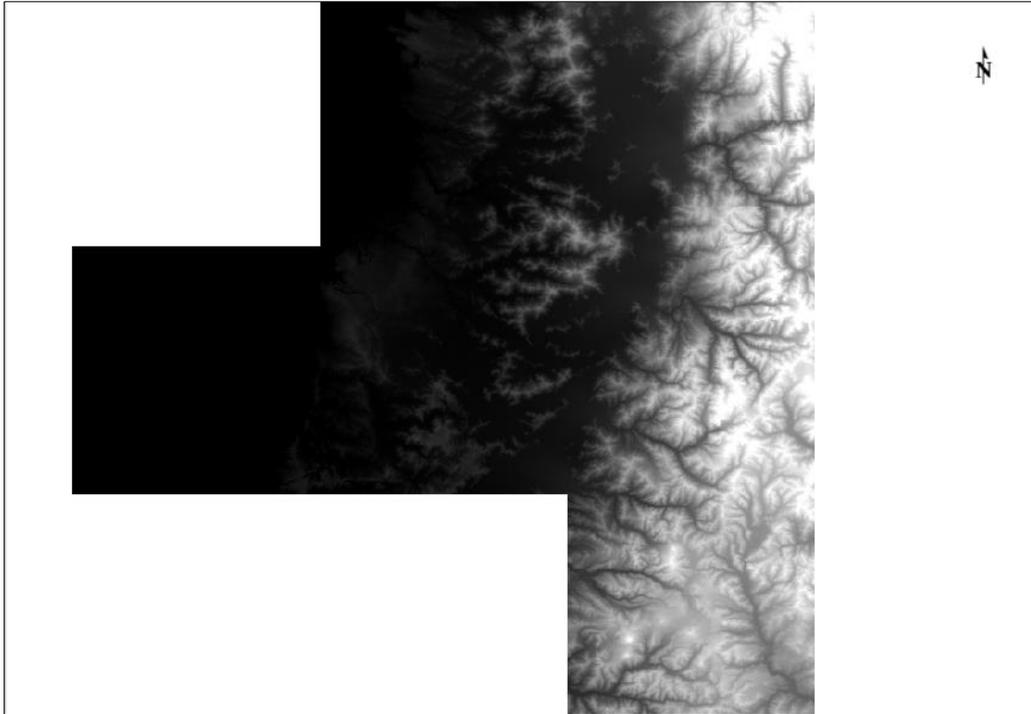


Figura 19: Modelo digital de elevación (DEM) SRTM, resolución de 30 m.

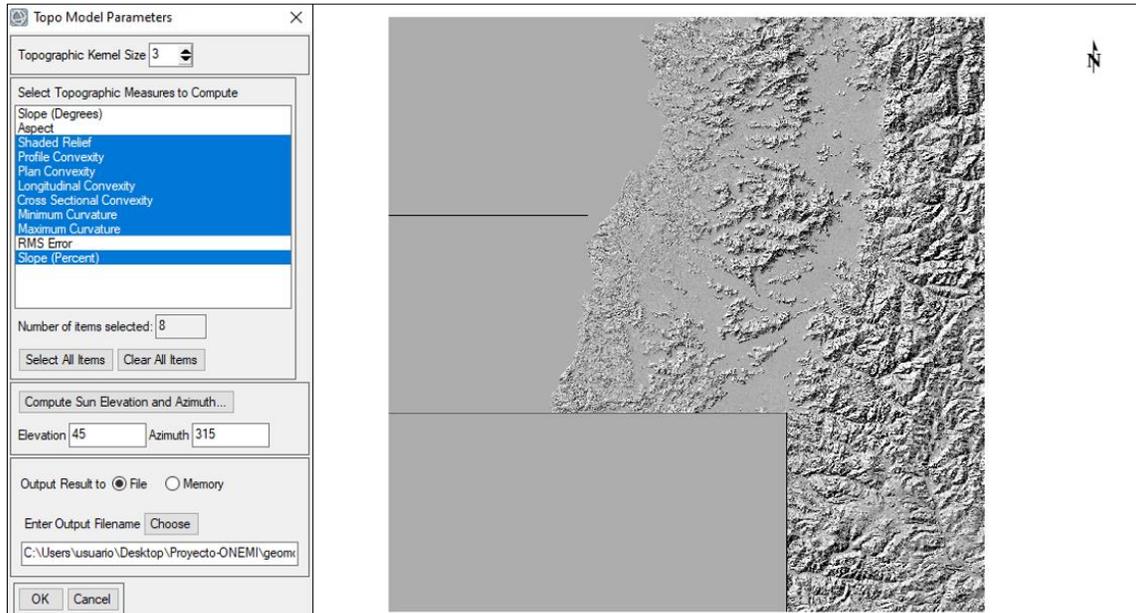


Figura 20: A la derecha se presenta la herramienta “Topographic Modeling” con las variables fisiográficas seleccionadas. A la izquierda se presenta el modelo de salida.



Figura 21: A la derecha se presenta la herramienta “Forward PCA rotation new statistics” y a la izquierda el Modelo topográfico con aplicación de Análisis de componentes principales (ACP).

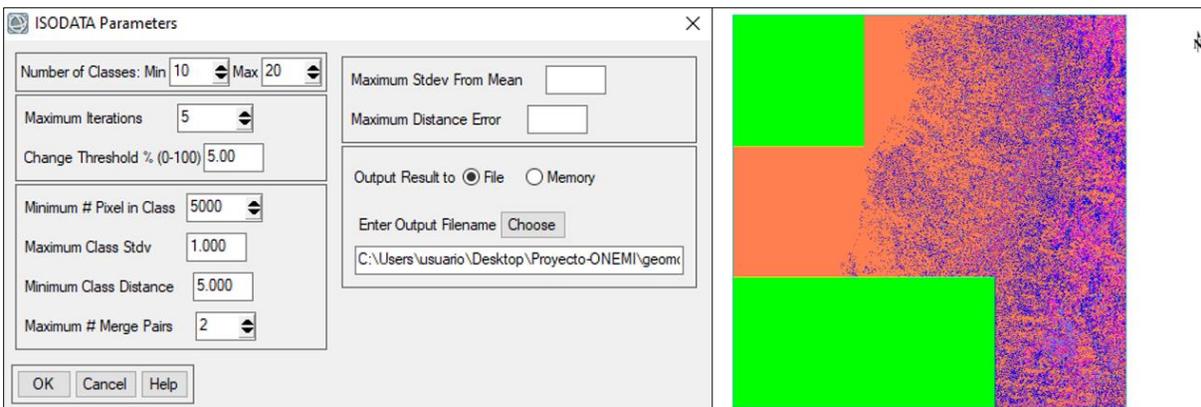


Figura 22: A la derecha se presenta la herramienta “ISODATA” con los parámetros ingresados. A la izquierda se presenta el Modelo Geomorfológico.

**3.2. Definición de Límites.** El siguiente paso es el suavizado y limpieza de la cobertura para facilitar la digitalización final de la entidad, para ello, se utilizó el software ArcGIS, en donde, se ingresó la capa en formato Tiff.

Primeramente, se agruparon las clases (Figura 22) identificando aquellas que poseen un comportamiento espacial similar, de esta forma, el modelo se simplifica y se facilita el reconocimiento de las unidades geomorfológicas; para esto, se utilizó la herramienta “Reclassify”, la que permite la reasignación de las clases. El resultado final se presentó como un nuevo ráster con 3 clases definidas (Figura 23).

Posteriormente, se comenzó a filtrar la imagen con el filtro “Majority Filter” para remplazar aquellos pixeles aislados o mal clasificados basados en las celdas vecinas contiguas (Figura 24). Luego, se aplicó la herramienta “Boundary Clean” (Figura 25) que permite definir mejor los bordes de las unidades. En este aspecto, se escogió como técnica de ordenamiento (Sort type) la opción “Descending”, la cual permite clasificar por tamaño y considera a las zonas más extensas como prioritarias para expandirse a zonas más pequeñas sin importar el valor del pixel, esto permitió simplificar la cobertura puesto que las áreas pequeñas desaparecen de la clasificación.

Posteriormente, se digitalizó las unidades mediante la generación de una cobertura tipo shape. En la figura 26 se presenta un diagrama que resume la metodología descrita.

Finalmente, se realizó un mapa de pendientes a partir del Modelo digital de elevación mediante la herramienta “Slope” del programa ArcGIS, y se calcularon las estadísticas zonales para las coberturas DEM y de pendiente, lo que permitió obtener información de altura y pendiente (máxima, mínima y media) para cada unidad.

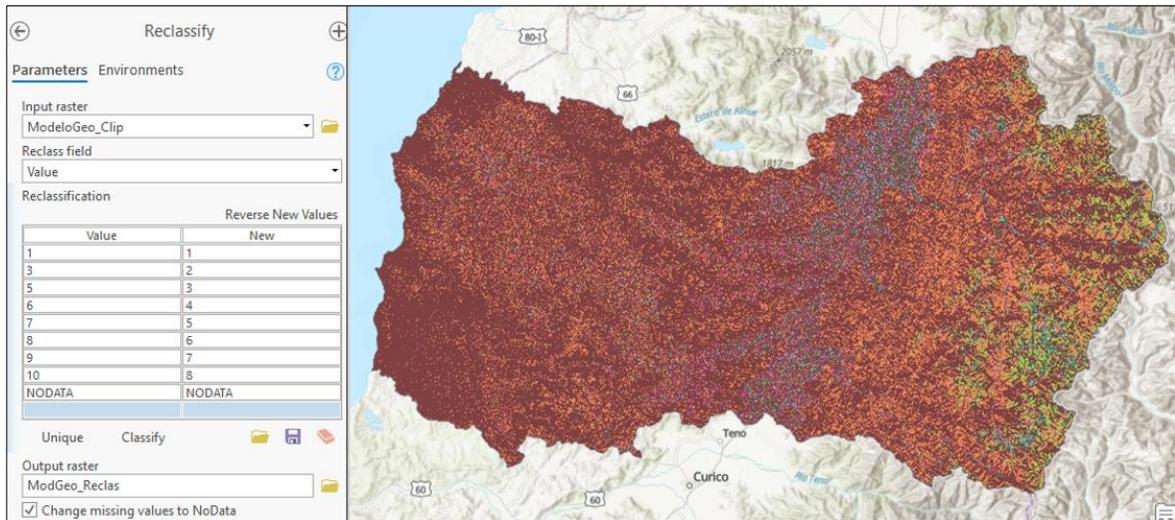


Figura 23: A la derecha se presenta la herramienta “Reclassify”. A la izquierda se muestra la cobertura ráster resultante con las clases reclasificadas.

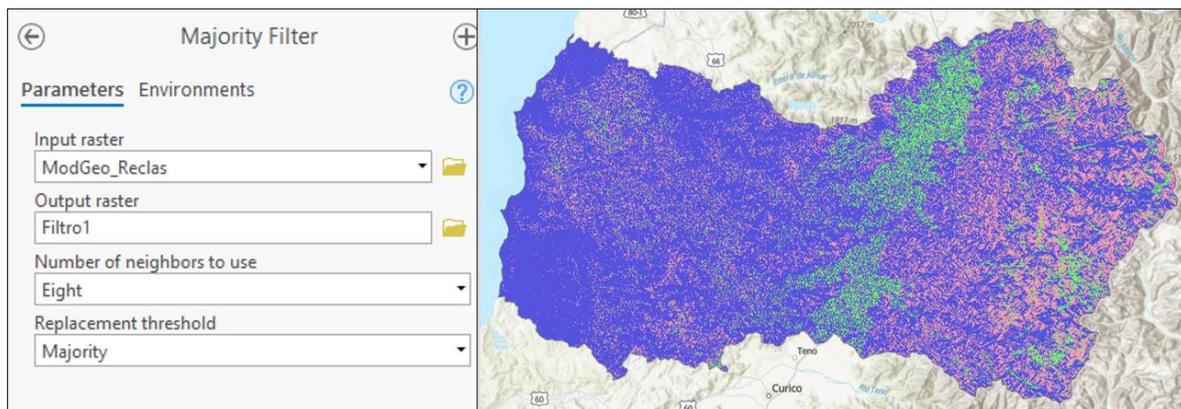


Figura 24: A la derecha se presenta el Filtro “Majority Filter” y los parámetros seleccionados. A la izquierda se presenta la cobertura ráster resultante “Filtro1”.

