



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

INVENTARIO DE REMOCIONES EN MASA DESENCADENADAS POR EL SISMO
DEL 27 DE FEBRERO DE 2010 EN CHILE CENTRAL.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

PAULA ELIZABET ESCOBAR LOYOLA

PROFESOR GUÍA:
SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS
MARISOL LARA CASTILLO

SANTIAGO DE CHILE
2013

Resumen

Este trabajo tiene por objetivo generar un inventario de remociones en masa entre los 32.8° y 38.5° latitud S, desencadenadas por el sismo de magnitud Mw 8.8 en la zona central de Chile, ocurrido el 27 de Febrero de 2010, y analizar su distribución areal y por tipo.

Los datos de ubicación del inventario se obtuvieron mediante dos formas: i) Recopilación de información de los eventos de remoción en masa registrados en la Zona Central de Chile, entre los $32,8^\circ$ y $38,5^\circ$ latitud Sur y ii) Identificación de remociones en masa mediante interpretación de imágenes satelitales de la zona occidental (Planicie Litoral y Cordillera de la Costa) de la zona indicada anteriormente.

Se han inventariado un total de 290 eventos. Los más abundantes son los deslizamientos superficiales (118) y caídas de roca (55), seguidos por las extensiones laterales (51). En menor medida se observaron deslizamientos rotacionales (8), procesos de remoción en masa mixta (4) y un flujo de barro. No fue posible clasificar cincuenta y tres remociones en masa, por lo que se agruparon como indiferenciadas. Las remociones en masa generada por el terremoto de 2010 se concentran en el relieve de la Cordillera de la Costa y acantilados costeros, en un rango de distancia al área de ruptura que varía entre 21 a 85 km en la zona occidental, existiendo registros en la Cordillera Principal a 113 km del área de ruptura, con una media de 40 km considerando el área completa. La distribución geográfica de las remociones se encuentra dentro de lo esperado dado un sismo de magnitud 8.8, donde los deslizamientos disgregados se ubican en un área más extensa que las extensiones laterales. La correlación con las intensidades sísmicas muestra que a mayor intensidad mayor densidad de remociones en el área, sin embargo no explica la alta concentración en la península de Arauco y Cordillera de Nahuelbuta donde se ubican un tercio de las inestabilidades registradas. Existen condiciones geológicas, tectónicas y morfológicas que hacen a esa zona más propensa a la generación de remociones.

En la zona occidental, las rocas sedimentarias del Paleógeno-Neógeno muestran la mayor cantidad de remociones por kilómetro cuadrado, seguidas por las rocas metamórficas donde ocurren la mayoría de los deslizamientos superficiales. En rocas intrusivas se registraron la mayor cantidad de remociones, siendo la litología predominante en la generación de caídas de rocas. Las extensiones laterales se dieron en sedimentos poco a no consolidados en las riberas de ríos y esteros en zonas planas.

Los resultados de este estudio, señalan factores que condicionan el fallamiento de laderas frente a un sismo de subducción de gran magnitud y extensa área de ruptura en la zona costera y por tanto puede contribuir a predecir inestabilidades de ladera ante futuros grandes sismos de subducción en otras zonas del país.

A mi familia

Agradecimientos

Quiero agradecer a la vida por tener la posibilidad de existir. Porque tenemos una oportunidad de experimentar, de vivir, de disfrutar y de cuestionarnos lo que se nos presenta.

Mis agradecimientos a las personas que me han acompañado en este proceso, en especial a mis padres los cuales me han dejado siempre elegir mi camino, sin recriminaciones, apoyándose siempre, sea cual sea mi decisión. A mis hermanas que siempre me enseñan cosas de la vida práctica y que con nuestros temporales conflictos me dan un empuje hacia adelante.

A mi profesor guía Sergio Sepúlveda por sus oportunos consejos, por contestar prontamente mis dudas. Al resto de la comisión también.

Doy las gracias retroactivas a Rodrigo González por todos los momentos que me acompañó y ayudó, durante mis anteriores estudios y ahora. Por toda esa garra que pone en las cosas que hace y por ser en muchos sentidos un ejemplo de persona.

A toda la gente que contribuyó con su información, gestiones o conversaciones al desarrollo del presente trabajo. Por nombrar a algunos a Violeta, Jorge, María Teresa y Claudia. A Blanca, quien siempre se las ha arreglado para ayudarme en todos esos trámites que son necesarios hacer, también a las tías de la biblioteca, con las que mantuve interesantes conversaciones y en el caso de Gloria alcanzamos un lazo de amistad.

A mis compañeros en la oficina de memoristas que compartieron conmigo la experiencia de realizar un trabajo, a veces solitario, como es la memoria de título: a Marie, Rayén, Quiroga, Tania, Andrés, Rurik y todos los que ahora están en estas lides.

A mis amigos que conocí en geología, Pablo, Daniela, David, Juan y Diego, por estar, por hacerme sentir querida y estimada. A Pedro que le da mucha alegría a mi vida y que he tenido la suerte de conocer y reconocer. Daniela y Pedro gracias por su reggaeton inolvidable, quedamos en que se los agradecería y cómo no.

En fin, gracias a toda la gente que a lo largo de estos años se ha cruzado en mi camino, entregándome algo de su sabiduría y empatía.

Tabla de contenido

Tabla de contenido	iv
Índice de tablas	vi
Índice de ilustraciones	vii
1. Introducción	1
1.1. Formulación del estudio Propuesto	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General:	3
1.2.2. Objetivos Específicos:	3
1.3. Metodología general	4
1.4. Ubicación Zona de Estudio	4
2. Antecedentes	6
2.1. Marco Morfotéctonico	6
2.1.1. Generalidades	6
2.2. Marco geomorfológico	8
2.3. Altitud, Pendiente y Orientación de las laderas	9
2.4. Marco Geológico	13
2.4.1. Litología	13
2.4.2. Estructuras	19
2.5. Hidrografía	23
2.6. Clima	25
2.7. Vegetación	25
3. Terremoto Mw 8.8 del Maule	26
3.1. Características sismogénicas	26
3.2. Deformación de la corteza, movimientos cosísmicos	28
3.3. Características del sismo	31
3.4. Réplicas del terremoto del Maule	33
3.5. Maremoto	36
4. Análisis de Remociones en masa generadas por el terremoto del 2010.	38
4.1. Recopilación de eventos registrados	38
4.2. Mapeo a través de imágenes satelitales	39
4.2.1. Metodología	39

4.3. Catastro de remociones en masa gatilladas por el sismo del 27 de Febrero del 2010	43
4.3.1. Deslizamientos superficiales	45
4.3.2. Caídas de roca - desprendimientos (CR)	50
4.3.3. Deslizamientos rotacionales (DrSR)	51
4.3.4. Remociones en masa mixtas (PRMi)	52
4.3.5. Extensiones Laterales (EL)	53
4.3.6. Flujo de Barro (FB)	55
4.3.7. Remociones en masa indiferenciada (D)	56
4.4. Análisis de la distribución espacial de las remociones en masa	56
4.5. Análisis de los factores condicionantes.	61
4.5.1. Relación entre litología y ocurrencia de remociones en masa.	63
4.5.2. Orientación y pendiente de las laderas donde se generaron remociones en masa.	68
4.5.3. Posición relativa de las remociones en masa en las laderas.	70
5. Discusiones, Conclusiones y Recomendaciones	73
5.1. Discusiones	73
5.1.1. Distribución de las remociones	73
5.1.2. Amplificación topográfica.	75
5.1.3. Clasificación de las remociones en masa desencadenadas por el terremoto. Escala de trabajo y factores condicionantes.	76
5.1.4. Imágenes satelitales.	78
5.1.5. Área y número de remociones	79
5.1.6. Completitud del inventario.	80
5.2. Conclusiones y Recomendaciones.	81
Bibliografía	83
A. Inventario RM. Sismo del Maule	93
B. Factores condicionantes relevantes para cada tipo de remociones en masa	101
C. Valores de propiedades geotécnicas para rocas y suelos según literatura Resistencia Matriz de Roca Sana	102
D. Rutinas Matlab.	105

Índice de tablas

3.1. Estaciones sísmológicas que registraron 27 de Febrero del 2010 el terremoto del Maule. Extraído de (JST-JICA-SATREPS, 2010)	32
4.1. Catastro de remociones en masa identificadas y/o recopiladas.	45
4.2. Remociones en masa de mayor área. Ver Anexo A.	57
B.1. Fuente: (Lara, 2007).	101

Índice de ilustraciones

1.1. Ubicación de la Zona de Estudio. En imagen de la derecha: área achurada corresponde a la zona que fue examinada a través de imágenes satelitales.	5
2.1. Esquema de la subducción chilena y los tipos de sismos que ella genera	6
2.2. Esquema de la configuración en la zona de contacto entre placa de Nazca y placa Sudamericana.	7
2.3. Principales unidades morfoestructurales en la zona de estudio. Basado en Melnick (2007) y Farías y otros (2010)	8
2.4. Mapa de altitud de la zona de estudio	10
2.5. Mapa de orientación de laderas de la zona de estudio	11
2.6. Mapa de pendiente de la zona de estudio	12
2.7. Mapa litológico simplificado. Modificado de SERNAGEOMIN (2003)	14
2.8. Síntesis tectónica regional del área del Bloque de Arauco. Se observa la configuración de las principales estructuras y unidades tectónicas. En la cordillera de los Andes el Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui (SFLO) se alinea con el arco volcánico. Estructuras corticales NW-SE cortan la Cordillera de la Costa; ZFMV: Zona de Falla Mocha-Villarrica; ZFL: Zona de Falla Lanalhue. El talud continental y la fosa están muy disectadas por estructuras NW-SE. Tomado de Moreno (2004).	22
2.9. Hidrografía entre los 32°y 40°S. El mapa muestra los principales ríos de la zona de estudio. Instituto Geográfico Militar (IGM).	24
3.1. Gap Sísmico Concepción - Constitución	27
3.2. Modelo sismogénico del terremoto del Maule JST-JICA-SATREPS (2010)	27
3.3. Comparación entre los alzamientos y subsidencia costero y la altura del maremoto a lo largo de Chile centro-sur. Fuente: Vargas y otros (2011)	28
3.4. El máximo desplazamiento horizontal en esta figura alcanza a 5 m en el extremo de la península de Arauco y cerca de Constitución; 3.7 m en la ciudad de Concepción (Proyecto CAP, Bevis et al). Para la ciudad de Constitución, C. Vigny (en Barrientos (2010)) reporta 4.7 m de desplazamiento horizontal. Tomado de Vignyy otros (2011)	29
3.5. Interferograma que revela la deformación de la corteza asociada a la falla que se activó el 27 de Febrero de 2010.	30
3.6. Acelerogramas de las estaciones sismológicas disponibles. Obtenida de Saragoni y Ruiz (2012).	33