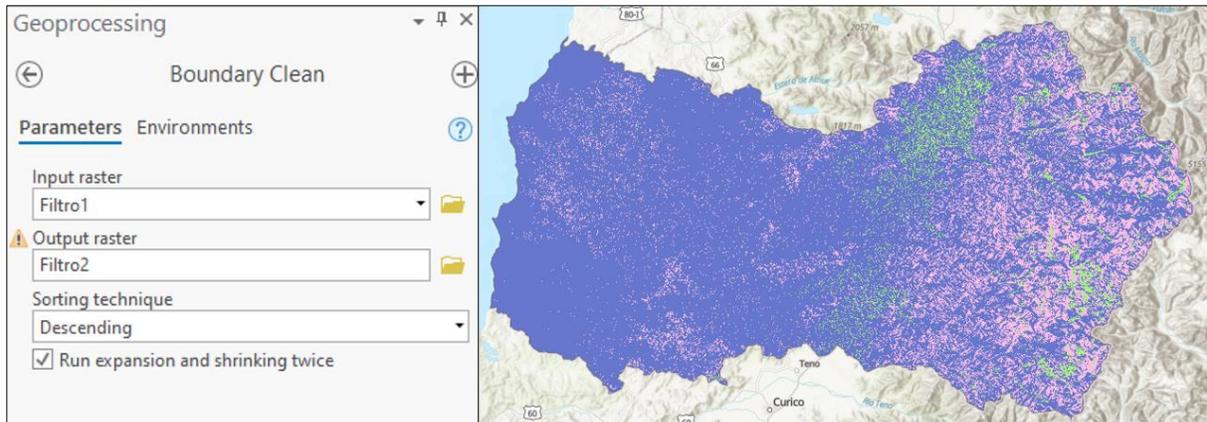


Figura 25: A la derecha se presenta la herramienta “Boundary Clean” y los parámetros seleccionados. A la izquierda se muestra la cobertura ráster resultante “Filtro 2”.

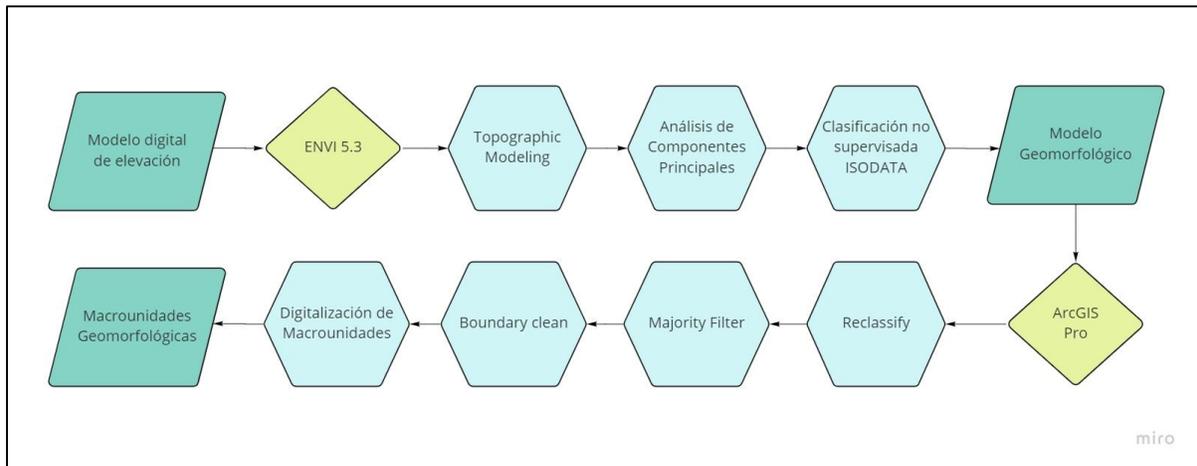


Figura 26: Metodología para realizar el mapa geomorfológico. Se utilizó ENVI 5.3 para la etapa inicial y ArcGIS Pro para finalizar.

#### **4. Catastro de eventos de Remociones en Masa georreferenciado y factor de Catastro**

**4.1. Búsqueda de información.** Inicialmente, se buscó información en las plataformas web del Servicio Nacional de Geología y Minería, en memorias y trabajos de investigación referentes a remociones en masa, tales como el inventario de remociones desencadenadas por el Terremoto del Maule del 2010 (Escobar, 2013), el inventario de remociones realizado por Serey et al. (2019) y el estudio de Romero et al. (2021) para la comuna de Malloa. Por otro lado, ONEMI dispuso información de Puntos Plan Invierno, los cuales son sectores identificados por las municipalidades como posibles zonas de ocurrencia de remociones, estos fueron revisados e identificados a través de imágenes satelitales mediante Google Earth con la finalidad de determinar si correspondían a eventos declarados, por ello, solo algunos de estos puntos fueron considerados. Con la finalidad principal de completar el catastro, se realizó un terreno los días 11 y 12 de noviembre gestionado por la Oficina Nacional de Emergencias (ONEMI) y la Universidad de O'Higgins, en donde se identificaron y recopilaron 5 puntos de remociones en masa dentro de la zona de estudio.

**4.2. Revisión y Homologación.** Cada evento se revisó para corroborar que no se repitieran debido a las diferentes fuentes de información. Por otro lado, se definió considerar solo aquellos eventos ocurridos desde el 2010, por el terremoto del 27 de febrero y por la Megasequía que afecta a Chile desde dicho año, ambos contextos favorables e influyentes en la generación de remociones en masa. Posteriormente, se unificaron los tipos de remociones según la clasificación propuesta por Hungr et al. (2014). En la tabla 4, se presenta un detalle de las fuentes de información que permitieron completar el catastro junto con la cantidad de eventos por cada una:

Tabla 4: Número de remociones por fuente de información.

Fuente	N° de Eventos
Contreras y Schilling (2012)	2
Escobar (2013)	8
Escobar (2013) y Vialidad MOP	4
Municipalidad de Palmilla (2021)	1
SERNAGEOMIN (s.f)	3
SERNAGEOMIN (2017)	2
Romero et al. (2021)	6
Puntos Programa Invierno	1
(Serey et al., 2019)	89
Terreno 03/11/2021	5

Desde la tabla 4, se extrae que gran parte del catastro proviene del inventario realizado por Serey et al. (2019), cuya superficie mínima determinada para considerar los eventos es de 30 m<sup>2</sup>. Por otra parte, las remociones de menor tamaño presentes en el catastro son aquellas provenientes de informes de vialidad que poseen un volumen aproximado a 1 m<sup>3</sup>, las cuales clasifican como caídas de rocas. Por ello, la superficie mínima considerada para el presente catastro es de 1m<sup>2</sup>, por lo que se recomienda la revisión en terreno de los puntos programa invierno, con la finalidad de corroborar la existencia de remociones en masa que no puedan ser visibles mediante imágenes satelitales.

**4.3. Factor de Catastro.** Ya realizado el catastro puntual, se determinó el número de remociones presentes en cada microcuenca mediante la ecuación 3. Para ello, se utilizó la herramienta “Unión espacial” del programa ArcGIS, la cual permite contar la cantidad de puntos dentro de una capa poligonal.

$$FC = \frac{R}{A} \quad (\text{Ecuación 3})$$

En donde, R corresponde al número de remociones por microcuenca, mientras que A es el área de la microcuenca.

## 5. Resistencia a la compresión uniaxial (UCS)

A partir del trabajo en terreno, se recogieron muestras de roca en aquellos sectores donde se identificaron remociones en masa, con la finalidad de definir la litología y la resistencia a la compresión uniaxial de las rocas siguiendo la Norma de Carga Puntual ASTM D 5731 - 02, con la finalidad de determinar las propiedades geotécnicas de las rocas de la región y para completar la información geológica regional. Cabe mencionar que, este parámetro se propone como insumo adicional a la metodología propuesta por Alfaro et al. (2018), el cual es preliminar y se debe completar con estudios posteriores. Las zonas de muestreo se observan en la figura 27, en donde para cada punto se obtuvieron 14 ejemplares como mínimo.

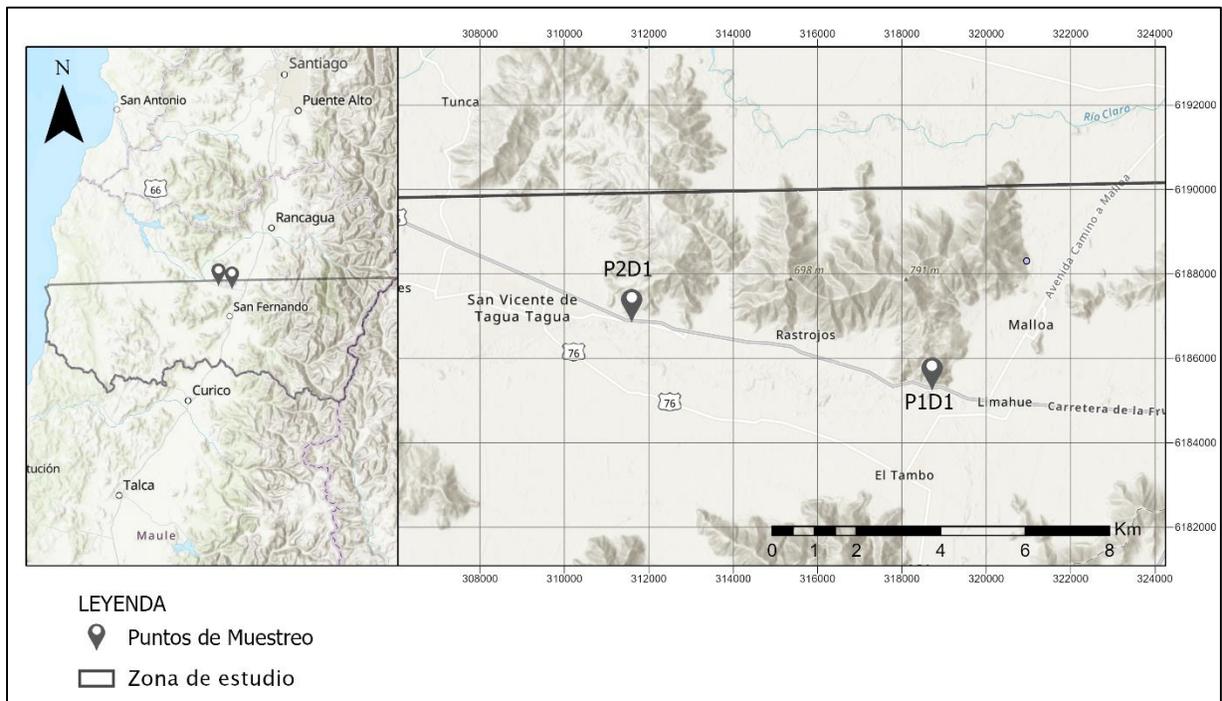


Figura 27: Ubicación de los puntos de muestreo.

Como se mencionó anteriormente, para la obtención del parámetro UCS se utilizó la máquina de carga puntual (Figura 28). Este ensayo consiste en disponer la muestra de roca entre dos puntas cónicas metálicas, de forma que se aplica una presión en ella hasta llegar al punto de rotura.



Figura 28: Ensayo de carga puntual. Foto tomada por A. Serey (2021)

La ventaja principal de este ensayo recae en que se puede muestrear bloques de rocas irregulares sin mayor preparación de la muestra, por lo que el proceso es más rápido, pero a la vez, se hace necesario muestrear una mayor cantidad de rocas para obtener un resultado más preciso. En la siguiente figura se presenta la configuración de carga para bloques de roca irregulares y los requerimientos de forma:

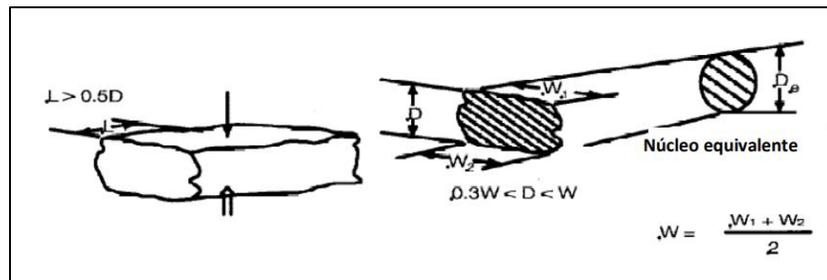


Figura 29: Requerimientos para el ensayo de bloques de roca irregulares. W = ancho, L = largo, D = diámetro, y De = diámetro del núcleo equivalente. Extraído de ASTM D 5731 - 02.