3.7.	Intensidades e isosistas en la zona de daño del terremoto del 27 de Febrero del 2010. Tomado de (Astroza y otros, 2012)	34
3.8.	Réplicas con magnitud mayor a 4.7 y la zona de ruptura asociada al terremoto del Maule, hasta el 4 de abril del 2010. Tomado de (Barrientos, 2010)	35
3.9.	Registro del maremoto en 12 estaciones mareográficas a lo largo de la costa de Chile	36
4.1.	Cobertura de los mapas geológicos usados para refinar los datos litológicos. La cobertura del mapa de Escobar y otros (1977) es aproximada.	41
4.2.	Esquema de la distancia entre una RM registrada y el área de ruptura de un sismo.	42
4.3.	Distribución por tipo y área de las remociones en masa inducidas por el sismo del Maule. El epicentro corresponde al entregado por el SSN corregido y el área de ruptura a la indicada por Vignyy otros (2011).	44
4.4.	Dos deslizamientos en Curanilahue, Octava Región. Deslizamiento rotacional en la parte central de la imagen, donde se aprecia el escarpe de esta nueva remoción en la parte SW de una antigua remoción. Deslizamiento traslacional en la zona inferior SW, que se destacó en la imagen encerrandola en un círculo rojo. Imagen extraída de <i>Google Earth</i> , sitios 87 y 201 del Anexo A.	46
4.5.	Uno de los deslizamientos de mayor área inventariado en la zona de estudio, cerro Doñihue, Sexta Región. Imagen satelital de Google Earth pre y post sismo.	47
4.6.	Deslizamiento de suelo y roca en Puertecillo, Navidad. Visita terreno	48
4.7.	Deslizamiento de suelo y roca en Zona Río Rapel, Navidad. Visita a Terreno.	48
4.8.	a) y b) Deslizamiento de roca en Caleta Cocholgüe. Fotografía tomada por Aguilera (comunicación personal); c) Deslizamiento de roca en Caleta Lo Bages. Planos de debilidad en lo alto de la ladera paralelos a la ladera. Fotografía obtenida de Sepúlveda y Espinoza (2010b)	49
4.9.	Caída de roca en calle Alto Horno, Villa Huachicoop, Talcahuano; sitio 167 del Anexo A. Fotografía obtenida de Blanco y Creixell (2010b)	50
4.10.	Caída de roca sobre roca sedimentaria meteorizada en Población Gerdarme Aguilera, Coronel; sitio 166 del Anexo A. Bloque mayor alcanza un diámetro de 1 metro. Fotografía obtenida de Blanco y Creixell (2010a)	51
4.11.	Deslizamiento rotacional en caleta Tumbes. Fotografía sacada de Blanco y otros (2010b)	52
4.12.	Proceso de remoción en masa mixto que involucra a un deslizamiento que termina como un flujo de barro. Fotografía facilitada por Diego Aguilera (comunicación personal).	53
4.13.	Procesos de remoción en masa mixto. Cordillera de Nahuelbuta, comuna de Los Alamos, Octava Región. Imagen extraída de <i>Google Earth</i> , sitio 84 del Anexo A	53
4.14.	Comparación entre los registros de: a) Verdugo y otros (2012) b) Duhart y otros (2010a) en las riberas del río Lebu. Imágenes extraídas de <i>Google Earth</i>	54
4.15.	Extensiones laterales que muestran movimientos de componentes rotacionales y traslacionales de los bloques. Ribera del río Lebu, sitio 183 del Anexo A. Fotografía obtenida de Duhart y otros (2010a)	54

4.16. Flujo de barro en ladera oeste estero Ranquilco, Los Alamos, sitio 136 del Anexo A. Imagen obtenida de base de datos de imagenes de Arcgis	55
4.17. Mapa con el modelo de deslizamiento de la zona de falla de Lorito y otros (2011). En triángulos rojos las RM identificadas en este estudio.	58
4.18. Área de las remociones en masa vs distancia a la superficie de ruptura.	59
4.19. Comparación con las curvas para el área afectada por remociones en masa desencadenadas por sismos confeccionadas por Keefer (1984) y Rodríguez y otros (1999) en base a recopilación de eventos a nivel mundial.	60
4.20. Comparación de las curvas de Keefer (1984). Imagen superior extraída de Wick y otros (2010), muestra la distancia máxima a la proyección del plano de falla de deslizamientos disgregados (caídas de rocas), en ruta nacional 7, Argentina. Imagen inferior modificada de Keefer (1984), el punto rojo indica la máxima distancia al plano de falla calculado en este trabajo.	61
4.21. Mapa de la distribución de las remociones en masa por tipo, junto con factores con los que se puede correlacionar su ocurrencia.	62
4.22. Cantidad (barra) y densidad (línea) de remociones en masa entre cada isosista.	63
4.23. Arriba: Gráfico circular representa el porcentaje de área cubierta por cada litología. Abajo: Número de remociones en masa registradas de acuerdo a cada tipo de litología; los gráficos de líneas indican la concentración de RM según litología, considerando todos los tipos de remociones (línea azul) y sin las extensiones laterales (línea burdeo).	64
4.24. Gráfico del número de remociones en masa vs la litología, para cada tipo de RM.	66
4.25. Remoción en masa en Lumaco, IX Región. a) Deslizamiento suelo y rocas en Lumaco. Línea cortada indica corona, salto (1.5 m) y su traslación (flecha) b) Plano de falla en rocas metamórficas de rumbo N20°E y manteo subvertical. Se indica con línea cortada su traza principal. Fotografías sacada de Duhart y otros (2010b)	66
4.26. Gráfico del número de remociones en masa versus la pendiente de la ladera donde se producen, para cada tipo de RM. Se utilizaron los rangos de pendiente de acuerdo a tablas para calcular la susceptibilidad de la ladera a RM (Lara, 2007).	69
4.27. Gráfico del número de remoción en masa versus la orientación de la ladera donde se producen. Norte: 1°-45 y 315°-359°; Este: 45°-135°; Sur: 135°-225°; Oeste: 225°-315°.	69
4.28. Esquema indicador de cómo se obtuvieron los valores utilizados en el método propuesto por Meunier y otros (2008). Las distancias se midieron a lo largo de la ladera. Modificado de Serey (2011a).	71
4.29. Posición relativa de las remociones en masa en las laderas. Distancia normalizada entre el escarpe de remoción y la cresta de la ladera versus distancia normalizada entre la base de la remoción y la base de la ladera en que se encuentra en estudio.	71
5.1. Mapa de pendientes del sector que presenta la mayor cantidad de remociones en masa inventariadas. Involucra Cordillera de Nahuelbuta y península de Arauco Se incluyen fallas mapeadas por SERNAGEOMIN (2003)	74

5.2.	Mapa litológico del sector que presenta la mayor cantidad de remociones en masa inventariadas. Involucra Cordillera de Nahuelbuta y península de Arauco.	75
5.3.	Gráfico de latitud versus años de los grandes terremotos históricos en Chile. Las barras negras corresponden a ruptura de los sismos. Modificado de Moreno (2004) Notar que los segmentos S3-S4 y S4-S5 coinciden aproximadamente con las zonas donde se produjeron las asperezas en el sismo M_w 8.8 del Maule . .	76
5.4.	Detalle del mapa geológico de Encinas y otros (2006) en la zona de Navidad. En cuadrado negro se indica ubicación del sitio 30 en Anexo A, deslizamiento de suelo y roca en Puertecillo, comuna de Navidad, región de O'Higgins. . .	78
C.1.	Resistencia a la compresión simple y tracción de matriz de roca sana. Fuente: González y otros (2004) en Muñoz (2013)	103
C.2.	Valores típicos de ángulo de fricción y coeficiente de cohesión. Fuente: González y otros (2004) en Muñoz (2013)	104

Capítulo 1

Introducción

1.1. Formulación del estudio Propuesto

Las remociones en masa (RM) según la definición de [Hauser \(2000\)](#) son procesos de “movilización lenta o rápida de determinado volumen de suelo, roca o ambos, en diversas proporciones, generados por una serie de factores”. Es necesario que exista una diferencia de potencial que induzca a masas rocosas y/o suelo a moverse hacia zonas de menor energía gravitacional, por lo que tienen un carácter descendente.

Por la dinámica de la Tierra, constantemente se están desarrollando desniveles topográficos: alzamientos de cordillera, escarpes de falla e incisiones fluviales; que son contrarrestados por procesos de denudación que son caracterizados por la meteorización, erosión, transporte y sedimentación. Dentro de estos fenómenos denudativos están las RM que ocurren por la configuración de varios factores condicionantes como son calidad de la roca, grado de saturación de la superficie, pendiente y orientación de la ladera, etc. ; y factores gatilladores como sismos, derretimiento abrupto de nieve o intensas lluvias.

Se define peligro natural como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino dentro de un periodo de tiempo especificado en un área dada ([Varnes, 1984](#)). Cercano a zonas de alto relieve como son las montañas, las RM son abundantes. El traslado descendente de volúmenes de roca y/o suelo trae aparejado un potencial erosivo y destructor que puede afectar en gran medida la vida humana e infraestructuras, por lo que las RM forman parte de los llamados peligros geológicos ([Sepúlveda y otros, 2012](#)).

A través de la historia son miles de muertes las que se han producido por desastres asociados a remociones en masas, en todo el mundo. Algunos de los peores desastres han ocurrido en la región andina, como la tragedia ocurrida por un flujo de detritos (lahar) en Armero, Colombia en 1985 que dejó cerca de 22.000 víctimas y la avalancha de roca y hielo más flujo de detritos sucedida en 1970, gatillada por un terremoto en Perú en la localidad de Nevados de Huascarán, que mató a 18.000 personas ([GEMMA, 2007](#)). Pero también han sucedido en algunas regiones de Europa y Asia como las RM producidas inmediatamente después del sismo del 12 de Mayo de 2008 en Wenchuan, China que dejó 20.000 muertos y miles de

damnificados (Shengwen y otros, 2010).

La zona andina con su relieve topográfico abrupto, actividad sísmica y extenso volcanismo, combinada con una meteorización profunda, conllevan a una alta e inusual incidencia de amenazas por movimientos en masa. Los movimientos en masa son procesos importantes en los países andinos y literalmente significan una pesada carga para sus habitantes, ocasionando pérdida de vidas humanas, patrimoniales y económicas (GEMMA, 2007).

Los mecanismo de generación de RM más común son, en primer lugar, las lluvias; y el segundo lugar, los sismos. Fuertes terremotos con frecuencia causan cientos, incluso miles de RM en sólo un evento, incluyendo deslizamientos a gran escala en zonas montañosas (Serey, 2011a). Shengwen y otros (2010), indican que fueron más de 15.000 las remociones en masa desencadenadas por el sismo de Wechuan con Mw 7.9; en el terremoto de Pakistán del 2005, Sato y otros (2007), identificaron en total 2032 RM que se generaron debido a las aceleraciones sísmicas. Estos eventos dejan las laderas inestables por mucho tiempo y proclives a volver a generar remociones frente a posteriores sismos u otros factores desencadenantes.

Keefe (1984) a partir del estudio de 40 terremotos históricos determinó las características, ambiente geológico y peligro de remociones en masa gatillada por sismos. Con esta información se identificaron 14 tipos de remociones asociadas a los sismos estudiados, siendo los tipos más abundantes: caídas de roca, deslizamientos de suelo caóticos y deslizamientos de rocas. En su estudio, Keefe, determinó la magnitud mínima de un sismo para causar tal o cual clase de remoción en masa y distancias máximas a la que estas se generarían respecto a la zona de ruptura. Estos datos referentes a remociones provocadas por terremotos han sido completados y refinados por Rodríguez y otros (1999) y Delgado y otros (2011), permitiendo un mayor entendimiento de estos fenómenos.

Como se sugiere en el Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, PMA:GCA (GEMMA, 2007), es necesario realizar inventarios de las RM en los Andes dada la vulnerabilidad que tiene esta zona frente a este tipo de eventos. Un inventario de procesos de remoción en masa puede ayudar de manera general y puntual a establecer relaciones entre los distintos componentes que influyen en los niveles de riesgo y, por ende, en los desastres ocasionados por estos peligros, y es muy útil en la generación de cartografía temática (Alcántara y Murillo, 1987; Erikson y Högstedt, 2004).

En esa dirección, realizar un inventario de las remociones generadas por el terremoto interplaca que ocurrió el 27 de Febrero de 2010 en Chile, de magnitud Mw 8,8, cobra importancia al existir pocos registros de sismos de esa magnitud. Menores aún son las síntesis de información respecto a distribución y tipo de RM gatilladas por un sismo de este tamaño y tipo. Otro aspecto que hace atractivo estudiar las RM que se gatillaron por este evento telúrico es la gran extensión del área de ruptura del sismo del 27F, que se extiende aproximadamente desde la Península de Arauco por el sur hasta el norte de Pichilemu, cubriendo unos 450 km de longitud en dirección prácticamente norte-sur por un ancho de unos 150 km (Moroni y otros, 2012).

Cuando es necesario mapear una zona a nivel regional como es el caso, la metodología en uso es realizar un estudio mediante imágenes satelitales y/o fotografías aéreas (por ejemplo (Sato y otros, 2007; Shengwen y otros, 2010; Alcántara y Murillo, 1987)) ya que ellas permiten

examinar regiones extensas de forma rápida y económica. Cada tipo de imagen satelital tiene características que la hace adecuada dependiendo de qué se quiere realizar con ella. En [Pérez \(2005\)](#) se dan las especificaciones de cada una de ellas, especialmente de las imágenes LANDSAT, IKONOS y SPOT.