El índice de carga puntual se calcula como:

$$I_s = \frac{P}{De^2} [MPa] \quad (\text{Ecuación 4})$$

En donde, P es la carga de falla medida en N, y De es el diámetro del núcleo equivalente, que para el caso de muestras irregulares su fórmula es:

$$De^2 = \frac{4A}{\pi} [mm^2] \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde A corresponde al área de la sección transversal mínima:

$$A = W \times D [mm^2] \quad (\text{Ecuación 6})$$

Una vez calculado el valor de  $De^2$  para todos los ensayos, se graficó dicho parámetro en función de la carga de falla (P), para ello, se eliminó los 2 valores máximos y los 2 valores mínimos de P. De esta forma, se generó una regresión lineal que permitió obtener el valor de  $P_{(50)}$ , es decir, la carga de falla para muestras diametrales con  $D=50$  [mm]. Luego, se obtuvo el valor del índice de resistencia a la carga puntual corregido ( $I_{s(50)}$ ) mediante la ecuación 4, y partir de esto, el valor de la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) mediante la siguiente formula:

$$UCS = 23 \times I_{s(50)} [MPa]$$

## Resultados

### Mapa Geológico

En la figura 30 se presenta la compilación de las unidades geológicas de la zona sur de la región de O'Higgins agrupadas en las categorías descritas:

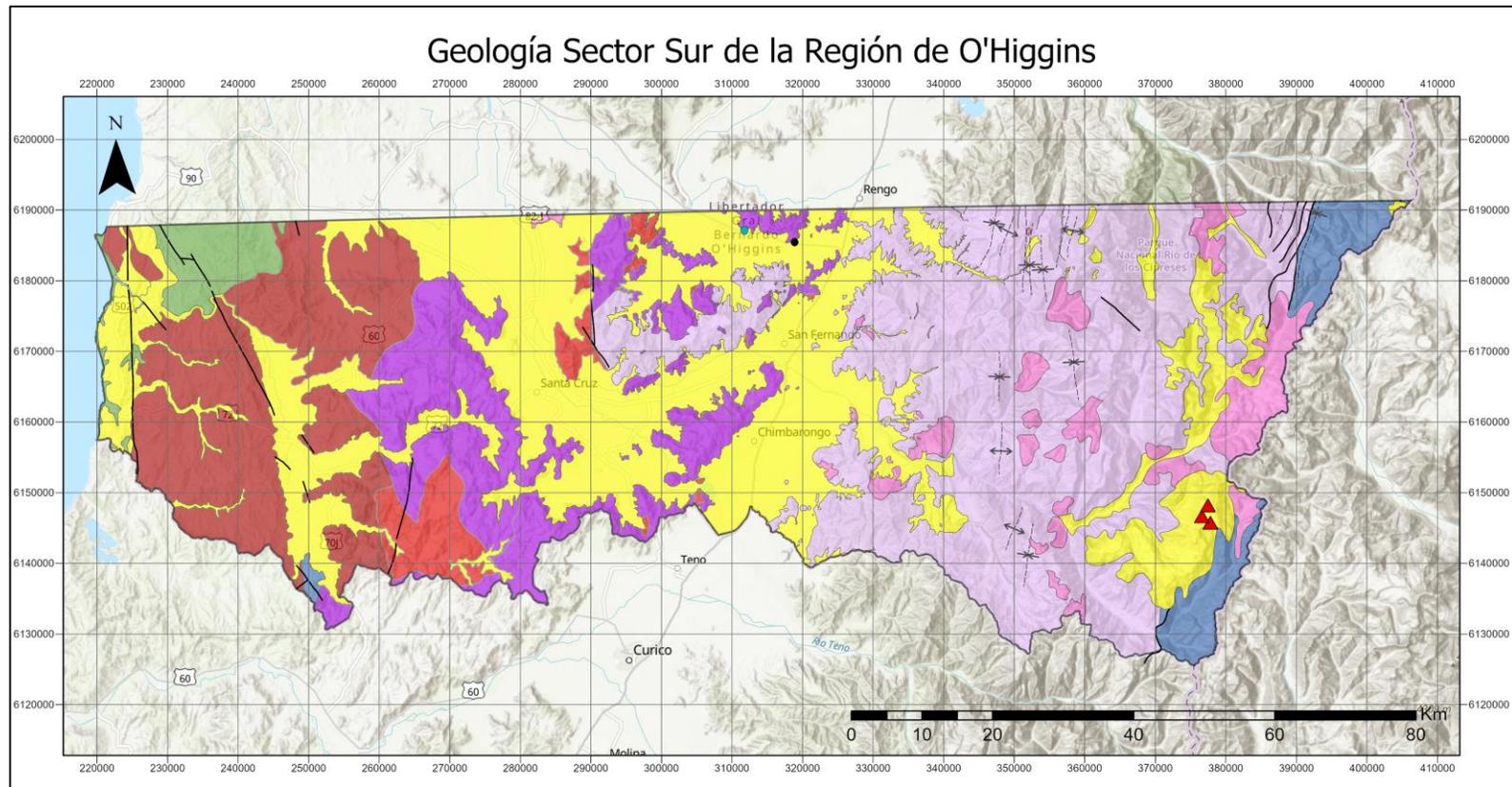


Figura 30: Geología compilada de la zona sur de la Región de O'Higgins. Referencia Geodésica: UTM, Zona 19S, SIRGAS. Leyenda en figura 3.

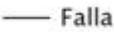
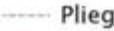
L E Y E N D A	UNIDADES GEOLÓGICAS		ESTRUCTURAS	
		Depósitos Cuaternarios		Falla
		Rocas Volcánicas y Volcanosedimentarias del Paleógeno-Neógeno		Pliegue
		Rocas Intrusivas del Cenozoico		Centro Volcánico
		Rocas Volcanosedimentarias del Mesozoico		
		Rocas Sedimentarias del Mesozoico		
		Rocas Intrusivas del Mesozoico	UCS [MPa]	
		Rocas Intrusivas del Paleozoico		53.18
	Rocas Metamórficas del Paleozoico		77.4	

Figura 31: Leyenda del Mapa Geológico Compilado.

Como es posible observar en la figura 30, en la zona de estudio afloran casi todas las unidades geológicas, a excepción de la unidad “Rocas Sedimentarias del Mesozoico”, la cual se expone hacia el norte de la zona de estudio.

## Orden de drenaje y microcuencas

De acuerdo a las capas de microcuencas y red de drenaje obtenidas a partir del modelo automatizado y su posterior procesamiento, se obtuvo un orden de drenaje hasta 7 en la región de O'Higgins, como se muestra en la figura 32. Se observa que aquellos cauces de orden 7 corresponden a los Ríos Cachapoal, desde el Noreste, y Tinguiririca, desde el Sureste.

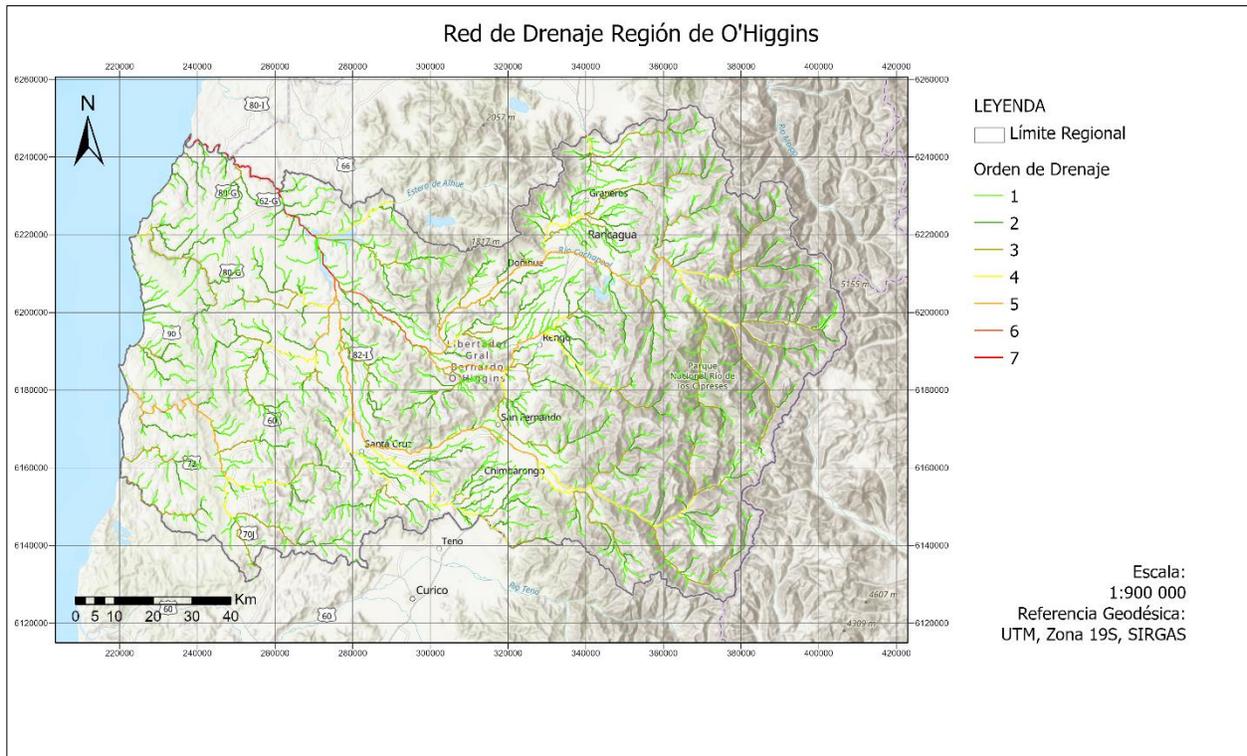


Figura 32: Jerarquía de drenes, Región de O'Higgins.

En figuras siguientes, se presentan los resultados acotados a la zona de estudio. Principalmente, se obtuvo 679 microcuencas y 1350 drenes (Figuras 33 y 34). Por otra parte, se obtuvo 4 clases para la densidad de drenaje (Figura 35) según el método de desviación estándar, por lo que, para el factor de Melton (Figura 36) se dejó el mismo número de clases según el método de rupturas naturales (Jenks). Es preciso señalar que el área de estudio se modificó en su límite norte para facilitar el trabajo con los drenes y microcuencas.



Figura 33: Microcuencas del sector sur de la Región de O'Higgins. Referencia geodésica: UTM, Zona 19S, SIRGAS.

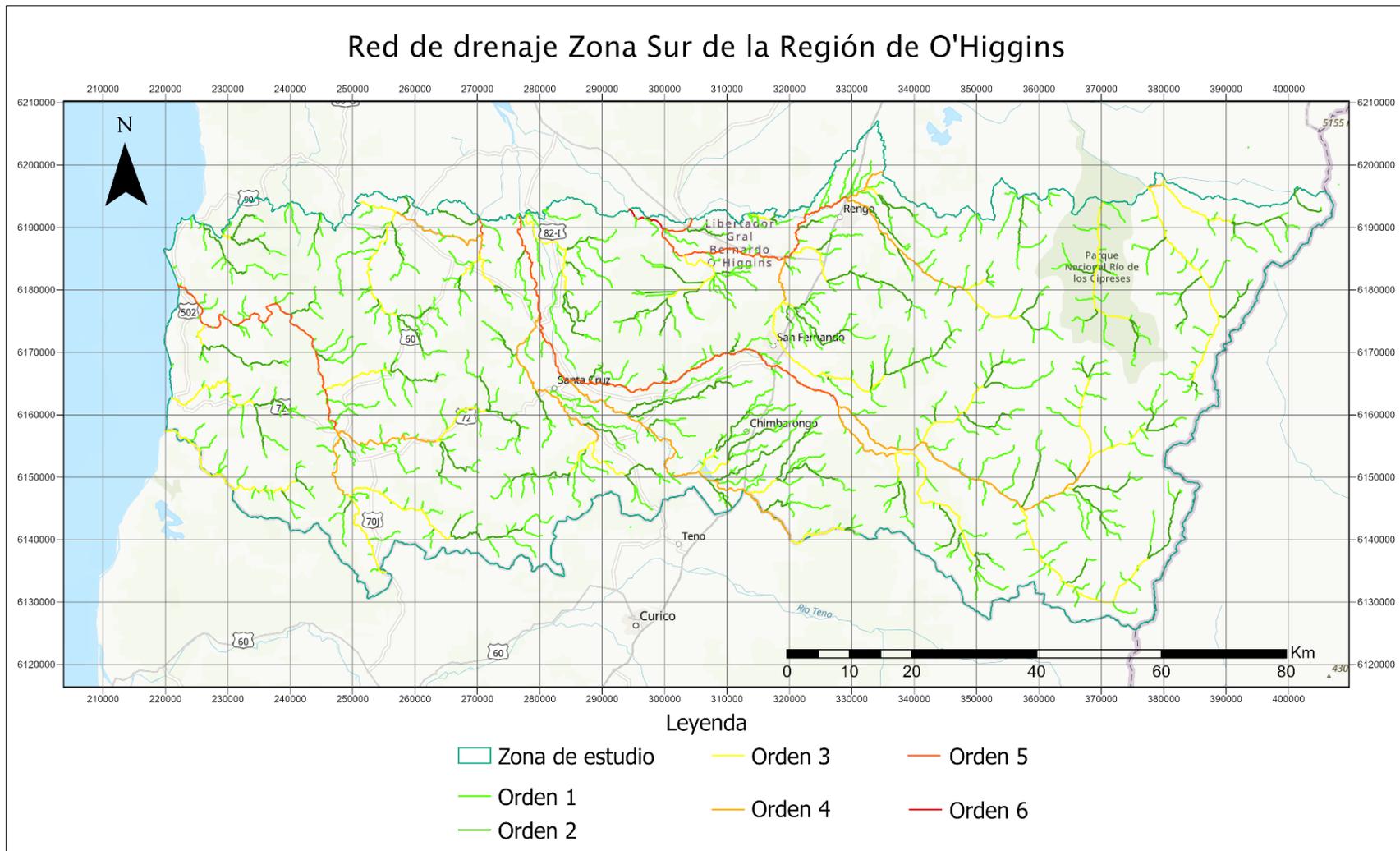


Figura 34: Jerarquía de drenes sector sur de la Región de O'Higgins. Referencia geodésica: UTM, Zona 19S, SIRGAS.