Si bien existen registros de algunas de las RM post terremoto del 2010, realizados por el SERNAGEOMIN y otros centros de investigación ([Jara, 2010](#)), muchos de ellos son preliminares y no se ha realizado un catastro completo que incluya la amplia zona afectada en un solo documento. Con el presente trabajo se pretende colaborar entregando un inventario con datos confiables que permita tener una base sobre la cuál formular planificación urbana, medidas de mitigación y cualquier estudio más profundo que se desee realizar que involucre alguna zona que esté incluida en el área de la presente Memoria. Por otra parte se busca comprender mejor la respuesta que tienen las laderas frente a sismos con la características que presentó el ocurrido el 27F en la zona centro-sur de Chile a través de un análisis de la distribución y tipo de las remociones en masa que gatilló.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General:

Generar un inventario y analizar la distribución areal y por tipo de las remociones en masa provocadas por el sismo del 27 de Febrero de 2010 en la zona comprendida entre Valparaíso y Tirúa (33,0°a 38,5°Latitud Sur), en la zona de la Plataforma Costera y Cordillera de la Costa.

1.2.2. Objetivos Específicos:

- Identificar remociones en masa en el área costera de la zona de estudio interpretando las imágenes satelitales.
- Clasificar las remociones en masa identificadas.
- Generar un inventario donde se incluyan las remociones en masa identificadas anteriormente junto con las recopiladas de informes, artículos científicos y testimonios.
- Encontrar relaciones entre la distribución de las remociones y parámetros del sismo del Maule, tales como intensidad y aceleración sísmica.
- Correlacionar litología, pendiente y orientación de ladera con ocurrencia de remociones en masa.

1.3. Metodología general

Para la realización de este estudio será necesario realizar los siguientes pasos:

- Recopilar información de remociones declaradas que se puedan atribuir al movimiento telúrico del 27 de Febrero del 2010 y a sus réplicas.
- Reconocer remociones en masa en las imágenes satelitales en función de las variaciones que ocurren en superficie en relación a su entorno, tales como vegetación, morfología y drenaje. La escala de trabajo está supeditada a permitir la identificación de las remociones en masa, sin embargo se determinó una escala mínima 1:2000.
- Clasificar las RM según la clasificación modificada de Keefer (1984). Se utilizaron las tablas en Soeters (1996) para caracterizar el tipo de movimiento en base a aspectos visibles morfológicos, de drenaje y vegetacional en las imágenes.
- Analizar la distribución de RM con respecto a la fuente sismogénica y comparar con lo establecido por Keefer (1984).
- Inventariar todas las remociones en masa identificadas, siguiendo una ficha basada en las indicaciones para la generación de un inventario entregadas por GEMMA (2007), pero adaptada de acuerdo a la información recopilable en un estudio a escala regional.

1.4. Ubicación Zona de Estudio

La zona de estudio comprende desde la latitud 33,0°S hasta los 38,5°S, abarcando la mitad sur de la región de Valparaíso, región Metropolitana, región del Libertador B. O'Higgins, región del Maule, región del Biobío y la parte norte de la región de la Araucanía. Abarcando un área de aproximadamente 140.000 Km². Sin embargo, el estudio se enfoca en el área de la Cordillera de la Costa y Planicie Costera, lo que involucra una extensión de alrededor de 53.000 Km².

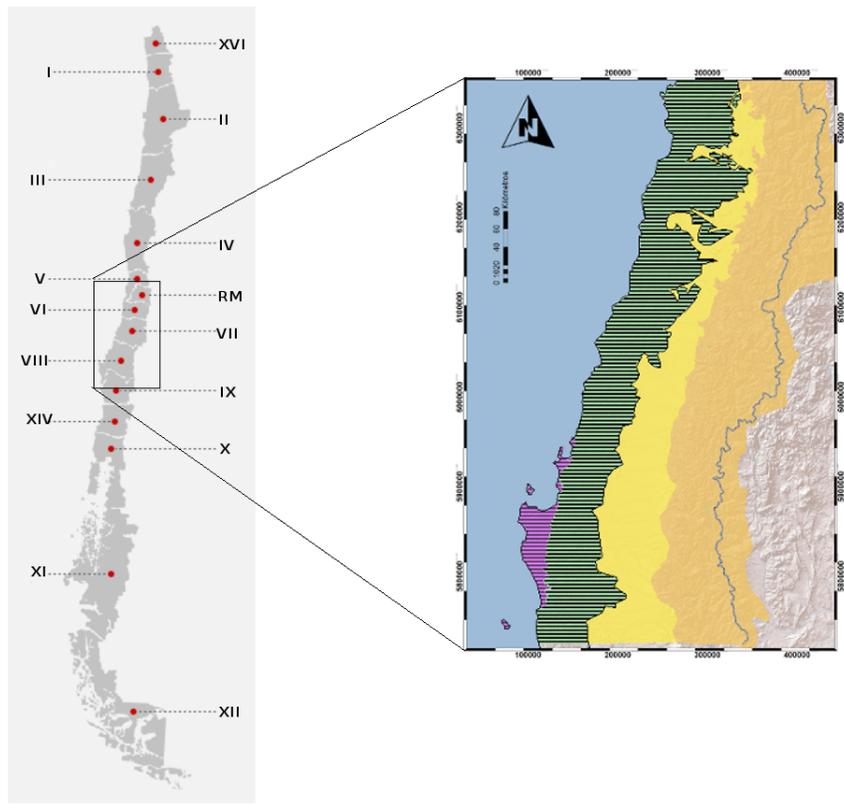


Figura 1.1: Ubicación de la Zona de Estudio. En imagen de la derecha: área achurada corresponde a la zona que fue examinada a través de imágenes satelitales.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Marco Morfotéctonico

2.1.1. Generalidades

La mayor parte del territorio chileno se encuentra ubicado a lo largo de un margen continental activo de subducción, donde la placa oceánica de Nazca está en contacto con la placa continental Sudamericana. La tasa de convergencia promedio entre las placas es de 66 mm/año (Ruiz y Madariaga, 2012).

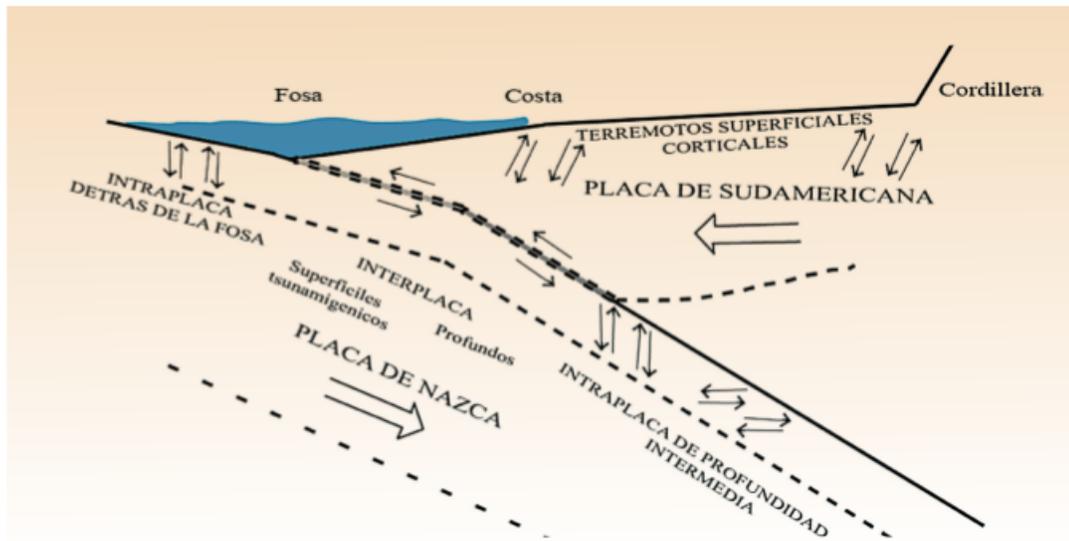


Figura 2.1: Esquema de la subducción chilena, donde se observa la convergencia de la placa de Nazca con la placa Sudamericana y los principales terremotos que ella genera: Intraplaca de profundidad intermedia, terremotos superficiales corticales, Interplaca y sismos detrás de la fosa. Tomado de (Moroni y otros, 2012)

Las fuerzas que actúan sobre la interfase interplaca como en las placas que interaccionan,

producen el llamado acoplamiento sísmico, que puede entenderse como la resistencia a deslizar en la zona de contacto entre ambas. Existe una clara correlación entre el acoplamiento sísmico con la capacidad de generar terremotos, pues si es cercano a 1 indica que toda la deformación es acumulada elásticamente y existe potencial para que se produzca un sismo. Se generan campos de esfuerzos en cada placa tanto como en la zona en que se acoplan ambas, que se pueden liberar de forma sísmica mediante cuatro tipos de sismos que se ilustran en la Figura 2.1 y se detallan a continuación :

Sismos “Costa afuera”: se producen por los esfuerzos extensivos por abombamiento en la placa subductante antes de la zona de contacto. A pesar de tener magnitudes máximas cercanas a $M_w = 6$, prácticamente no causan efectos significativos en zonas pobladas, dada la distancia de su ocurrencia en zonas mar adentro.

Sismos intraplaca de profundidad intermedia: se producen por el fracturamiento tensional de la placa de Nazca al flexurarse antes de descender bajo el continente. Son ejemplos de este tipo de sismos el de Punitaqui 1997, Copiapó 2002, Calama 1950, Tarapacá 2005 y Chillán 1939.

Sismos superficiales intraplaca: son producto del esfuerzo entre placas inducido por la subducción y se encuentra asociado a fallas superficiales en la placa Sudamericana con movimientos normales, inversos o de rumbo, en ambientes extensivos o compresivos (Las Melosas en 1958, Aroma en 2001 y Curicó en 2004).

Sismos interplaca: son los más frecuentes y los mejor descritos en los registros debido a sus características: estos sismos tienen capacidad para generar tsunamis, alzamientos o hundimientos costeros, como también alto daño de obras civiles. El sismo de Tocopilla en 2007 ($M_w 7.8$) dejó en evidencia que pueden ocurrir tanto en la parte alta como inferior del contacto entre placas. Otros eventos de este tipo de sismo son Valdivia 1960, Antofagasta 1995, Valparaíso 1906 y 1985.

En Chile se evidencian toda la gama de sismos, mas en este trabajo nos enfocaremos en los sismos interplaca ya que de este tipo es el sismo del 27 de Febrero del 2010.

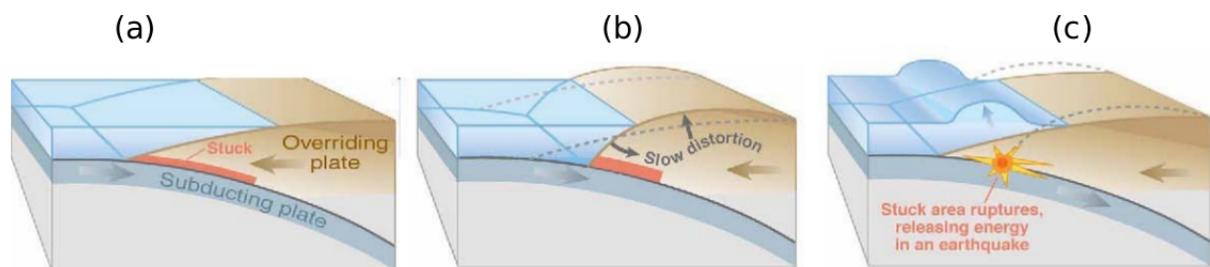


Figura 2.2: Esquema de la configuración en la zona de contacto entre placa de Nazca (subductante) y placa Sudamericana (cabalgante). (a) y (b) muestran una evolución temporal donde se observa como el trabamiento produce una deformación mayormente en la placa cabalgante, hasta que la acumulación de esfuerzos es suficiente para producir el deslizamiento, originando un sismo (c) y la consiguiente “relajación” de las placas, que vuelven a su posición al inicio del ciclo sísmico.

La distancia entre un punto sobre la placa de Nazca y uno sobre la parte estable del continente sudamericano, va disminuyendo con el tiempo a una razón acorde a la tasa de convergencia (entre 6 a 7 cm por año). Sin embargo, en la zona de contacto entre las placas no sucede lo mismo, pues se encuentran trabadas (Figura 2.2).

2.2. Marco geomorfológico

La región de Chile Central se divide en cinco unidades morfoestructurales continentales: Plataforma Costera, Cordillera de la Costa, Depresión Central y Cordillera Principal (Melnick, 2007)

La plataforma costera consiste en secuencias sedimentarias marinas y continentales Cenozoicas exhumadas (Melnick, 2007; SERNAGEOMIN, 2003) y se expresa en la Península de Arauco y zona de Talcahuano.

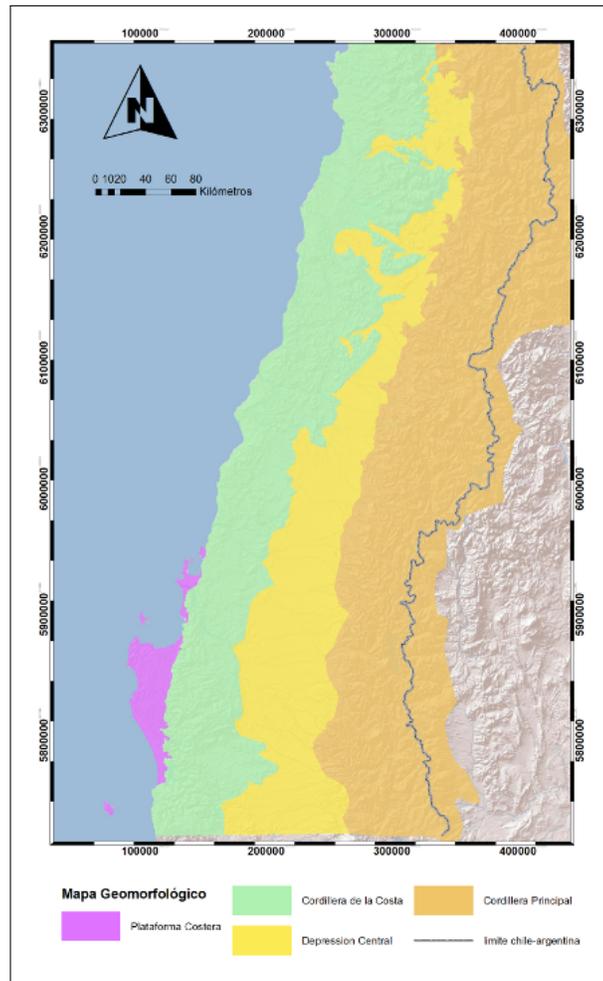


Figura 2.3: Principales unidades morfoestructurales en la zona de estudio. Elaboración propia, basado en Melnick (2007) y Farías y otros (2010)

La Cordillera de la Costa entre los 34°y los 38°S presenta alturas que no sobrepasan los

2.000 m s.n.m. En la proximidad de la costa presenta elevaciones de 100 a 500 m s.n.m. y está constituida por basamento cristalino y metamórfico del Paleozoico (Fariás y otros, 2010). Hacia el este afloran rocas cristalinas del Mesozoico Inferior. En la zona más septentrional se encuentran secuencias continentales, marinas y volcánicas del Triásico Inferior al Cretácico y en la parte sur afloran secuencias y centros volcánicos del Neógeno (37,5°). El relleno cuaternario corresponde a depósitos fluviales, aluviales y eólicos recientes.

La Depresión Central se extiende desde los 33°S hasta los 40°S, corresponde a una cuenca llena de depósitos aluviales pleistocénicos a holocénicos con algunos niveles de depósitos piroclásticos. Se caracteriza por presentar una topografía extremadamente suave (entre 450 y 750 m s.n.m) que es producto del relleno cuaternario, el cual en algunos lugares puede llegar a los 500 m de espesor (Araneda y otros, 2000). Ocasionalmente presenta algunas cumbres en forma de “cerros isla” con alturas que varían entre los 650 y 480 m s.n.m. (Fock, 2005) y cordones que cierran y aíslan esta depresión (angosturas y cuevas) (Fariás y otros, 2010). En la zona oriente el límite de la Depresión Central es abrupto y marcado, limitado por la Cordillera Principal.

La Cordillera Principal es un rasgo geomorfológico mayor, ya que marca un cambio abrupto topográfico con elevaciones que varían desde 500 m s.n.m en el borde occidental con la cuenca de Santiago, hasta sobre los 5000 m s.n.m (Volcán San José) a medida que se avanza hacia el este González (2010) Esta formada por un arco magmático Meso-Cenozoico y una cuenca intraarco volcano-sedimentaria (Melnick, 2007).

2.3. Altitud, Pendiente y Orientación de las laderas

En la Figura 2.4 se muestran las alturas sobre el nivel del mar (s.n.m) de la zona de interés. Las alturas en la Cordillera Principal disminuyen de norte a sur, alcanzando sus máximas alturas en la coordenada 6.300.000 UTM huso 19S aproximadamente, frente a Santiago. En las cumbres de los volcanes Tupungato de 6570 metros, San José de 5856 metros y Maipo de 5264, y el cerro Plomo de 5430 metros. En este mapa se aprecia bien la Cuenca de Santiago, delimitada por el norte por el cordón de Chacabuco y por los cerros de Paine.

Otro rasgo del relieve de la zona son las alturas que alcanza la Cordillera de Nahuelbuta perteneciente a la Cordillera de la Costa en la VIII región, sus alturas están entre 1000 y 1500 metros s.n.m. Se puede observar también que al norte del río Biobío la Cordillera de la Costa tiene sus menores alturas alcanzando a lo más 400 m s.n.m.

Este mapa de altura proviene de un DEM a partir de una imagen satelital ASTER. Usando las herramientas disponibles en el programa ArcGIS se generó un mapa de pendiente (Figura 2.6) y un mapa de orientación de las laderas (Figura 2.5) de la zona entre Viña del Mar y Tirúa.