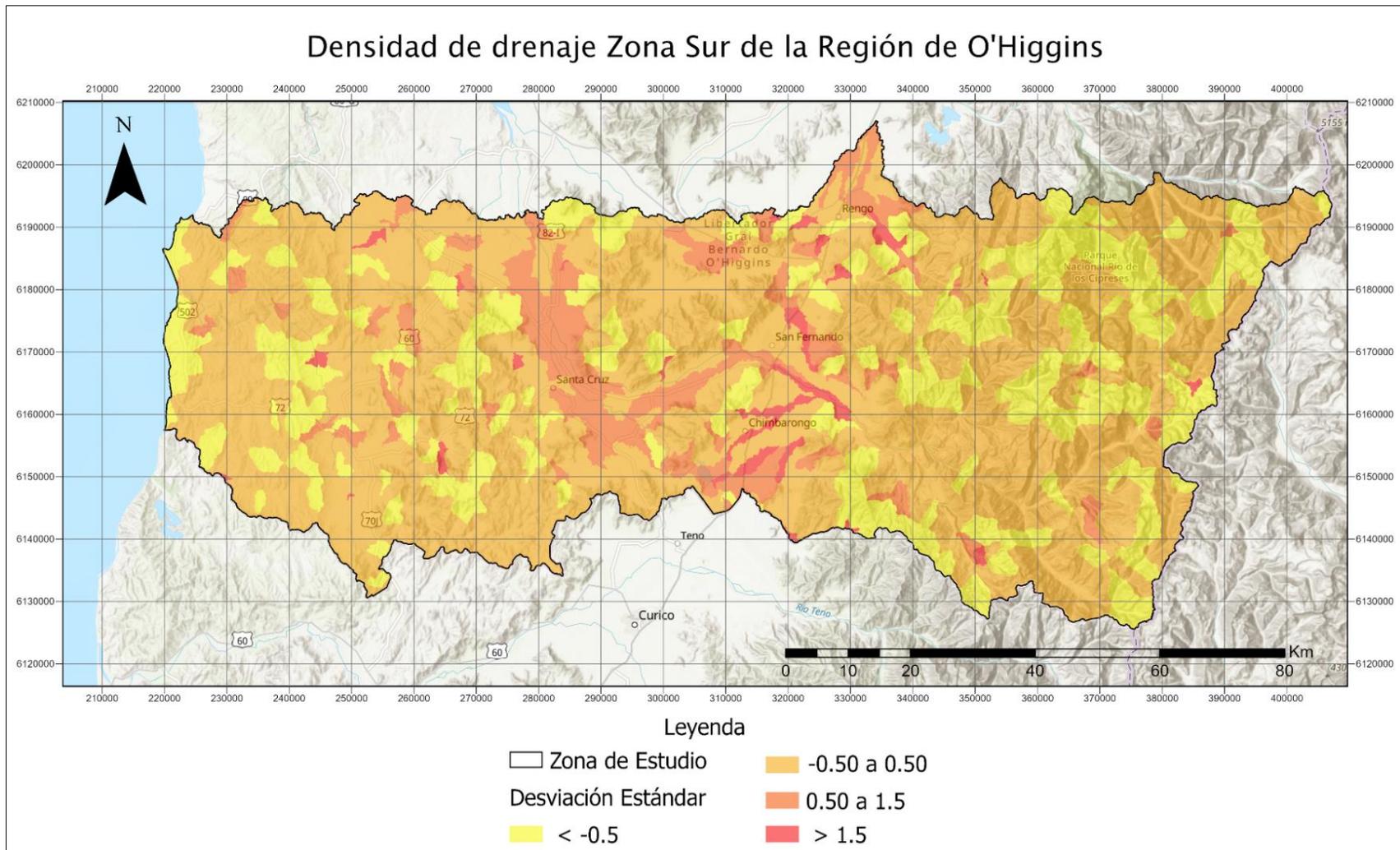


Figura 35: Densidad de drenaje (Dd) sector sur de la Región de O'Higgins. Referencia geodésica: UTM, Zona 19S, SIRGAS.

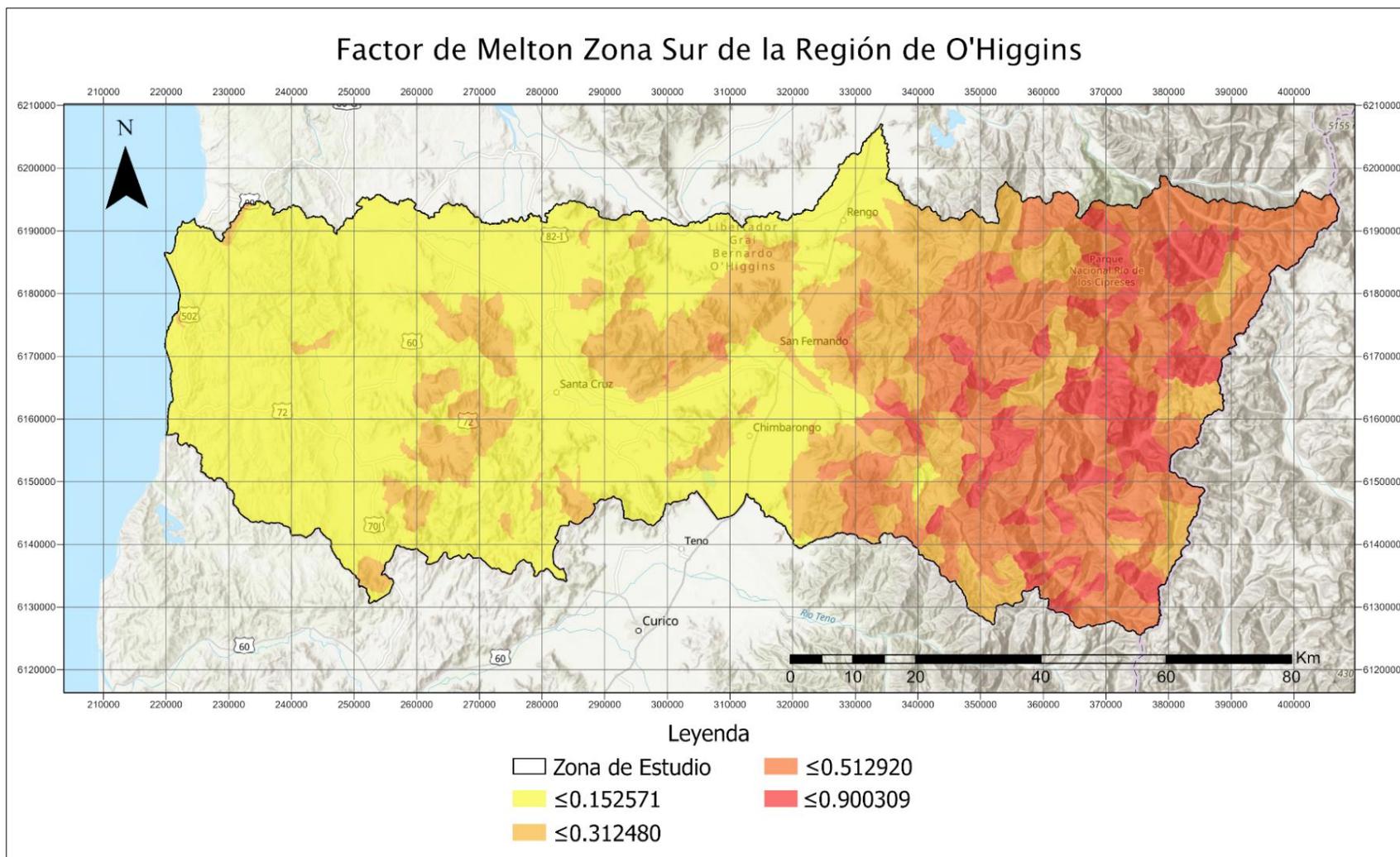


Figura 36: Factor de Melton (FM) sector sur de la Región de O'Higgins. Referencia geodésica: UTM, Zona 19S, SIRGAS.

### **Mapa Geomorfológico**

En la figura 37 se presenta las macrounidades geomorfológicas de la zona de estudio. Se observan 3 unidades diferentes que se disponen con orientaciones N-S. Estas unidades son de este a oeste: Cordillera Principal, Depresión Central y Cordillera de la Costa.

La Cordillera principal se caracteriza por abordar un área aproximada de 3635,61 km<sup>2</sup> con altitudes que oscilan desde los 279 m hasta los 4991 m con una media de 2215,33 m. Se caracteriza por una pendiente promedio de 26,6° llegando a alcanzar máximas de 79,2° (Figura 38).

En cuanto a la Depresión Central, abarca una menor extensión espacial de 639,1 km<sup>2</sup> en toda la zona de estudio con una altitud promedio de 267,48 m en donde la mínima es de 234 m y la máxima alcanza los 694 m. Por otro lado, se diferencia por tener una pendiente media cercana a los 3°, con máximas hasta los 47°.

Por otra parte, la Cordillera de la Costa posee un área aproximada de 4258,13 km<sup>2</sup>, altitudes que alcanzan los 1209 m con un promedio de 335,67 m. Alcanza pendientes máximas iguales a 63,6° y medias en torno a 10°.

## Geomorfología de la Zona Sur de la Región de O'Higgins

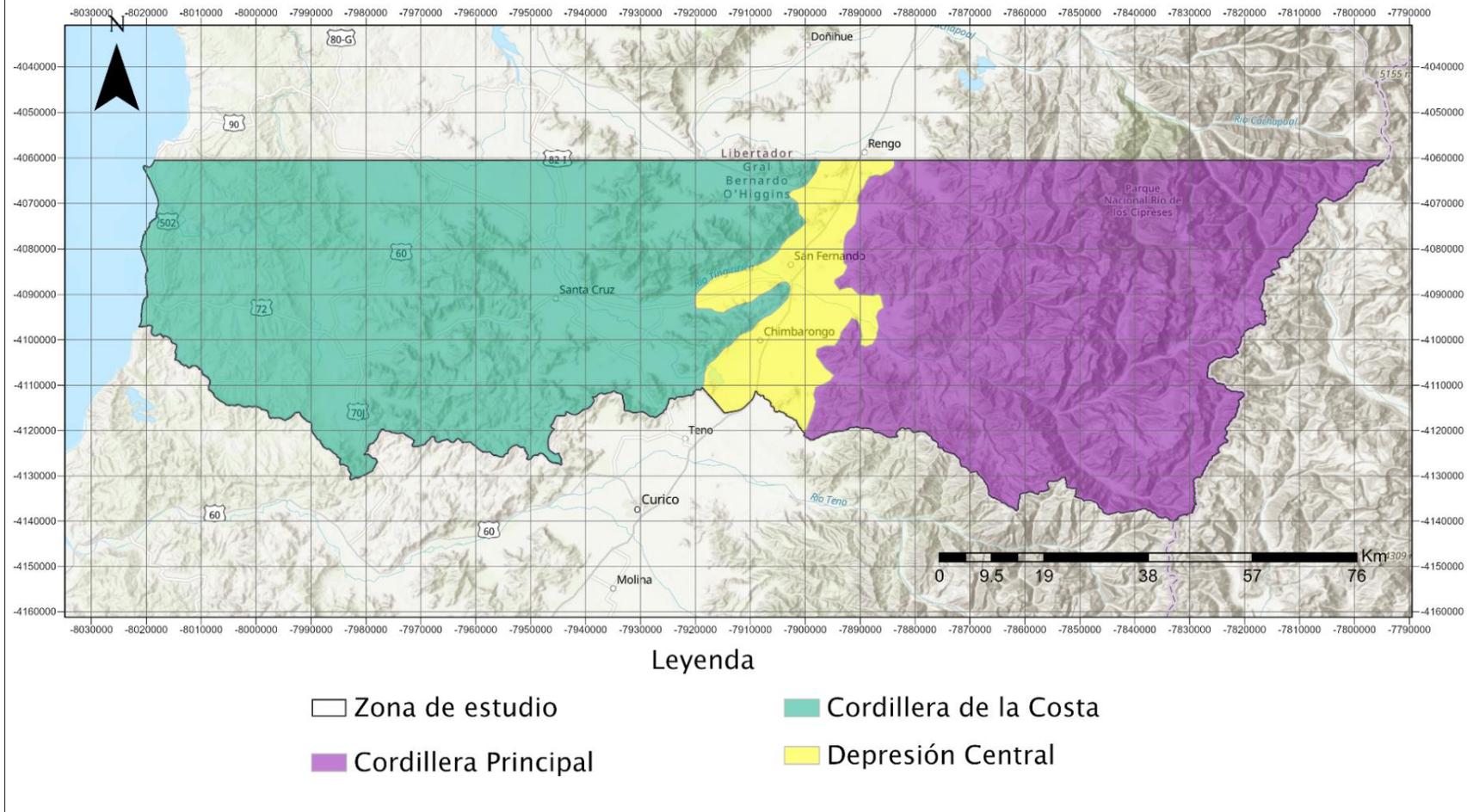


Figura 37: Macrounidades Geomorfológicas sector sur de la Región de O'Higgins. Referencia geodésica: UTM, Zona 19S, SIRGAS.

### Mapa de Pendiente Zona Sur de la Región de O'Higgins

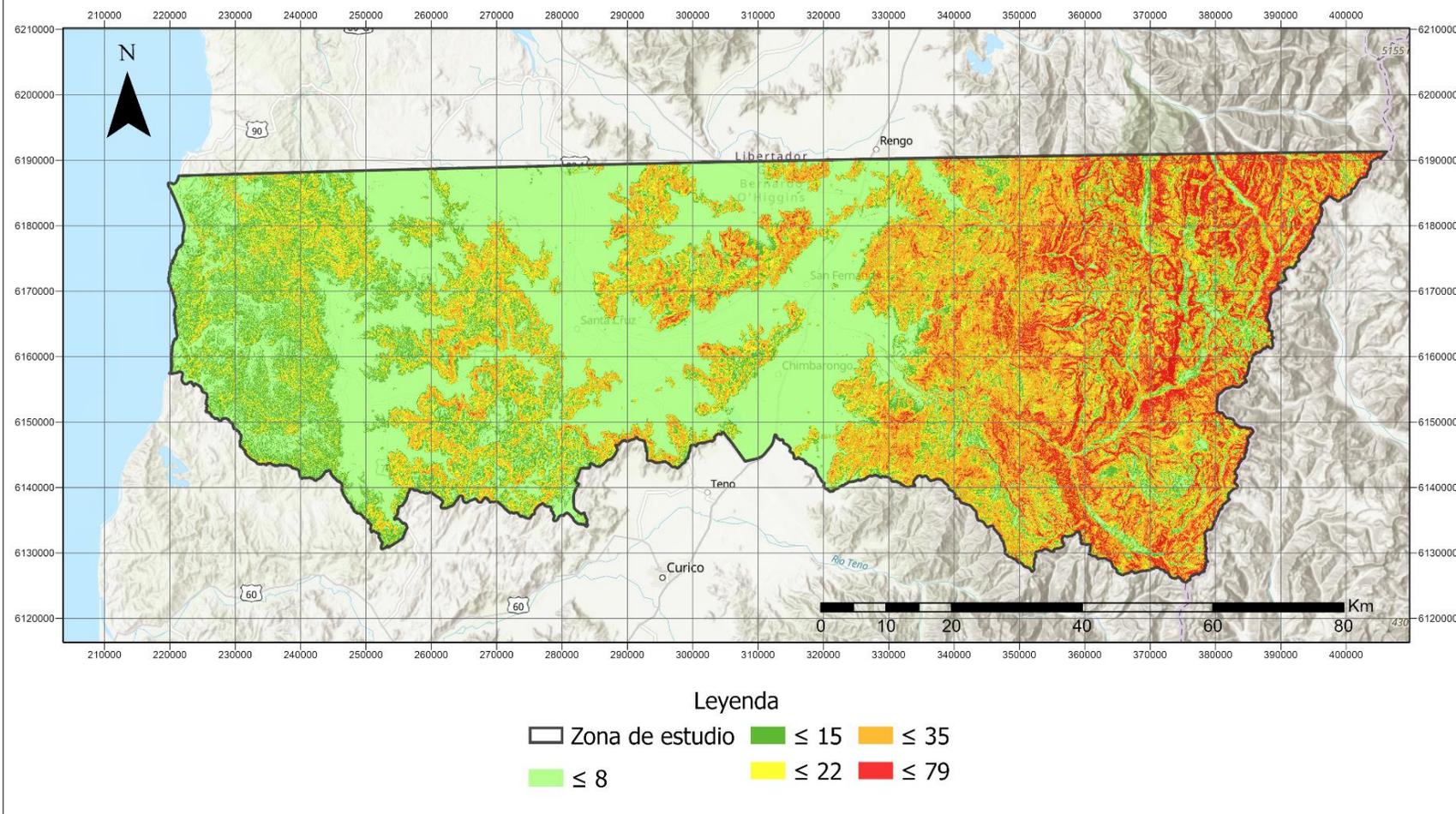


Figura 38: Mapa de Pendiente sector sur de la Región de O'Higgins. Referencia geodésica: UTM, Zona 19S, SIRGAS.

## Catastro de Remociones en Masa

En la figura 39 se presenta el catastro de eventos de remociones en masa de la zona sur de la región de O'Higgins, clasificadas según Hungr et al. (2014):

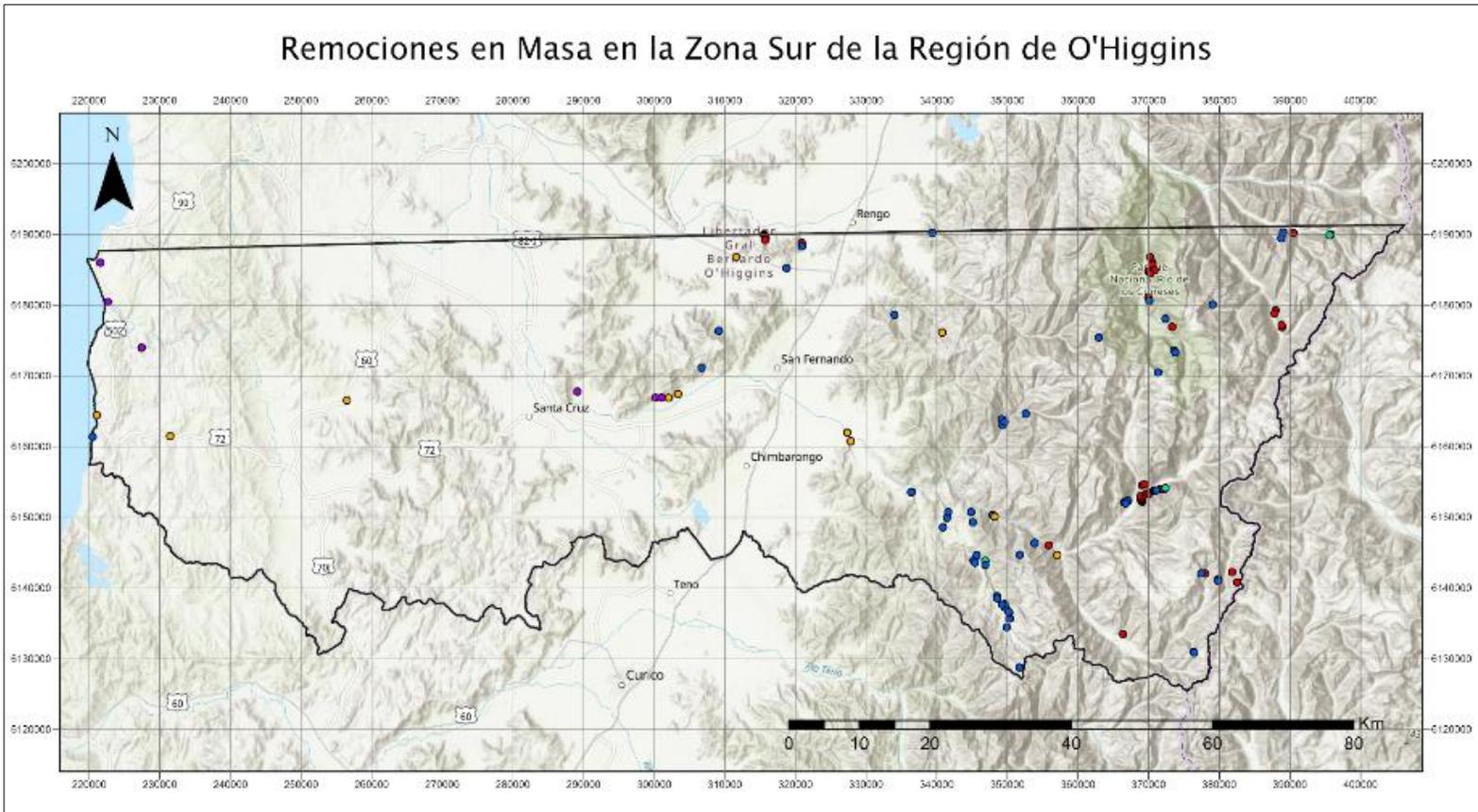


Figura 39: Catastro de eventos de Remoción en masa en la zona sur de la Región de O'Higgins. Referencia geodésica: UTM, Zona 19S, SIRGAS. Leyenda en figura 40.

L e y e n d a	Tipo de Evento:
	● Deslizamiento de Detritos
	● Avalancha de Detritos
	● Caída de Rocas
	● Licuefacción
	● Flujo de Detritos
□ Zona de estudio	

Figura 40: Leyenda del catastro de eventos de remoción en masa.

A partir del catastro, se obtuvo un total de 121 puntos correspondientes a 5 categorías de remociones: Caídas de Rocas, Flujos de Detritos, Deslizamientos de Detritos, Avalancha de Detritos y Licuefacción. En la tabla 5 se presenta la cantidad de remociones por tipo de evento, mientras que el detalle de cada remoción se encuentra en el Anexo I.

Tabla 5: Cantidad de remociones por tipo de evento.

Tipo de Remoción	Cantidad
Deslizamiento de detritos	58
Flujo de detritos	40
Caída de Rocas	12
Licuefacción	6
Avalancha de Detritos	5

Según la tabla 5, la mayor cantidad de eventos corresponde a deslizamientos de detritos y flujo de detritos, mientras que las caídas de rocas, licuefacción y avalancha de detritos se presentan en menor medida.

En la figura 41, se muestra el mapa del factor de catastro de la zona de estudio, en donde se visualizan algunos agrupamientos de remociones en los sectores cordilleranos, los cuales corresponden principalmente a deslizamientos y flujos de detritos según la figura 39. Por otra parte, hacia el occidente de la cordillera de la Costa se visualizan remociones puntuales que corresponden mayormente a eventos de licuefacción, mientras que, hacia el oriente, en el sector de Corcolén, comuna de Malloa, se presenta un cluster de flujos de detritos, el cual fue gatillado por la tormenta estival del verano 2021 en Chile central.