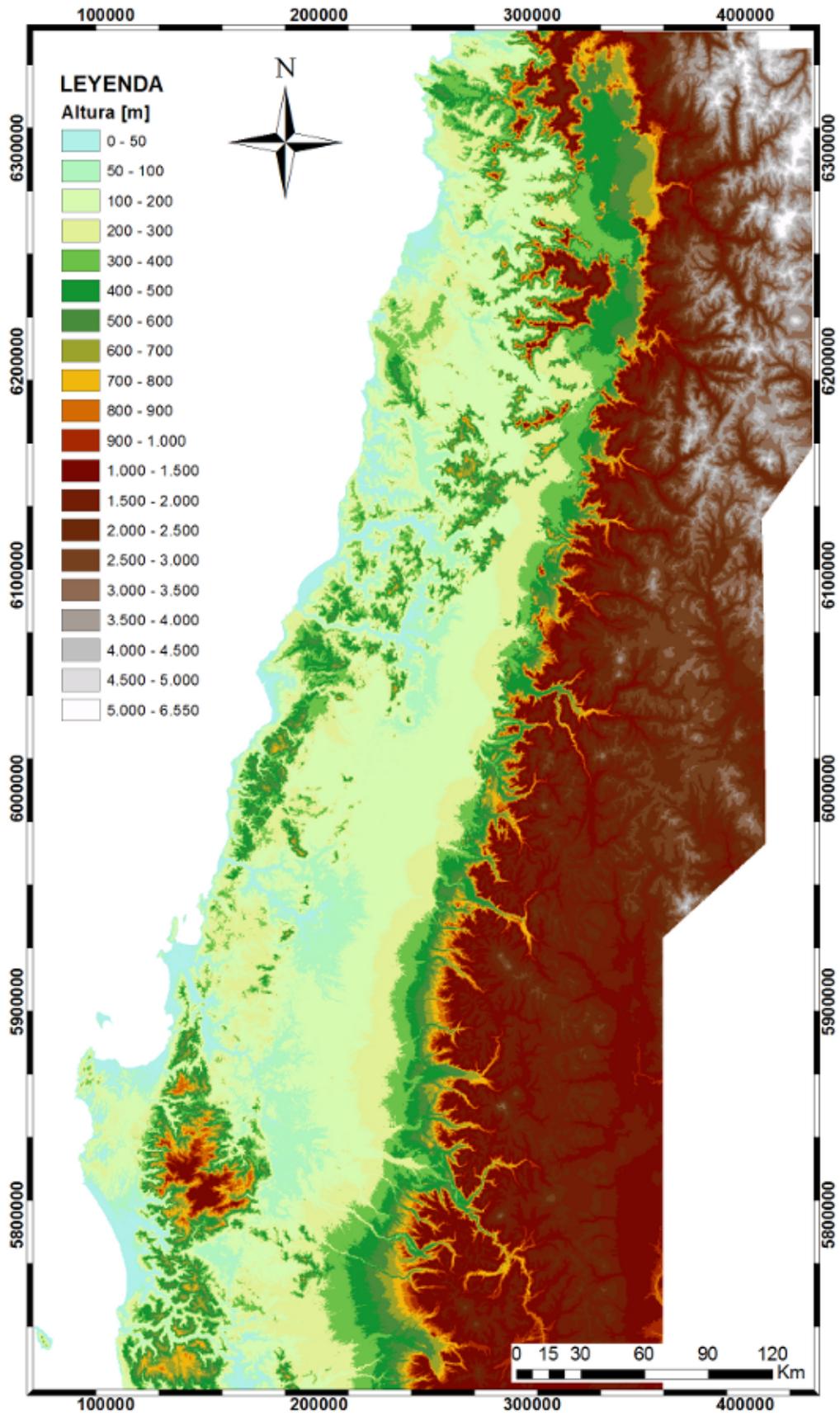


Figura 2.4: Mapa de altitud de la zona de estudio

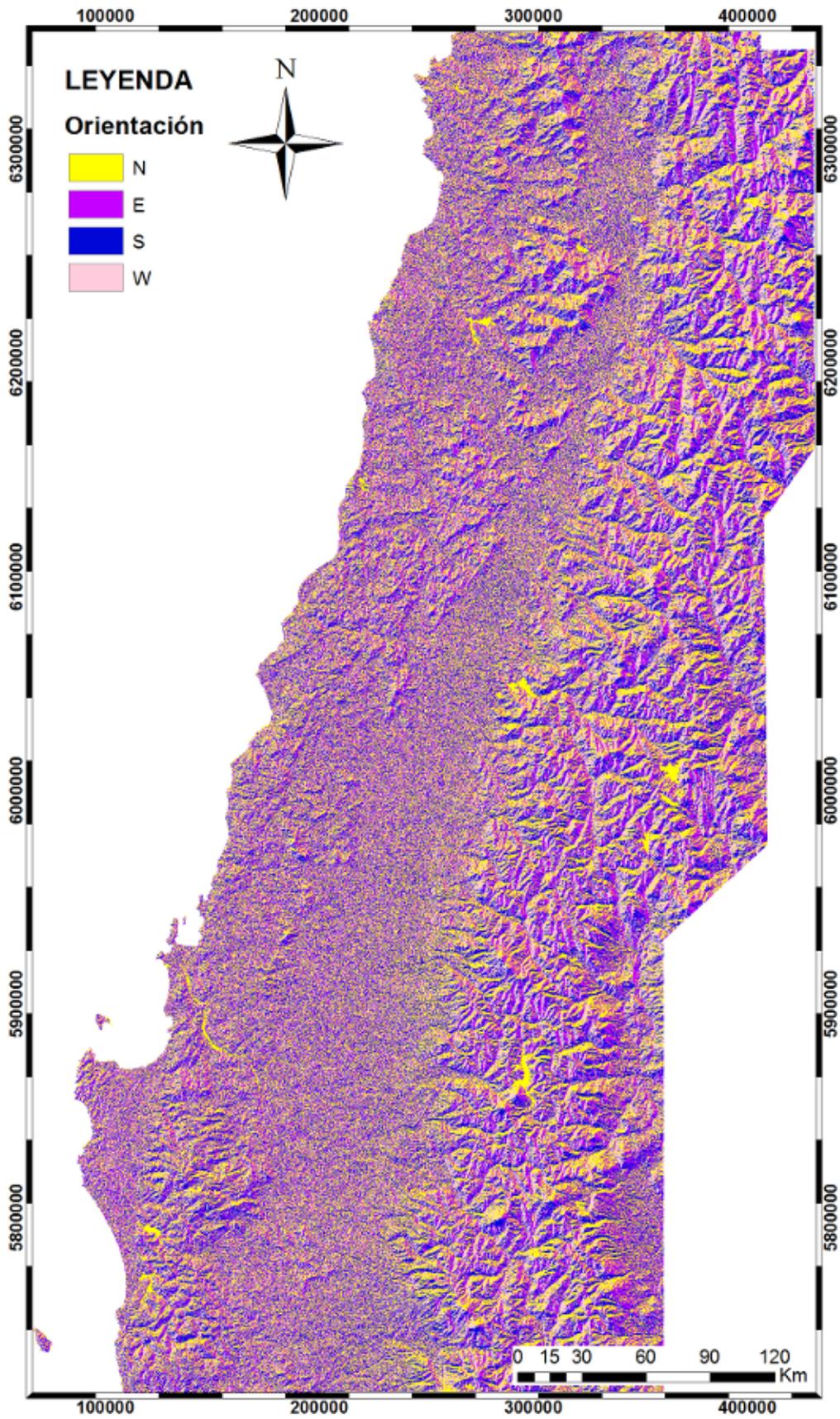


Figura 2.5: Mapa de orientación de laderas de la zona de estudio

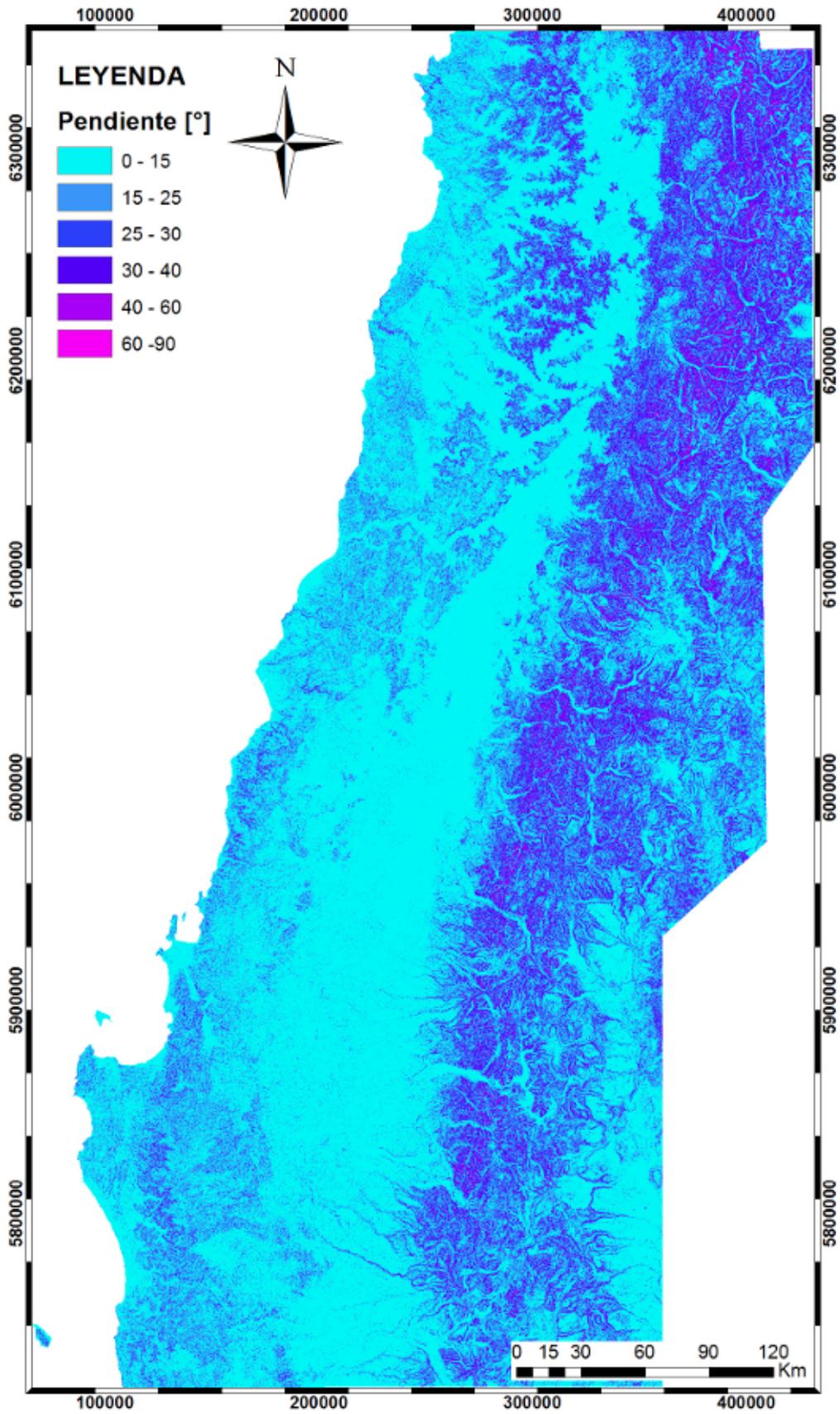


Figura 2.6: Mapa de pendiente de la zona de estudio

2.4. Marco Geológico

La geología comprendida entre los 32.8° y los 38.5° latitud S, a escala regional se caracteriza por mostrar una alineación aproximadamente NS de las unidades litológicas, paralelas al margen de subducción. En la Cordillera de la Costa se encuentran rocas metamórficas que constituyeron un prisma de acreción en el Devónico-Carbonífero y se pueden considerar el esqueleto del sector costero de Chile desde la frontera con Perú hasta los 38°S, además de rocas plutónicas del Carbonífero-Triásico que aparecen en la Cordillera de Nahuelbuta hasta la altura de Valparaíso (38°-33°S) conformando el Batolito Costero de Chile Central.

El marco geológico del área de estudio, dada su escala regional, se basa fundamentalmente en el Mapa Geológico de Chile a escala 1:1.000.000 [SERNAGEOMIN \(2003\)](#).

Las unidades geológicas que se encuentran en la zona de estudio se agrupan de acuerdo al comportamiento geotécnico de la matriz rocosa o depósito.

2.4.1. Litología

Rocas sedimentarias paleógenas - neógenas

Corresponden a secuencias sedimentarias que muestran ciclos de alzamiento y subsidencia de una cuenca marina ([Becerra, 2013](#); [Melnick y otros, 2009](#)). Se encuentran entonces rocas pertenecientes a: depósitos parálicos-continentales [**E1c**] (areniscas, lutitas y mantos de carbón); depósitos marinos [**E1m**] (areniscas y lutitas); depósitos plataformales marinos y transicionales [**M1m** y **MP1m**] (areniscas finas, arcillolitas y limonitas, coquinas, conglomerados, calizas y fangolitas) y a secuencias marinas litorales o fluviales estuarinas [**PP11m** y **PP11c**](coquinas, conglomerados y arenisca) del Pleistoceno.

Se distribuyen en la Plataforma Costera y en la Cordillera de la Costa. Entre Valparaíso y El Tabo afloran en zonas planas e incisiones fluviales que se observan como manchas en la Figura 2.7 que corresponden a depósitos de terrazas marinas (PP11m). Entre la ribera sur del río Maipo y una falla que pone en contacto esta litología con el basamento metamórfico a los 34.22°S aproximadamente, se manifiesta como una franja costera que incluye en la parte norte a PP11m, depósitos continentales (PP11c) y en mayor medida a secuencias sedimentarias marinas [MP1m] del Mioceno Superior-Plioceno. Estos afloramientos corresponderían a la cuenca neógena de Navidad y corresponden principalmente a la Formación Navidad (subdividida por [Encinas y otros \(2006\)](#)).

En la península de Arauco, península de Tumbes y en otra península más al norte que pertenecieron a la cuenca de Arauco afloran rocas que corresponden a las formaciones Trihueco (E1c), Millongue (E1m), Ranquil (M1m) y Tubul (MP1m) ([Becerra, 2013](#)).

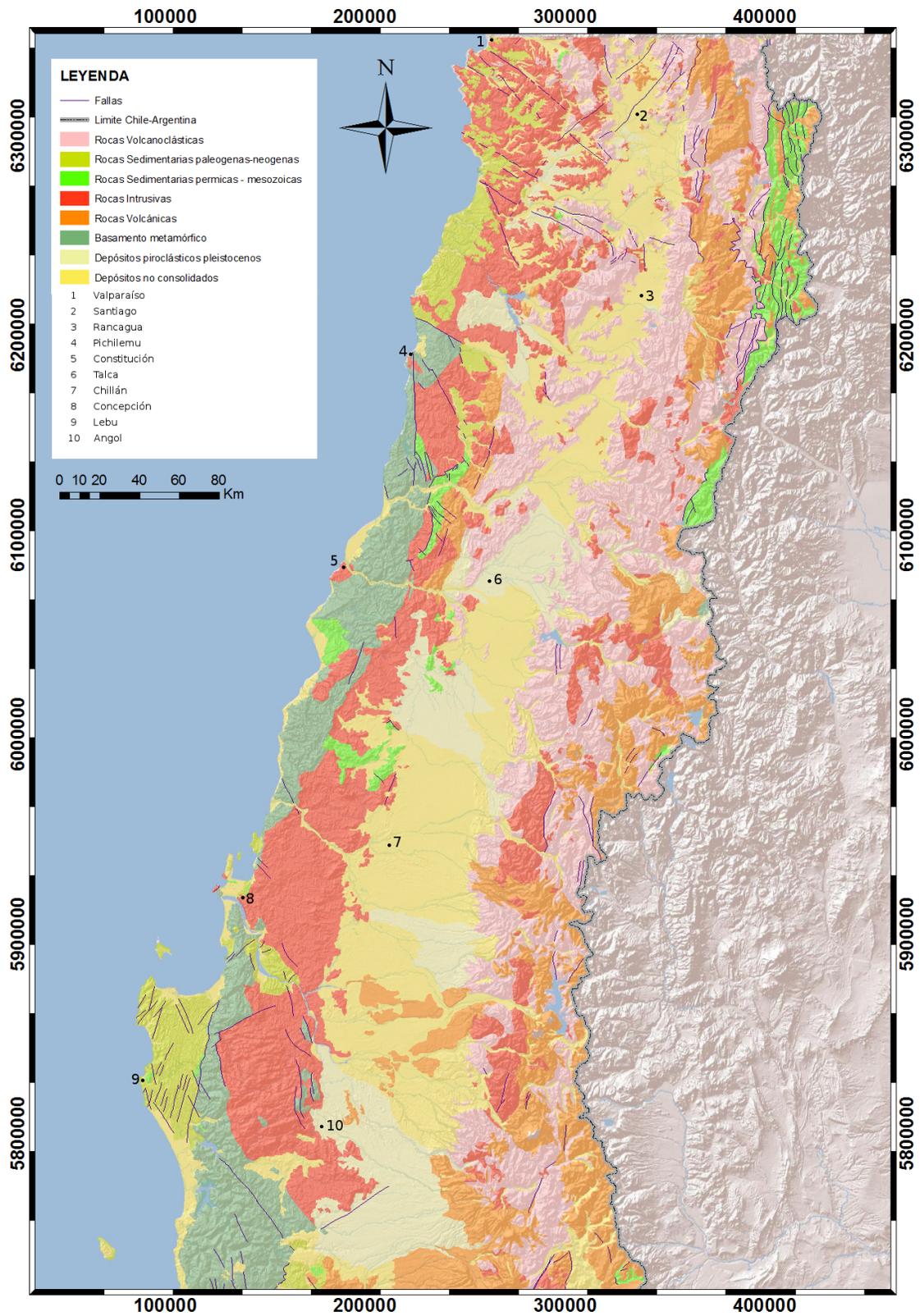


Figura 2.7: Mapa litológico simplificado de la zona donde se recopiló información e identificaron remociones en masa generadas por el sismo del Maule. Modificado de [SERNAGEOMIN \(2003\)](#)

Rocas sedimentarias pérmicas - mesozoicas

Al sursureste de Pichilemu y hasta la altura de Putú, en la Cordillera de la Costa, afloran secuencias marinas y transicionales del Triásico [**Tr1m**], compuestas por areniscas, conglomerados, limonitas y calizas; que se encuentran en contacto por falla con intrusivos paleozoicos (CPg) y jurásicos (Jig). En contacto con Tr1m se encuentran secuencias sedimentarias marinas litorales o de plataforma del Jurásico Inferior-Medio [**Ji1m**]: calizas, areniscas calcáreas, lutitas, conglomerados y areniscas con intercalaciones volcanoclásticas y lávicas; basaltos almohadillados.

En la Cordillera de la Costa y Plataforma costera desde el sur de Constitución afloran secuencias sedimentarias marinas de plataforma, litorales o transicionales: areniscas, conglomerados, lutitas, calizas extraclásticas y oolíticas, sucesiones turbidíticas, del Cretácico Superior [**Ks1m**], que corresponde a la Formación Quiriquina en la región del Maule y Biobío. Además de las secuencias sedimentarias **Tr1m**, mencionada anteriormente, ubicadas en la ribera del río Biobío y en la zona de Quirihue en la Octava región.

En la Cordillera Principal en la FPC del Aconcagua y Malargue afloran las siguientes secuencias sedimentarias:

Kia1c: Cretácico Inferior alto (Aptiano-Cenomaniano). Secuencias sedimentarias continentales aluviales, fluviales y lacustres: areniscas, conglomerados, limolitas, calcilutitas y brechas sedimentarias con intercalación de tobas. En la Cordillera Principal, regiones V y Metropolitana: formaciones Colimapu y Cristo Redentor.

JK1m: Jurásico Superior-Cretácico Inferior Secuencias sedimentarias marinas litorales o plataformales: calizas, lutitas, areniscas calcáreas, areniscas y coquinas. En la Cordillera Principal, regiones Metropolitana y VI: formaciones Lo Valdés, Baños del Flaco.

Js1c: Jurásico Superior. Secuencias sedimentarias continentales y transicionales, en parte lacustres: brechas sedimentarias, conglomerados y areniscas rojas con intercalación de tobas y niveles evaporíticos. En regiones Metropolitana y VI, corresponden a las formaciones Río Damas y Leñas-Espinoza.

Js1m: Jurásico Medio-Superior Secuencias sedimentarias marinas litorales: calizas, areniscas, lutitas calcáreas, en parte bituminosas, con intercalaciones epiclásticas y niveles evaporíticos superiores. En las regiones V a VII: Río Colina y Nacientes del Teno

Ji1m: Jurásico Inferior-Medio en la Cordillera Principal, regiones VIII y IX: Formación Nacientes del Biobío (inferior)

Rocas Volcanoclásticas

Secuencias volcanoclásticas del Jurásico-Mioceno. Dentro de la litología presente se encuentran andesitas, dacitas, rocas volcánicas piroclásticas, brechas sedimentarias, riolitas, calizas, basaltos, brechas volcánicas, tobas, rocas sedimentarias, areniscas y paraconglomerados.

rados.

Existen afloramientos de secuencias volcanoclásticas en la parte más oriental de la Cordillera de la Costa, desde los 33° hasta los 33.8°. Se presenta como una franja que en el mapa geológico de [SERNAGEOMIN \(2003\)](#) se subdivide en tres secuencias volcánicas, que son de este a oeste:

Kia2: Cretácico Inferior alto-Cretácico Superior bajo. Secuencias sedimentarias y volcánicas: rocas epiclásticas, piroclásticas y lavas andesíticas y basálticas con intercalaciones lacustres, localmente marinas. En la Precordillera y Cordillera de la Costa, regiones III a Metropolitana: formaciones Cerrillos, Viñita (occidental) y Las Chilcas.

Ki2c: Cretácico Inferior-Cretácico Superior. Secuencias sedimentarias y volcánicas continentales, con escasas intercalaciones marinas: brechas sedimentarias y volcánicas, lavas andesíticas, ocoítas, conglomerados, areniscas, limolitas calcáreas lacustres con flora fósil; localmente calizas fosilíferas marinas en la base. En Cordillera de la Costa, regiones IV, V y Metropolitana: formaciones Quebrada Marquesa y Veta Negra.

Ki2m: Cretácico Inferior (Neocomiano). Secuencias volcánicas y sedimentarias marinas: lavas andesíticas y basálticas, tobas y brechas volcánicas y sedimentarias, areniscas y calizas fosilíferas. En la Cordillera de la Costa, regiones V y Metropolitana: Formación Lo Prado.

En la Cordillera Principal las secuencias volcanoclásticas predominantes son del Oligoceno-Mioceno [**OM2c**] y corresponden a lavas basálticas, a dacíticas, rocas epiclásticas y piroclásticas. Entre los 32.8° y 38.5°S corresponden a formaciones Abanico, Coya-Machalí y Cura-Mallín (inferior).

Rocas Volcánicas

Secuencias volcánicas que se pueden subdividir en dos edades: Jurásico-Cretácica y Oligoceno-Cuaternario. Durante el Jurásico se presenta como volcanismo marino y continental, durante el Cretácico pasa a ser de tipo continental y ácido. Desde el Oligoceno hasta el Pleistoceno los depósitos corresponden a secuencias y complejos volcánicos en algunos casos erosionados y de composición de básica a ácida. Durante el Cuaternario hay depósitos de avalanchas volcánicas; estratovolcanes y complejos volcánicos.

En la Cordillera de la Costa se ubican como una franja discontinua desde el este del embalse Rapel hasta el río Maule, interrumpida por intrusivos Jurásicos. Corresponden a secuencias volcánicas continentales y marinas [**J3i**]: lavas y aglomerados basálticos a andesíticos, tobas riolíticas, con intercalaciones de areniscas, calizas marinas y conglomerados continentales. En la región del Biobío, corresponde a la Formación Nacientes del Biobío (Miembro Icalma).

En la Depresión Central norte, sur y este de Los Angeles corresponden a centros volcánicos erodados [**PPI3**] y, a secuencias y centros volcánicos básicos [**OM3b**], a los 38°S vuelven a aflorar estas mismas secuencias volcánicas. En la región Metropolitana afloran centros volcánicos ácidos [**Ks3a**] en cerros aislados, como por ejemplo cerro El Manzano en Colina y cerro Los Ratones en Buin.

En la Cordillera Principal donde se disponen en franjas alargadas NS aproximadamente, encontramos complejos volcánicos parcialmente erosionados y secuencias volcánicas [**M3i**] del Mioceno, compuesto por andesitas basálticas, volcánico piroclástico y dacita en forma de domos y lavas, que se ubican desde los 32.5°S hasta la latitud de San Fernando. Más hacia el este en esas mismas latitudes afloran secuencias volcánicas sedimentarias y marinas del Jurásico [**J3i**] y, estratovolcanes y complejos volcánicos cuaternarios [**Q3i**] que en conjunto con secuencias lávicas y centros volcánicos básicos a intermedios [**P13**] se encuentran intercalando en el mapa geológico del [SERNAGEOMIN \(2003\)](#) a las secuencias sedimentarias pérmicas - mesozoicas en la zona de falla de la FPC del Aconcagua y Malargue. Desde Talca hacia el sur, P13, Q3i, M3i, centros y secuencias volcánicas del Mioceno Superior [**Ms3i**] y basaltos de “plateau” y rocas piroclásticas intermedias a ácidas del Mioceno-Plioceno [**MP3**] se distribuyen como franjas discontinuas en contacto con rocas volcánicas del Oligoceno (OM2) y rocas intrusivas graníticas del Mioceno (Mg).

Rocas Intrusivas

Rocas plutónicas e hipoabisales que se distribuyen en una franja alargada constituyendo el esqueleto de la Cordillera de la Costa desde los 33° hasta los 38°S. Predominan en la cordillera de la Costa, rocas graníticas del Carbonífero-Pérmico (CPg).

Se componen de monzodioritas, granodiorita, monzogranito, monzonita, tonalita, diorita, monzodiorita cuarcífera, granito, pórfido andesítico, pórfido dacítico, pórfido granodiorítico, brecha hidrotermal y secundariamente gabro.

Según [SERNAGEOMIN \(2003\)](#) en el área cubierta por el mapa 2.7 las rocas que afloran según edades y litologías son:

Msh: Mioceno Superior (8-5 Ma). Pórfidos andesíticos, dacíticos y granodioríticos de hornblenda, portadores de mineralización de tipo “Pórfido cuprífero gigante” y chimeneas de brechas. En la Cordillera Principal, región VI: El Teniente.

Msg: Mioceno Superior (13-7 Ma). Granodioritas de hornblenda y biotita, en menor proporción monzogranitos, monzonitas cuarcíferas y monzodioritas. En la Cordillera Principal, regiones Metropolitana y VI: plutones La Gloria y San Gabriel.

Mh: Mioceno (20-12 Ma). Pórfidos dacíticos, andesíticos, monzodioritas y dioritas de hornblenda, piroxeno y biotita. En la Depresión Central y Cordillera Principal, región Metropolitana: cerro Manquehue.

Mg: Mioceno (18-6 Ma). Granodioritas, dioritas y tonalitas. En la Cordillera Principal, regiones VII a X.

Mimg: Mioceno Inferior-Medio (22-16 Ma). Granodioritas, monzogranitos, monzodioritas, monzonitas y dioritas de biotita y hornblenda. En Cordillera Principal, regiones V y Metropolitana: Plutón La Obra.

Ksg: Cretácico Superior (90-65 Ma). Monzodioritas, granodioritas, gabros y dioritas de

piroxeno, biotita y hornblenda; pórfidos andesíticos y dioríticos. Entre las cordilleras de la Costa y Principal, regiones IV, V y Metropolitana.

Kiag: Cretácico Inferior alto-Cretácico Superior bajo (123-85 Ma). Dioritas y monzodioritas de piroxeno y hornblenda, granodioritas, monzogranitos de hornblenda y biotita. En la Cordillera de la Costa, regiones V a X.

Jsg: Jurásico Medio-Superior (180-142 Ma). Monzodioritas cuarcíferas, dioritas y granodioritas de biotita, piroxeno y hornblenda.

Jig: Jurásico Inferior (202-178 Ma). Dioritas, gabros y monzodioritas de piroxeno, dioritas cuarcíferas y granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita.

TrJg: Triásico-Jurásico (212-180 Ma). Granodioritas, monzogranitos, monzodioritas, dioritas y gabros de piroxeno y hornblenda; sienogranitos. En Cordillera de la Costa V región.

PTrg: Pérmico-Triásico (270-205 Ma). Granitos hololeucocráticos, pórfidos graníticos y granodioritas de biotita.

CPg: Carbonífero-Pérmico (328-235 Ma). Granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, de hornblenda y biotita, localmente de muscovita.

Basamento metamórfico

Constituyen el esqueleto del sector costero de la zona de estudio, corresponden a prismas de acreción del Paleozoico, que se extiende desde unos 20 kilómetros al norte de Pichilemu por todo el resto de la zona de estudio y más al sur aún hasta la XII Región.

Su litología comprende: esquistos muscovíticos y metabasitas, metachert y serpentinitas con metamorfismo de alto gradiente P/T (Serie Occidental) y metamorfismo del Carbonífero temprano [**Pz4a**]. La Franja oriental comprende pizarras, filitas y metaarenitas con metamorfismo de bajo gradiente P/T del Carbonífero temprano (Serie Oriental) [**Pz4b**]. Ambas series son del Silúrico-Devónico. Este basamento metamórfico también incluyen metaarenitas, filitas y, en menor proporción, mármoles, cherts, metabasaltos y metaconglomerados; metaturbiditas con facies de “melange” [**DC4**] del Devónico-Carbonífero y; metapelitas, metachert, metabasitas y, en menor proporción gneises y rocas ultramáficas con protolitos de edades desde el Devónico al Triásico y metamorfismo del Pérmico al Jurásico [**PzTr4**] del Paleozoico-Triásico.