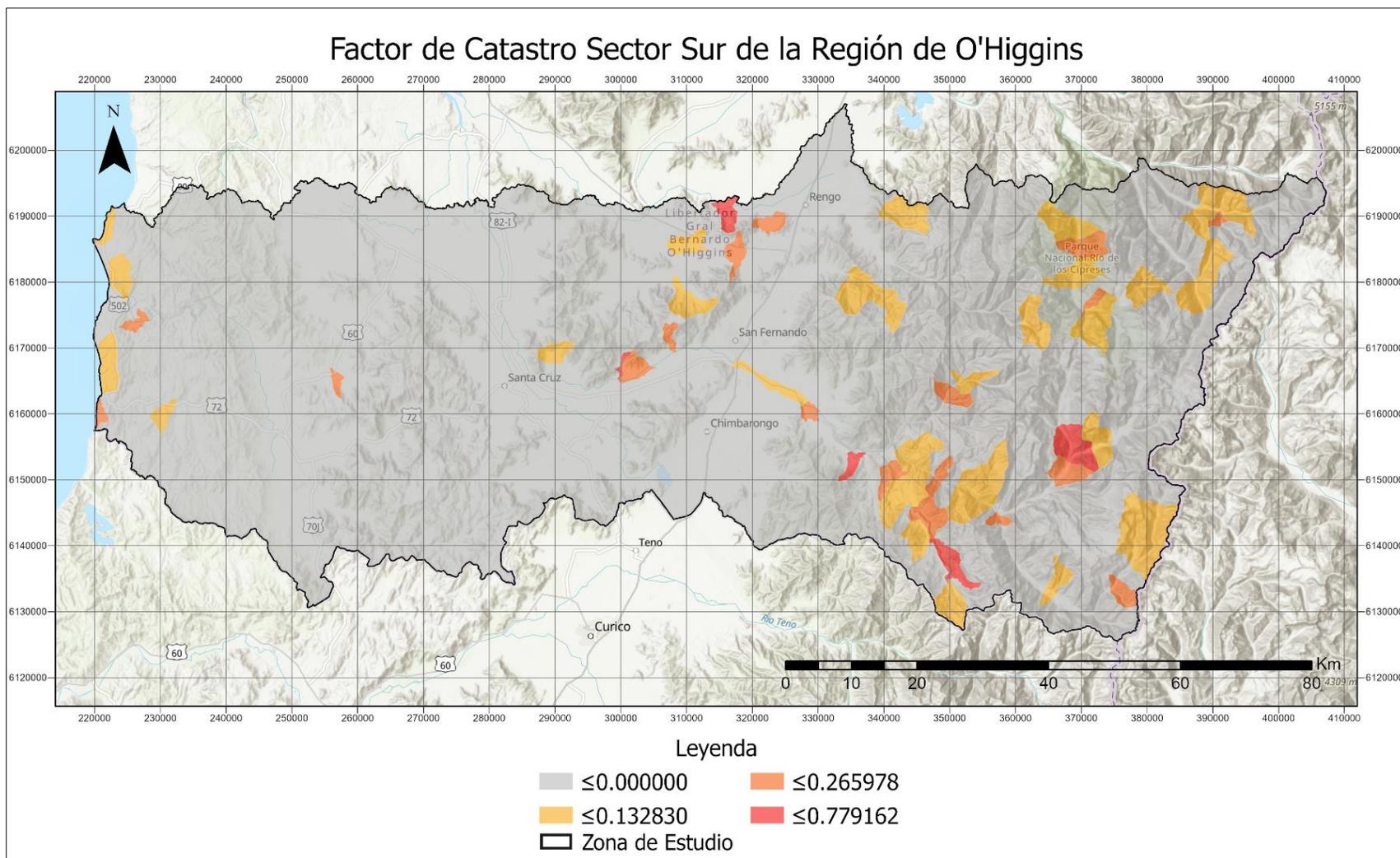


Figura 41: Factor de catastro (FC) en la zona sur de la región de O'Higgins. Referencia geodésica: UTM, Zona 19S, SIRGAS.

## Resistencia a la compresión uniaxial (UCS)

A continuación, se presentan los resultados de los 2 ensayos de carga puntual realizados, los que permiten tener una caracterización geotécnica preliminar de algunas zonas de la región:

### 1. Ensayo de carga puntual P1D1 (Tabla 6):

-Ubicación: E:318700; N:6185285.

-Litología: Riolita. En el mapa geológico compilado pertenece a la categoría "Roca Volcanosedimentaria del Mesozoico"

Tabla 6: Datos ensayo de carga puntual P1D1.

w1 [mm]	w2 [mm]	W [mm]	D [mm]	De <sup>2</sup> [mm]	P [KN]	P (50) [KN]	Is (50) [Mpa]	UCS [Mpa]	(°) de Meteorización
75	90	82.5	64	6722.69	15	6.7697	2.70788	62.28124	II
60	110	85	47	5086.58	12				
72	100	86	40	4379.93	10				
50	70	60	59	4507.26	12				
40	80	60	45	3437.74	7				
43	75	59	37	2779.48	9				
52	80	66	42	3529.41	10				
50	75	62.5	43	3421.82	10				
40	44	42	31	1657.75	4				
80	110	95	30	3628.72	8				

### 2. Ensayo de carga puntual P2D1 (Tabla 7):

-Ubicación: E:311578, N:6186901.

-Litología: Arenisca. En el mapa geológico compilado pertenece a la categoría "Roca Volcanosedimentaria del Mesozoico"

Tabla 7: Datos ensayo de carga puntual P2D1.

w1 [mm]	w2 [mm]	W [mm]	D [mm]	De <sup>2</sup> [mm]	P [KN]	P (50) [KN]	Is (50) [Mpa]	UCS [Mpa]	(°) de Meteorización
45	80	62.5	36	2864.78	7	5.7809	2.31236	53.18428	I-II
57	65	61	45	3495.03	10				
57	90	73.5	48	4491.98	8				
60	90	75	49	4679.14	6				
43	70	56.5	53	3812.71	3				
45	70	57.5	41	3001.66	6				
37	71	54	30	2062.64	6				
36	59	47.5	30	1814.36	2				
45	105	75	40	3819.71	7				
60	80	70	36	3208.56	6				

## Discusión

Para el apartado de **orden de drenaje y microcuencas** se comparó los resultados de densidad de drenaje con respecto a la tabla 3, en donde se rescató que, según Junco (2004), un 99% de las cuencas poseen una densidad de drenaje baja, mientras que, en base a Delgadillo y Páez (2008), un 97% de las cuencas de la zona de estudio se caracterizan por una clase Baja según su clasificación. Por ello, se decidió enfocar el análisis según lo descrito en la metodología de Alfaro et al. (2018), abordando la clasificación de dicho parámetro únicamente según la desviación estándar de los datos, para así obtener una comparación entre las cuencas.

En base a esto, al observar la figura 35 y al analizarla junto con el **mapa geomorfológico y el mapa de pendientes** (Figuras 37 y 38), se plantea que la cordillera principal se caracteriza por pendientes altas y por tener valores de densidad de drenaje bajo la media de la zona de estudio, mientras que la depresión central, se diferencia de las otras unidades por tener los mayores valores de densidad de drenaje, en donde se observa que estos valores corresponden principalmente a cuencas relativamente planas con forma alargada. Por otro lado, en la cordillera de la Costa se reconoce una mayor variación, por un lado, en las zonas más llanas se observan cuencas medianamente alargadas con valores por sobre la media, pero con valores menores a los presentados por la unidad contigua, y, por otro lado, se observan zonas de mayor pendiente, que poseen valores cercanos a la media.

Por otro lado, Stanler (1986, como se citó en Molina (2016)) señala que los materiales geológicos duros y resistentes, al ser más persistentes a la erosión fluvial tienden a tener bajas densidades de drenaje. Así, al comparar los resultados con respecto al **mapa geológico compilado** (Figura 30), es posible observar, que aquellas zonas con las mayores densidades de drenaje y menores pendientes, son aquellas conformadas por depósitos cuaternarios, mientras que, aquellas zonas con las menores densidades y mayores pendientes, se encuentran constituidas principalmente por rocas volcánicas y volcanosedimentarias, y en menor medida, por rocas intrusivas. Por ende, el drenaje relativamente alto de la depresión central y de las zonas llanas presentes en la cordillera de Costa, es probable que se relacione con la presencia de los depósitos cuaternarios presentes en dichas morfologías, mientras que, la baja densidad de drenaje de la

cordillera principal puede enlazarse a materiales más competentes, sin embargo, para ello se debe realizar un estudio más detallado sobre la resistencia de las rocas de la región para realizar una comparación más técnica con respecto a la calidad geotécnica.

Cabe mencionar la injerencia de la cobertura vegetal en la densidad de drenaje. Una cobertura escasa conlleva una exposición y desprotección del material subyacente implicando altas tasas de erosión, y, por ende, influyendo en el aumento de la densidad de drenaje, por lo que también se relaciona con el clima de la zona de estudio. En base a lo anterior, es posible que la vegetación también influya en el valor de este parámetro en la depresión central. Por otra parte, se observa que las bajas densidades caracterizan a las zonas altas, como en el caso de la Cordillera Principal, en donde hay mayor exposición a los procesos erosivos y menor vegetación, por lo que son zonas propensas a la generación de remociones en masa.

Para el caso de **Factor de Melton** (Figura 36), los mayores valores se localizan en la cordillera de los Andes. Mientras que, en la Depresión central y cordillera de la Costa se presentan los menores valores. Según lo anterior, en la unidad más oriental, se presentan cuencas con una alta disección o rugosidad, es decir, no retienen el material siendo propensas a generar flujos de detritos durante eventos climáticos extremos, mientras que, las otras unidades presentan una mayor estabilidad.

De acuerdo a lo anterior y en base a los parámetros de densidad de drenaje y factor de Melton, es posible plantear de manera preliminar que la depresión central es menos susceptible a la generación de remociones en masa, debido a que se conforma por cuencas que poseen mayor facilidad de evacuar las aguas que discurren en su superficie, lo que conlleva a menores tiempos de escorrentía disminuyendo la saturación del suelo, además, se caracteriza por ser una zona plana, en donde la movilización del material se dificulta. Al contrario, la cordillera Principal sería más susceptible a este tipo de eventos debido a su menor densidad de drenaje y cobertura vegetal, mayor pendiente y rugosidad (factor de Melton), lo cual se corrobora con el **Catastro de eventos de remoción en masa y el factor de Catastro**, ya que concentra la mayor cantidad de remociones declaradas, junto con las zonas de mayor pendiente y rugosidad de la cordillera de la Costa.

## Conclusión

De acuerdo a los objetivos presentados con anterioridad, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- El estudio constituye la etapa de recopilación de antecedentes de la metodología descrita por Alfaro et al. (2018) y entrega los insumos geológicos, hidrogeológicos y geomorfológicos para la continuación del Plan de Remociones en masa en la zona sur de la Región de O'Higgins.
- La cordillera de los Andes es la unidad morfoestructural más propensa a generar remociones en masa de acuerdo a sus características hidrológicas, topográficas y geológicas, mientras que la depresión central es el rasgo menos susceptible. Por otra parte, la cordillera de la Costa se considera moderadamente susceptible por la mayor variabilidad en sus características.
- Las principales remociones declaradas corresponden a deslizamientos de detritos y flujos de detritos, localizadas principalmente en las cordilleras de los Andes y de la Costa.
- Los resultados preliminares implican que se deben enfocar estudios de mayor detalle en la cordillera de la Costa, ya que es una zona con mayor población en comparación a la cordillera principal, y también, por los antecedentes que dejó la tormenta estival del pasado año.
- Este estudio es relevante ya que constituye la base para la generación de un mapa de susceptibilidad al peligro de remociones en masa en la zona sur de la Región de O'Higgins, que funcione como apoyo para gestionar una emergencia ante dicho peligro.
- La escasa y antigua información geológica presente en la zona de estudio se considera como la principal limitante.

## Recomendaciones

A partir del trabajo realizado, se plantea la importancia de complementar y unificar el conocimiento geológico debido a la carencia de información actual en gran parte de la región. En este sentido, se recomienda completar el catastro de remociones en masa e ir incorporando datos más recientes mediante fotointerpretación a través de imágenes satelitales y campañas de terreno, para considerar incluir datos de volumen y superficie de las remociones, y también, con el fin de revisar la geomorfología y con especial énfasis en las unidades geológicas emplazadas hacia el sector occidental de la región, debido a la antigüedad de la información disponible en dicha zona, así, se tendrá una caracterización más profunda de la región y se podrá estimar de mejor manera que tan susceptible es al peligro de remociones en masa de tal forma que se tomen las medidas adecuadas para gestionar el riesgo, aún más, considerando el contexto climático actual y su injerencia en este tipo de peligros.

Se recomienda también, incluir como insumo un mapa de uso de suelos, ya que es un parámetro que relaciona indirectamente el factor antrópico en la generación de remociones en masa, e integrar un mapa de riesgo de erosión potencial, debido a que determina en gran parte la cantidad de sedimentos disponibles para ser transportados por los cauces. Además, como se mencionó anteriormente, se recomienda ampliar la información geotécnica de las rocas de la región para poder incorporar a futuro este recurso dentro del plan de remociones.