Depósitos piroclásticos pleistocenos

Depósitos piroclásticos principalmente riolíticos, asociados a calderas de colapso. Afloran en la Depresión Central y valles de la Cordillera Principal, corresponden a la Ignimbrita de Pudahuel y Toba Loma Seca en las regiones V a VII [**P13t**].

Depósitos no consolidados

Depósitos de procesos erosivos actuales en diferentes ambientes sedimentarios (Q1, Qf, Qe, Q1g, Qm) y depósitos del paleógeno (M1c, PP11r) que por alzamientos tectónicos han quedado en zonas más altas por lo que no se han litificado ni han sido transportados.

En la zona costera constituyen depósitos litorales, arenas y gravas de playas actuales (Qm), e importantes campos de dunas (Qe) como el Campo Dunar de la Punta de Concón que se ubica entre la comuna de Concón y el balneario de Reñaca, comuna de Viña del Mar; las Dunas de Chanco y Putú en la región del Maule por nombrar algunos.

Q1: Pleistoceno-Holoceno. Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados. En la Depresión Central, regiones Metropolitana a IX: abanicos mixtos de depósitos aluviales y fluvioglaciales con intercalación de depósitos volcanoclásticos.

Qf: Pleistoceno-Holoceno. Depósitos fluviales: gravas, arenas y limos del curso actual de los ríos mayores o de sus terrazas subactuales y llanuras de inundación.

Qm: Pleistoceno-Holoceno. Depósitos litorales: arenas y gravas de playas actuales.

Q1g: Pleistoceno-Holoceno. Depósitos morrénicos, fluvioglaciales y glacialacustres: diamictos de bloques y matriz de limo/arcilla, gravas, arenas y limos.

Qe: Pleistoceno-Holoceno. Depósitos eólicos: arenas finas a medias con intercalaciones bioclásticas en dunas y barjanes tanto activos como inactivos. En las regiones I a VII: dunas de Santo Domingo y Quivolgo.

PP11r. Plioceno-Pleistoceno. Depósitos de remoción en masa: brechas polimícticas con matriz de arena/limo en proporción variable, de flujo o deslizamiento gravitacional. En la Cordillera Principal: flujos de detritos de las quebradas Lluta y Camarones (región I); avalancha de detritos de Colón-Coya (región VI).

M1c: Mioceno Inferior-Medio. Secuencias sedimentarias de abanicos aluviales, pedimento o fluviales: gravas, arenas y limos con ignimbritas intercaladas. En las regiones VIII a IX: Formación Cura-Mallín (superior).

2.4.2. Estructuras

Entre los 32.8°y 38.5°se identifican en el mapa geológico de Chile a escala 1:1.000.000 (?) diversas estructuras mayores; fallas inferidas, observadas o fotointerpretadas. Se concentran en la Cordillera Principal y Cordillera de la Costa, apreciándose sólo unas pocas que pasan por la Depresión Central al norte de la zona en el mapa de la Figura 2.7. Presentan orientaciones preferenciales NS a NE en la Cordillera Principal y NNE a NW en la Cordillera de la Costa. Destaca la presencia de lineamientos que delimitan los márgenes de la Depresión intermedia

Entre los 32°y los 36°S, a lo largo de los Andes de Chile y Argentina, se han desarrollado

distintas fajas plegadas y corridas (FPC) entre las que se cuentan de norte a sur: Aconcagua y Malargüe (Aravena, 2012).

En los estudios de Alfaro (2011) y Sabaj (2008) en la parte norte de la región del Maule y, entre Valparaíso y Santo Domingo respectivamente, se identificaron estructuras potencialmente activas que tengan propiedades sismogénicas.

En la zona andina, Alfaro (2011) realiza un análisis respecto a estructuras geológicas entre los $34^{\circ}55'$ y $34^{\circ}40'$ que pueden considerarse sismogénicas. De su trabajo se desprende que la Falla Pocuro - San Ramón y el sistema de Falla Infiernillo - Los Cipreses son potencialmente activos; el sistema de Falla El Diablo - El Fierro correspondería a una falla activa; mientras que para la Falla Los Ángeles - Infiernillo el entendimiento de su sistema se hace complejo al no contar con la información suficiente por lo que no se evaluó una estimación de peligro sísmico.

Las principales fallas y sistemas de fallas de la zona mapeada mediante las imágenes satelitales, de norte a sur, son:

Fallas orientación NW entre Valparaíso y Santo Domingo: Sabaj (2008) en base al mapa geológico de Gana y otros (1996) las describe como las estructuras más extensas entre los 33° y $33^{\circ}45'S$, coincidiendo con la morfología de la esa zona. Sus rumbos van desde los 290° hasta los 320° . Las fallas y sistemas de falla que componen este grupo se especifican a continuación:

- Zona de Falla Marga-Marga: en el mapa de Gana y otros (1996), se observa como un conjunto de fallas y lineamientos, en las cercanías del estero Marga Marga, que definen una zona de orientación $N50^{\circ}W$, de un ancho aproximado de 5 km y 48 km de largo. El movimiento a lo largo de estas fallas se caracterizan por cizalle dextral y sinistral con componentes oblicuas que varían espacial y temporalmente. Presentó durante los eventos sísmicos de 1906 y 1985 un efecto de amplificación sísmica y daños mayores en zonas asignadas a las trazas de la zona de fallas (Thorson, 1999 en Sabaj (2008); ?).
- Valparaíso: se observan como una traza sinuosa y discontinua de una longitud sobre los 35 km, que comienza en la bahía de Valparaíso y se extiende hacia el sureste dividiéndose en dos tramos, en base a su diferente orientación y mecanismo.
i) Sector Bahía Valparaíso: falla normal que corta rocas intrusivas jurásicas, su traza es sinuosa de un largo de 7,7 km, con orientación $N20^{\circ}W$ creciente al este y rumbo general $N40^{\circ}W$. Hacia el sureste la traza es inferida con rumbo $N50^{\circ}W$.
ii) Sector Lago Peñuelas: falla de rumbo dextral, que se observa a lo largo de 27 km de manera discontinua ya que se encuentra cubierta por sedimentos holocenos.
- Laguna Verde: falla normal con traza de 23,4 km; orientación $N60^{\circ}W$ que cambia de manera brusca a $N35^{\circ}W$. Sabaj (2008) en terreno la reconoció entre rocas de la Fm. Navidad e intrusivos jurásicos.
- Valparaíso-Curacaví: En el mapa geológico de Gana (1996) en Sabaj (2008), se

observa una estructura que comienza al norte de Quintay y se extiende de manera discontinua por más de 47 km con orientación promedio N55W. No se ha podido determinar su mecanismo.

- Quebrada Los Locos: se ubica al norte de Algarrobo, es una estructura de orientación N50°W y 8,5 km de largo
- Embalse Purísima: su ubica al este de Algarrobo dos estructuras de orientación NW. La primera en el sector noroeste que corresponde a una falla normal observada a lo largo de 6,8 Km, que en varios sectores se encuentra cubierta por sedimentos cuaternarios, de orientación N45W. La segunda en el sector sureste, de 22,6 km de largo tiene una traza sinuosa con una orientación que cambia entre N80°W y N50°W hacia el sureste. Estrías subhorizontales vistas por Sabaj (2008) indicarían movimientos de rumbo para esta estructura.
- San Jerónimo: estructura que se observa en el mapa geológico de Gana et al, 1996 en las cercanías de Algarrobo. Largo de 15,1 km, orientación N50°W. Sería una falla de rumbo, pues Sabaj (2008) observó estrías subhorizontales que indicarían ese tipo de movimiento.
- Quebrada Pino Mar: En los mapas geológicos de Gana y otros (1996) y SERNAGEOMIN (2003), se observa una estructura discontinua de orientación N55°W, que comienza en el sector del Quisco y se extiende hasta la latitud de San Antonio. Sólo ha sido observada a lo largo de dos kilómetros al noroeste del Embalse las Palmas (Wall y otros 1996 en Sabaj (2008)).
- Falla Melipilla: según mapa geológico de Gana et al (1996), en las cercanías de Melipilla, existe una estructura discontinua de 48,3 km con orientación noroeste. Corresponde a una estructura mayor en extensión, aunque no se ha observado en superficie. Se ha interpretado como una falla de rumbo dextral y/o transpresional, aunque otros autores indican que su último movimiento sería de tipo normal.
- Estero Ñanco: en la desembocadura del río Maipo, según mapa geológico de Gana et al (1996) y mapa a escala 1:1.000.000 de SERNAGEOMIN (2003), se observa una estructura de orientación N65°W que controlada el cauce del río en su ribera norte. Su mecanismo no ha sido determinado.

Falla Pichilemu: ubicada en la Cordillera de la Costa en la localidad de Pichilemu, puede reconocerse asociada a lineamientos morfológicos como escarpes, desvíos y encauces de ríos, presenta una orientación NW-SE. Longitud aproximada de 65 Km. Aparentemente tiene un movimiento normal y rumbo NW (Alfaro, 2011).

Falla Pichilemu-Vichuquén: en la Cordillera de la Costa de la sexta región, atraviesa las localidades de Pichilemu y el Lago Vichuquén. Su traza es principalmente NNW a NS y en su segmento sur se dispone NW. Falla inversa levemente sinistral (Alfaro, 2011).

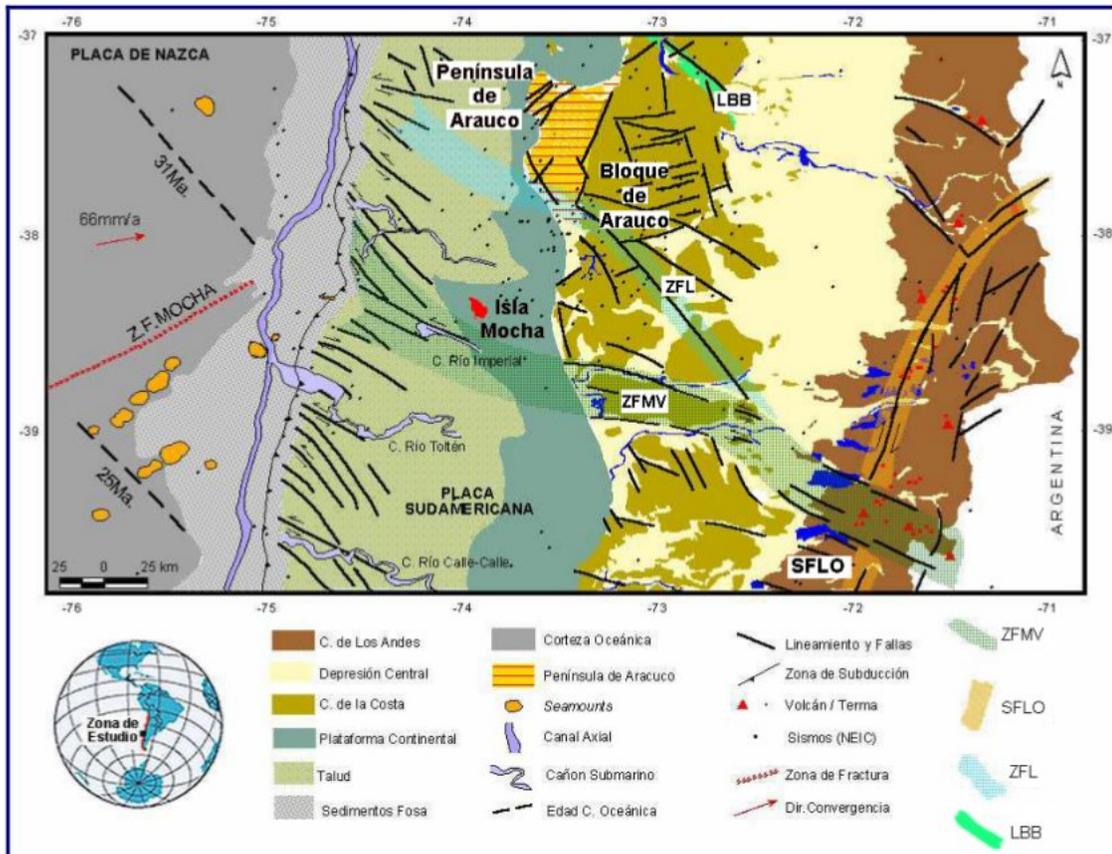


Figura 2.8: Síntesis tectónica regional del área del Bloque de Arauco. Se observa la configuración de las principales estructuras y unidades tectónicas. En la cordillera de los Andes el Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui (SFLO) se alinea con el arco volcánico. Estructuras corticales NW-SE cortan la Cordillera de la Costa; ZFMV: Zona de Falla Mocha-Villarica; ZFL: Zona de Falla Lanalhue. El talud continental y la fosa están muy disectadas por estructuras NW-SE. Fuente: [Moreno \(2004\)](#).