Finalmente, se destaca que la metodología propuesta por Alfaro et al (2018) se debe adecuar a la zona de estudio, de modo que se deben probar diferentes parámetros para lograr los insumos más adecuados de acuerdo a la escala a la cual se está trabajando, en este aspecto, se recomienda probar con un mayor número de iteraciones para la realización del mapa geomorfológico en ENVI.

## Referencias

- Agua y SIG. (2018). Delimitación de cuencas con ArcGIS. Herramienta Hydrology de Spatial Analyst Tools. Retrieved from <http://www.aguaysig.com/2011/03/delimitacion-de-cuencas-con-arcgis.html> (última visita 12-02-2022)
- Alfaro, A., Pantoja, G. y Brantt, C. (2018). PELIGRO DE REMOCIONES EN MASA EN LA REGIÓN DE COQUIMBO-SECTOR NORTE. In *Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe registrado IR-18-68* (pp. 40). Santiago.
- Alvarado, G. y Moya, C. (2007). División político-administrativa y censal, 2007. In *Instituto Nacional de Estadística INE Chile*.
- ASTM. *D 5731-02 Standard test method for determination of the point load strength index of rock*.
- Bovis, M. y Jakob, M. (1999). The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity. *Earth surface processes and landforms*, 24(11), 1039-1054. doi:[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199910\)24:11<1039::AID-ESP29>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199910)24:11<1039::AID-ESP29>3.0.CO;2-U)
- Camino, M. A., Bó, M. J., Cionchi, J. L., Del Río, J. L., de Armentia, A. L. y De Marco, S. G. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires. *Revista Universitaria de Geografía*, 27(1).
- Chacón, D. (2019). *Peligro de grandes remociones en masa en el valle del río Pangal, provincia de Cachapoal, Región de O´Higgins*. (Memoria de Título), Universidad de Chile, Región Metropolitana.
- Charrier, G. y Lillo, F. (1973). Geología regional y geoquímica del drenaje de las provincias de O'Higgins y Colchagua. *Instituto de Investigación de recursos naturales*, 7.
- Charrier, R. (1973). Interruptions of spreading and the compressive tectonic phases of the Meridional Andes. *Earth Planetary Science Letters*, 20(2), 242-249. doi:[https://doi.org/10.1016/0012-821X\(73\)90164-7](https://doi.org/10.1016/0012-821X(73)90164-7)
- Charrier, R. (1981). Mesozoic and Cenozoic stratigraphy of the central Argentinian-Chilean Andes (32-35 S) and chronology of their tectonic evolution. *Centralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, Stuttgart*.
- Charrier, R. (1983). Hoja El Teniente. Carta geológica de Chile. *Instituto de Investigaciones Geológicas*.
- Charrier, R., Pinto, L. y Rodríguez, M. P. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. *Geological society special publication*, 21-114.
- Charrier, R., Wyss, A., Flynn, J., Swisher III, C., Spichiger, S. y Zapatta, F. (1994). Nuevos antecedentes estratigráficos y estructurales para las Formaciones Coya-Machalí y Abanico, entre 33 50'y 35 S, Cordillera Principal Chilena. *Congreso Geológico Chileno, No. 7, Actas*, 2, 1316-1319.
- Contreras, J. y Schilling, M. (2012). Geología del área San Fernando-Curicó. In *Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta geológica de Chile, Serie Geología Básica* (Vol. 1).

- Davidson, J. (1971). *Tectónica y paleogeografía de la Cordillera Principal en el área de las Nacientes del Teno, Curicó, Chile*. (Memoria de Título ), Universidad de Chile, Región Metropolitana.
- Davidson, J. y Vicente, J. (1973). *Características paleogeográficas y estructurales del área fronteriza de las nacientes del Teno (Chile) y Santa Elena (Argentina)(Cordillera Principal, 35° a 35° 15' latitud sur)*. Paper presented at the Congreso Geológico Argentino.
- Escobar, F., Guzmán, R. y Camilo Viera, G. (1977). *Avance geológico de las hojas de Rancagua–Curicó–Talca–Linares, Chanco, Concepción–Chillan*: Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Escobar, P. E. (2013). *Inventario de remociones en masa desencadenadas por el sismo del 27 de Febrero de 2010 en Chile Central*. (Memoria para optar al título de Geólogo), Universidad de Chile, Región Metropolitana.
- Escribano, J. (2008). *Superficies de bajo relieve en la Cordillera de Chile Central entre los 32 30'S y los 33 30'S, y su relación con el alzamiento andino*. (Memoria para optar al título de Geólogo), Universidad de Chile, Región Metropolitana.
- ESRI. (2018). Herramientas: Cómo funciona Clasificación de arroyos. Retrieved from <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-stream-order-works.htm>
- Farías, M., Charrier, R., Carretier, S., Martinod, J., Fock, A., Campbell, D., Cáceres, J. y Comte, D. (2008). Late Miocene high and rapid surface uplift and its erosional response in the Andes of central Chile (33–35 S). *Tectonics*, 27(1). doi: <https://doi.org/10.1029/2006TC002046>
- Farías, M., Comte, D., Charrier, R., Martinod, J., David, C., Tassara, A., Tapia, F. y Fock, A. (2010). Crustal-scale structural architecture in central Chile based on seismicity and surface geology: Implications for Andean mountain building. *Tectonics*, 29(3). doi: <https://doi.org/10.1029/2009TC002480>
- Farías, M., Comte, D., Roecker, S., Carrizo, D. y Pardo, M. (2011). Crustal extensional faulting triggered by the 2010 Chilean earthquake: The Pichilemu Seismic Sequence. *Tectonics*, 30(6). doi:<https://doi.org/10.1029/2011TC002888>
- FUNO. (2020). *ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD A RIESGOS RELACIONADOS CON CAMBIO CLIMÁTICO*. Retrieved from [https://funo.mx/esg/img/cambio-climatico/CC\\_FUNO\\_E.pdf](https://funo.mx/esg/img/cambio-climatico/CC_FUNO_E.pdf)
- Garreaud, R. D. (2019). Análisis: Ríos en el cielo, ríos en la Tierra. Retrieved from <https://ingenieria.uchile.cl/noticias/155573/analisis-rios-en-el-cielo-rios-en-la-tierra>
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J. y Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology earth system sciences* 21(12), 6307–6327. doi:<https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H. y Veloso-Aguila, D. (2020). The central Chile mega drought (2010–2018): a climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology* 40(1), 421–439. doi:<https://doi.org/10.1002/joc.6219>

- Garreaud, R. D., Vergara, I. y Viale, M. (2021). Análisis: ¿Una tormenta de invierno en pleno verano? Entendiendo el extraordinario evento de finales de enero de 2021 en Chile central | (CR)2. Retrieved from <https://www.cr2.cl/analisis-una-tormenta-de-invierno-en-pleno-verano-entendiendo-el-extraordinario-evento-de-finales-de-enero-de-2021-en-chile-central-cr2/>
- Godoy, E., Schilling, M., Solari, M. y Fock, A. (2009). Geología del Área Rancagua-San Vicente de Tagua Tagua. In *Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile*.
- Gómez, R. (2001). *Geología de las unidades volcanogénicas cenozoicas del área industrial de la Mina El Teniente, entre Colón y Coya, Cordillera Principal de Rancagua, VI Región*. (Memoria para optar al Título de Geólogo), Universidad de Chile, Región Metropolitana.
- Henríquez, E. (2019). *ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A REMOCIONES EN MASA EN LA COMUNA DE CORRAL, AL NORTE DE LOS 39°54'S, REGIÓN DE LOS RÍOS, CHILE*. (Memoria para optar al Título de Geólogo), Universidad de Concepción, Región de los Ríos, Chile.
- Hungr, O., Leroueil, S. y Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167–194. doi:<https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- Klohn, E. (1960). Geología de Santiago, O'Higgins, Colchagua y Curicó. *Instituto de Investigaciones Geológicas Chile*, 8, 95.
- Melton, M. (1957). *An analysis of the relations among elements of climate, surface properties, and geomorphology*. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD0148373.pdf>
- Molina, C. (2016). *ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA EN LAS COSTAS DEL FIORDO COMAU, X REGIÓN, CHILE*. (Memoria para optar al título de Geóloga), Universidad de Chile, Región Metropolitana.
- Moreno, T. y Gibbons, W. (2007). *The geology of Chile*: Geological Society of London.
- Palape, C. J. (2014). *Deformación del basamento metamórfico paleozoico en la transecta Tanumé-Pichilemu, entre los 34, 2° y 34, 5° S, Cordillera de la costa, Chile Central*. (Memoria para optar al título de Geólogo), Universidad de Chile, Región Metropolitana.
- Parada, R. (2008). *Análisis Estructural del Borde Oriental de la Cuenca Terciaria de Abanico en el Valle del Río Teno, 7ma Región*. (Memoria para optar al título de Geólogo), Universidad de Chile, Región Metropolitana. Retrieved from <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103226>
- Pardo-Casas, F. y Molnar, P. (1987). Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American plates since Late Cretaceous time. *Tectonics*, 6(3), 233–248. doi:<https://doi.org/10.1029/TC006i003p00233>
- Rivano, S., Godoy, E., Vergara, M. y Villarroel, R. (1990). Redefinición de la Formación Farellones en la Cordillera de los Andes de Chile Central (32–34 S). *Andean Geology*, 17(2), 205–214. doi:<http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV17n2-a07>
- Rojas, I. P. (2014). *Reología y fábrica de la mineralización primaria, yacimiento El Teniente*. (Memoria para optar al título de Geólogo), Universidad de Chile, Región Metropolitana.
- Romero, J., Vergara-Pinto, F., Aguilar, G., Garcés, A. y Montserrat, S. (2022). Triggering factors, behavior, and social impact of the January 2021 hail-debris flows at the Central Valley of Chile. *Landslides*, 1–19. doi:<https://doi.org/10.1007/s10346-021-01830-2>

- Romero, J., Vergara, F. y Troncoso, A. (2021). ESTUDIO DE SUSCEPTIBILIDAD Y EVALUACIÓN DE RIESGO POR REMOCIÓN EN MASA EN EL ÁREA LA GRUTA-CANTARRANA, COMUNA DE MALLOA, REGIÓN DE O'HIGGINS. doi:10.13140/RG.2.2.34588.62082
- Sellés, D. y Gana, P. (2001). Geología del área Talagante-San Francisco de Mostazal: Regiones Metropolitana y del Libertador General Bernardo O'Higgins, Escala 1: 100.000. *SERNAGEOMIN, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica*(74).
- Serey, A., Piñero-Feliciangeli, L., Sepúlveda, S. A., Poblete, F., Petley, D. N. y Murphy, W. (2019). Landslides induced by the 2010 Chile megathrust earthquake: A comprehensive inventory and correlations with geological and seismic factors. *Landslides*, 16(6), 1153-1165. doi:<https://doi.org/10.1007/s10346-019-01150-6>
- SERNAGEOMIN. (2003). Mapa Geológico de Chile: versión digital. In *Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital*.
- SERNAGEOMIN. (2017). *Principales desastres ocurridos desde 1980 en Chile*. Retrieved from <http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Primer-Catastro-Nacional-Desastres-Naturales.pdf>
- SERNAGEOMIN. (s.f). Catastro de eventos de remociones en masa a nivel nacional. Retrieved from <http://portalgeominbeta.sernageomin.cl/share/5f0f14127e649>
- Strahler, A. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913-920.
- Tapia, F. (2015). *Evolución tectónica y configuración actual de los Andes Centrales del sur (34°45'S-35°30'S)*. (Tesis para optar al grado de doctor en ciencias, mención geología), Universidad de Chile, Región Metropolitana. Retrieved from <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/133232>
- Valenzuela, D. y Pino, S. (2022). *CAPACITACIONES PARA MUNICIPIOS EN TEMAS DE PELIGROS DE PELIGROS GEOLÓGICOS - REMOCIONES EN MASA. MANUAL INSTRUCTOR E INSTRUCTORA*.
- Varnes, D. (1978). Slope movement types and processes. In *Special report* (Vol. 176, pp. 11-33).

## Anexo

### Anexo I: Eventos de Remoción en masa del sector sur de la Región de O'Higgins.

Código Evento	Tipo de Remoción	Litología	Gatillante	Coordenada Este (X)	Coordenada Norte (Y)	Fuente	Observación
0	1	5	SISMO 27F	395817.8275	6190001.579	Serey et al. (2019)	-
1	1	5	SISMO 27F	395633.5044	6189924.874	Serey et al. (2019)	-
2	5	1	SISMO 27F	289109.7286	6167799.982	Serey et al. (2019)	-
3	5	8	SISMO 27F	221556.7883	6185999.728	Serey et al. (2019)	-
4	5	9	SISMO 27F	222641.809	6180480.095	Serey et al. (2019)	-
5	5	1	SISMO 27F	227430.6352	6173959.572	Serey et al. (2019)	-
6	5	1	SISMO 27F	300138.8912	6166935.529	Serey et al. (2019)	-
7	5	1	SISMO 27F	301056.0257	6166955.318	Serey et al. (2019)	-
8	4	3	SISMO 27F	368922.7927	6152492.917	Serey et al. (2019)	-
9	4	3	SISMO 27F	372183.1043	6154002.468	Serey et al. (2019)	-
10	4	3	SISMO 27F	369094.5152	6152211.059	Serey et al. (2019)	-
11	4	3	SISMO 27F	368934.8684	6152410.005	Serey et al. (2019)	-
12	4	3	SISMO 27F	368894.1262	6152545.199	Serey et al. (2019)	-
13	4	3	SISMO 27F	368933.8615	6152731.124	Serey et al. (2019)	-
14	4	1	SISMO 27F	368901.2699	6153013.744	Serey et al. (2019)	-
15	4	3	SISMO 27F	369501.606	6153204.09	Serey et al. (2019)	-
16	4	3	SISMO 27F	369756.9564	6153422.906	Serey et al. (2019)	-
17	4	3	SISMO 27F	370159.1588	6153396.313	Serey et al. (2019)	-
18	4	3	SISMO 27F	370688.7935	6153734.776	Serey et al. (2019)	-
19	4	3	SISMO 27F	370851.8874	6153830.245	Serey et al. (2019)	-
20	4	3	SISMO 27F	371642.8256	6153995.612	Serey et al. (2019)	-
21	4	3	SISMO 27F	370944.57	6153782.627	Serey et al. (2019)	-
22	4	1	SISMO 27F	369105.0267	6154560.296	Serey et al. (2019)	-
23	4	1	SISMO 27F	369391.4013	6154647.005	Serey et al. (2019)	-
24	4	2	SISMO 27F	373336.1403	6176930.038	Serey et al. (2019)	-
25	4	3	SISMO 27F	381832.2668	6142266.268	Serey et al. (2019)	-
26	4	1	SISMO 27F	377967.355	6142038.022	Serey et al. (2019)	-
27	4	2	SISMO 27F	387977.2215	6179279.318	Serey et al. (2019)	-
28	4	2	SISMO 27F	369956.3166	6181056.998	Serey et al. (2019)	-
29	3	2	SISMO 27F	370075.7808	6180624.193	Escobar (2013)	-
30	4	2	SISMO 27F	370496.2722	6186057.851	Serey et al. (2019)	-
31	4	2	SISMO 27F	370543.9903	6185712.224	Serey et al. (2019)	-
32	4	2	SISMO 27F	370840.351	6184973.07	Escobar (2013)	-
33	4	1	SISMO 27F	369936.5318	6184792.535	Escobar (2013)	-
34	4	2	SISMO 27F	370222.0596	6184488.832	Serey et al. (2019)	-
35	4	1	SISMO 27F	370174.7748	6186796.644	Serey et al. (2019)	-
36	2	2	SISMO 27F	340784.9281	6176122.376	Escobar (2013)	-
37	3	7	SISMO 27F	306713.2665	6171127.423	Escobar (2013)	-
38	3	7	SISMO 27F	309157.7745	6176379.064	Escobar (2013)	-
39	3	9	SISMO 27F	220494.1472	6161404.123	Escobar (2013)	-

40	2	9	SISMO 27F	221101.7379	6164443.534	Escobar (2013)	-
41	2	1	SISMO 27F	256471.784	6166553.769	Escobar (2013) y Vialidad	-
42	2	1	SISMO 27F	302064.815	6166893.083	Escobar (2013) y Vialidad	-
43	2	5	SISMO 27F	303338.7769	6167447.915	Escobar (2013) y Vialidad	-
44	2	3	SISMO 27F	327824.0716	6160764.339	Escobar (2013) y Vialidad	-
45	4	2	Pp Ene. 2021	315538.3026	6189950.752	Romero (2021)	-
46	4	5	Pp Ene. 2021	315648.7522	6189792.053	Romero (2021)	-
47	4	5	Pp Ene. 2021	315678.0284	6189743.927	Romero (2021)	-
48	4	5	Pp Ene. 2021	315801.2259	6189456.935	Romero (2021)	-
49	4	1	Pp Ene. 2021	315762.3834	6189226.22	Romero (2021)	-
50	4	1	Pp Ene. 2021	320878.0077	6188800.584	Romero (2021)	-
51	3	5		320954.7847	6188310.511	Puntos Programa Invierno	-
52	2	1	SISMO 27F	231488.0223	6161469.995	Portatgeominbeta	En la ruta I-72, se produjeron numerosas remociones.
53	2	3	SISMO 27F	327309.0406	6161975.947	Portatgeominbeta	Provocó corte de ruta con rocas de hasta 1 m <sup>3</sup> de tamaño.
54	3	2	SISMO 27F	347888.9632	6150351.822	Portatgeominbeta	Provocó el corte del camino.
55	3	1	Pp sep 2021	379062.6954	6180066.932	Municipalidad de Palmilla (2021)	-
56	4	3	Pp abr. 2016	355853.0894	6146076.954	Principales desastres ocurridos en Chile desde 1980, SERNAGEOMIN (s.f)	Corte de ruta
57	4	2	Pp abr. 2016	366412.0267	6133472.247	Principales desastres ocurridos desde 1980 en Chile, SERNAGEOMIN (s.f)	Corte de ruta
58	2	2	SISMO 27F	348230.0088	6150079.978	Contreras et Al (2010)	Las rocas son de hasta 1 m <sup>3</sup> o inferiores
59	2	3	SISMO 27F	357070.4614	6144643.295	Contreras et Al (2010)	Con rocas de hasta 1,5 m <sup>3</sup>
60	4	2	SISMO 27F	387798.8619	6178846.045	Serey et al. (2019)	-
61	4	2	SISMO 27F	388870.5761	6176885.146	Serey et al. (2019)	-
62	3	1	SISMO 27F	336478.1297	6153603.155	Serey et al. (2019)	-
63	3	1	SISMO 27F	336376.3889	6153567.064	Serey et al. (2019)	-
64	3	1	SISMO 27F	336390.7875	6153565.878	Serey et al. (2019)	-
65	3	1	SISMO 27F	340864.8609	6148611.201	Serey et al. (2019)	-
66	3	2	SISMO 27F	341489.2895	6149960.641	Serey et al. (2019)	-
67	3	2	SISMO 27F	341615.7983	6150730.436	Serey et al. (2019)	-
68	3	2	SISMO 27F	339365.1412	6190225.796	Serey et al. (2019)	-
69	4	2	SISMO 27F	388845.5084	6177184.753	Serey et al. (2019)	-
70	4	2	SISMO 27F	390523.3009	6190241.842	Serey et al. (2019)	-
71	3	2	SISMO 27F	389026.4241	6190248.081	Serey et al. (2019)	-
72	3	2	SISMO 27F	388785.1246	6189459.068	Serey et al. (2019)	-
73	3	2	SISMO 27F	362937.6211	6175441.814	Serey et al. (2019)	-
74	3	1	SISMO 27F	371329.8799	6170480.043	Serey et al. (2019)	-
75	3	2	SISMO 27F	373585.8944	6173653.756	Serey et al. (2019)	-
76	3	2	SISMO 27F	373761.4009	6173345.24	Serey et al. (2019)	-
77	3	2	SISMO 27F	372395.5165	6178085.02	Serey et al. (2019)	-
78	4	5	SISMO 27F	382535.5113	6140803.379	Serey et al. (2019)	-
79	3	5	SISMO 27F	376405.9592	6130958.042	Serey et al. (2019)	-
80	3	2	SISMO 27F	344848.2207	6150772.263	Serey et al. (2019)	-

81	3	5	SISMO 27F	379812.2274	6141195.433	Serey et al. (2019)	-
82	3	5	□SISMO 27F	379843.3149	6141257.958	Serey et al. (2019)	-
83	3	2	□SISMO 27F	334022.9707	6178625.561	Serey et al. (2019)	-
84	3	2	SISMO 27F	349311.9053	6163034.514	Serey et al. (2019)	-
85	3	2	□SISMO 27F	349232.8559	6163912.167	Serey et al. (2019)	-
86	3	2	SISMO 27F	349620.586	6163514.797	Serey et al. (2019)	-
87	3	2	SISMO 27F	352600.7756	6164641.483	Serey et al. (2019)	-
88	3	2	SISMO 27F	345110.1593	6149287.857	Serey et al. (2019)	-
89	3	2	SISMO 27F	353874.0809	6146346.33	Serey et al. (2019)	-
90	3	5	SISMO 27F	379846.2881	6141003.429	Serey et al. (2019)	-
91	3	1	SISMO 27F	377425.8944	6142077.493	Serey et al. (2019)	-
92	1	2	SISMO 27F	349767.932	6137210.178	Serey et al. (2019)	-
93	3	5	SISMO 27F	376457.3918	6130869.11	Serey et al. (2019)	-
94	3	2	SISMO 27F	367093.4435	6152341.198	Serey et al. (2019)	-
95	3	2	SISMO 27F	366538.1917	6152122.947	Serey et al. (2019)	-
96	3	3	SISMO 27F	371099.3002	6153867.547	Serey et al. (2019)	-
97	1	3	SISMO 27F	372372.1043	6154145.856	Serey et al. (2019)	-
98	3	2	SISMO 27F	351685.3929	6128797.512	Serey et al. (2019)	-
99	3	2	SISMO 27F	349901.2416	6134473.917	Serey et al. (2019)	-
100	3	2	SISMO 27F	350333.9358	6135666.851	Serey et al. (2019)	-
101	3	2	SISMO 27F	350278.8808	6135674.825	Serey et al. (2019)	-
102	3	2	SISMO 27F	350234.5776	6136532.998	Serey et al. (2019)	-
103	3	2	□SISMO 27F	349695.5367	6137193.679	Serey et al. (2019)	-
104	3	2	SISMO 27F	349624.5746	6137740.669	Serey et al. (2019)	-
105	3	2	SISMO 27F	349248.7865	6137646.509	Serey et al. (2019)	-
106	3	2	SISMO 27F	348528.5812	6138850.081	Serey et al. (2019)	-
107	3	2	SISMO 27F	348574.1463	6138554.956	Serey et al. (2019)	-
108	1	2	SISMO 27F	346857.9224	6143839.93	Serey et al. (2019)	-
109	3	2	SISMO 27F	346874.6496	6143282.066	Serey et al. (2019)	-
110	3	2	SISMO 27F	345232.0524	6143912.255	Serey et al. (2019)	-
111	3	2	SISMO 27F	345677.0041	6144650.193	Serey et al. (2019)	-
112	3	2	SISMO 27F	345407.3086	6143625.21	Serey et al. (2019)	-
113	3	2	SISMO 27F	366758.1745	6152002.453	Serey et al. (2019)	-
114	3	2	SISMO 27F	350200.6226	6136597.23	Serey et al. (2019)	-
115	3	2	SISMO 27F	351777.0792	6144708.43	Serey et al. (2019)	-
116	3	1	-	318717.0256	6185228.437	Terreno 03/11/2021	Remoción de 20 m <sup>2</sup> , espesor 1 m aprox.
117	3	1	-	318716.0884	6185227.453	Terreno 03/11/2021	Remoción de 15 m <sup>2</sup> , espesor 1 m aprox.
118	3	1	-	318715.0884	6185227.453	Terreno 03/11/2021	Remoción de 20 m <sup>2</sup> , espesor 1 m aprox.
119	2	1	-	311594.9035	6186844.494	Terreno 03/11/2021	Remoción de 10 m <sup>2</sup> , espesor 1 m aprox.
120	2	1	-	311592.9034	6186843.494	Terreno 03/11/2021	Remoción de 40 m <sup>2</sup> , espesor 1 m aprox.

Anexo I.a: Definición de los códigos referentes al anexo I.

<b>Código</b>	<b>Unidades Geológicas</b>	<b>Tipo de Remoción</b>
1	Depósitos Cuaternarios	Avalancha de Detritos
2	Rocas Volcánicas y Volcanosedimentarias del Paleógeno-Neógeno	Caida de Rocas
3	Rocas Intrusivas del Cenozoico	Deslizamiento de Detritos
4	Rocas Sedimentarias del Cenozoico	Flujo de Detritos
5	Rocas Volcanosedimentarias del Mesozoico	Licuefacción
6	Rocas Sedimentarias del Mesozoico	
7	Rocas Intrusivas del Mesozoico	
8	Rocas Intrusivas del Paleozoico	
9	Rocas Metamórficas del Paleozoico	