Falla Litu: es el sistema de fallas más relevante en el sector oriental de la Cordillera de la Costa, Bravo (2001) en [Alfaro \(2011\)](#) indica que es una falla normal con rumbo $N10^{\circ}$ - $N15^{\circ}$.

Lineamiento Biobío: al norte y sur de Concepción se observa en el mapa geológico del [SERNAGEOMIN \(2003\)](#) abundantes fallas. Las fallas al norte del río Biobío presentan una orientación $N45^{\circ}W$. Al sur del río Biobío, se encuentran dos grupos de fallas: uno con una orientación $N43^{\circ}E$, y otro con una orientación que varía entre $N45^{\circ}W$ a $N70^{\circ}E$. Existen también fallas subparalelas al cauce del río Biobío, de orientación $N20^{\circ}W$,

Fallas en península Arauco: tienen rumbo NNE y NW, al parecer corresponden a fallas normales, aunque muchas de ellas son fallas inferidas. Las secuencias pre Plioceno están afectadas por sistemas extensionales, mientras que las secuencias sedimentarias pliocenas-cuaternarias están controladas por geometrías compresivas como pliegues monoclinales y asimétricos, pliegues de propagación de falla y cabalgamiento en general ([Melnick y Echtler \(2006\)](#) en [Becerra \(2013\)](#)). En el mapa de la Figura 2.8 se aprecia como cerca de la fosa esas estructuras están muy bien expuestas.

Zona de Falla Lanalhue (ZFL): su rumbo es NW-SE. Pone en contacto rocas metamórficas de la Series Occidental (Pz4a) con la Oriental (Pz4b) del basamento metamórfico de la Cordillera de Nahuelbuta. Se extiende desde Punta Morguilla al oeste, hacia el sureste por el Lago Lanalhue hasta las cercanías de Temuco. En la Depresión Central no se aprecia debido a que está cubierta por relleno cuaternario. El drenaje en la Cordillera de Nahuelbuta también tiene una dirección NW-SE, además de otras estructuras como las altas cumbres (Moreno, 2004). Moreno plantea que al ser una estructura heredada del Pérmico -Triásico que seguramente alcanza dimensiones corticales, es probable que este el comportamiento cenozoico, donde la plataforma marina ha sido continuamente alzada.

Zona de Falla Mocha-Villarica: La Zona de Falla Mocha-Villarica une el lineamiento Villarica-Quetrupillan-Lanín con el cañón del Río Imperial, y posiblemente sigue hasta la fosa (Moreno, 2004). En el Valle Central se une con la ZFL. Es probable que controle el alzamiento diferencial de la plataforma continental y la Cordillera de Nahuelbuta. Moreno en base al desplazamiento en el talud continental, la asimetría y el acomodo de la rotación de la Península de Arauco evidencian un desplazamiento de rumbo sinistral de esta estructura en el antearco (Sánchez, 2004; Mecnick y otros, 2003).

Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui (SFLO): Su parte norte se encuentra al sur de nuestra área de interés, y según señala Moreno (2004) se expresa en esa zona en el cambio de una deformación dominada por el cizalle simple dextral al sur y el comienzo de imbricamiento al norte (38°S). El SFLO ha sido descrito como un sistema de falla en el intra-arco desde los 37°S a los 45°S, con una extensión de más de 1000 km. Diversos autores (e. g. Hervé, 1977; Beck, 1998; Cembrano y otros, 1996; Cembrano y otros, 2000) han relacionado su origen directamente a la convergencia oblicua entre las placas de Nazca y Sudamericana y a la influencia del paso del punto triple bajo la corteza continental (Forsythe y Nelson, 1985). El SFLO se caracteriza por lineamientos de dirección N a NNE, paralelos a la cadena volcánica, en gran parte del Sur de Chile. Su cinemática es de rumbo dextral (Klohn, 1960; Solano, 1978; Hervé y otros, 1979).

2.5. Hidrografía

En la Figura 2.9 se ven los principales ríos de la zona donde se identificó y recopiló información de RM desencadenadas por el sismo del 27 de Febrero del 2010.

El río Maipo nace en la Cordillera de los Andes y tras un recorrido de 250 km desemboca, en Llolleo inmediatamente al sur del puerto de San Antonio.

El sistema hidrográfico de la región del Libertador Bernardo O'Higgins esta constituido por el sistema del río Rapel y sus afluentes más importantes, el río Cachapoal y Tinguiririca; ambos en su confluencia en el sector denominado La Junta dan origen al embalse Rapel.

Entre el Maule y Biobío los ríos pueden ser agrupados en ríos de régimen nivoso y de breve llena, en general, ellos conservan la gran variabilidad de los caudales mensuales y las crecidas



Figura 2.9: Hidrografía entre los 32°y 40°S. El mapa muestra los principales ríos de la zona de estudio. Instituto Geográfico Militar (IGM).

primaverales, pero estas son cortas, de tal manera que ya en enero se siente una falta notable de agua para riego. Los ríos Maule, Biobío, Itata pertenecen a este régimen.

El río Maule nace en la laguna del mismo nombre y desemboca en el mar en Constitución, su hoya hidrográfica abarca una superficie de 20.300 km² y posee un caudal medio de 467 m³/s. Tiene como tributarios en su curso superior a los ríos Puelche, Los Cipreses, Claro y Melado; en el Valle Central tiene como afluente el río Loncomilla.

El río Biobío posee una de las cuencas más extensas del país con 24.029 km² y su longitud alcanza a los 380 km. En el paso por el valle central, el río Biobío cambia su curso al encontrarse con la Cordillera de la Costa y en la confluencia con el río Vergara vuelve a su curso normal. En el curso inferior, desde la ciudad de Concepción, el río cambia de dirección para desembocar en el mar al sur de los cerros de Hualpén.

2.6. Clima

El clima de la zona de estudio es templado o también llamado mediterráneo, con variaciones de oeste a este que van desde templado cálido con lluvias invernales y gran humedad atmosférica en la región costera desde Pichilemu hasta la Península de Arauco; templado cálido con lluvias invernales en la parte oriental de la Cordillera de la Costa y la Depresión Central; templado frío con lluvias invernales en la precordillera y parte occidental de la Cordillera Principal; y en la alta montaña clima de tundra por efecto de altura. Varía la estación seca de 8 a menos de 4 meses.

Las temperaturas medias anuales entre la cuenca del Aconcagua y, la del río Toltén son de aproximadamente 16°C. Las lluvias aumentan hacia el sur al igual que sobre relieves mayores. En general presenta altas precipitaciones en invierno, concentrando alrededor del 80 % de lo caído en el año.

Las precipitaciones promedio en Santiago son de 256,3 mm y en Talca de 716,3 mm, donde la estación lluviosa es más larga. La temperatura media en esta zona es de unos 14 °, y la amplitud térmica es de aproximadamente 12°C.

Más al sur hasta la cuenca del río Laja las lluvias entre abril y noviembre superan los 1.000 mm. Entre el río Laja y el Toltén se tiene una transición entre clima mediterraneo y el lluvioso, las temperaturas medias anuales son de 12°C, el período seco es de cuatro meses y el promedio de precipitaciones es de 1.300 mm.

2.7. Vegetación

La vegetación en la Zona Central de Chile se caracteriza por su alta proporción de endemismos. Comprende matorrales (gramíneas, hierbas y espinos), bosque esclerófito (de hoja dura en latín) representado por el boldo, el peumo, el litre y el quillay, el belloto y el bosque caducifolio que se destaca porque en otoño los árboles tiñen su follaje de rojo, amarillo o naranja, para luego desprenderse de sus hojas, por ejemplo el arrayán y los robles hualo, maulino y de Santiago.

Otra vegetación importante en esta zona es la correspondiente a plantaciones forestales, se señala en ? que del total del país un 44 % se ubica en la región del Biobío y, un 19,5 % en la región del Maule. Las especies que predominan son el *Pinus radiata* y del género *Eucaliptus*. Se observa un aumento progresivo del uso del suelo en estas dos regiones para fines forestales registrándose un aumento del 28 % en ambas.

Capítulo 3

Terremoto Mw 8.8 del Maule

3.1. Características sismogénicas

El sismo ocurrido el 27 de Febrero del 2010 es el sexto más grande registrado según el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) a la fecha y es el segundo de mayor magnitud en territorio nacional después del terremoto de Valdivia de 1960. Sin embargo, este es el primer terremoto de magnitud superior a Mw 8.8 registrado instrumentalmente en campo cercano (Ruiz y Madariaga, 2012). Esto permite realizar estudios de la deformación estática asociada a la ruptura sísmica.

La zona de ruptura de este terremoto coincide con un gap sísmico en el que no ocurría un gran terremoto desde 1835 y que diferentes autores (Campos y otros, 2002; Moreno y otros, 2008; Ruegg, J.) a partir de receptores GPS instalados en la década de los 90 (los cuales midieron un corrimiento hacia el Este del terreno de hasta 4 cm/año (Cisternas, 2011) consideraban que estaba maduro y con altas probabilidades de generar un sismo en un futuro cercano. Como se ve en la Figura 3.1 entre Concepción y Constitución no ocurría un sismo de gran magnitud desde hace más de cien años.

El terremoto del Maule se originó debido al desplazamiento súbito de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana en un área que se extiende aproximadamente desde la Península de Arauco (37.8°S) por el sur hasta el norte de Pichilemu (33.8 °S), cubriendo unos 450 km de longitud en dirección prácticamente norte-sur por un ancho de 160 km [ver Moroni y otros (2012)]. Esta zona de contacto entre las placas, cuya expresión superficial es la fosa marina que se ubica unos 130 km de la costa hacia el Oeste, se localiza a lo largo del plano inclinado que define el área de fallamiento causante del terremoto.

El hipocentro se ubicó en las coordenadas geográficas 36°17'23"S - 73°14'20"W a una profundidad de 37 km según el Servicio Sismológico Nacional (SSN, corregido) o 36°7'12"S - 72°54'0"W y profundidad de 23 km según el National Earthquake Information Center (NEIC) de la USGS, a las 3:34 hora local (6:34 UTC)¹.

¹http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/10_largest_world.php

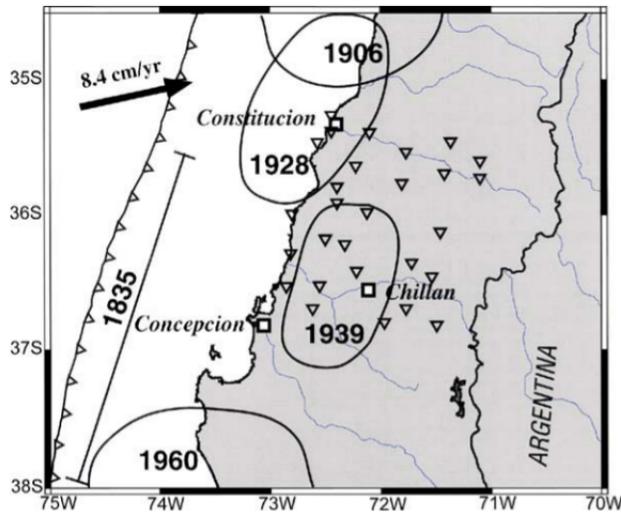


Figura 3.1: Área de ruptura de los mayores terremotos $M \sim 8$ en Chile Central-Sur desde principios del S.XX hasta antes del sismo del 2010. Los parches elipsoidales definen las áreas de ruptura de estos eventos. La longitud estimada del terremoto de 1835 es indicada por una línea sólida. El terremoto de 1939 no corresponde a un sismo interplaca. Los triángulos invertidos indican estaciones sísmicas implementadas durante el periodo del 1 de Marzo al 1 de Junio de 1996. Modificado de Campos y otros (2002).

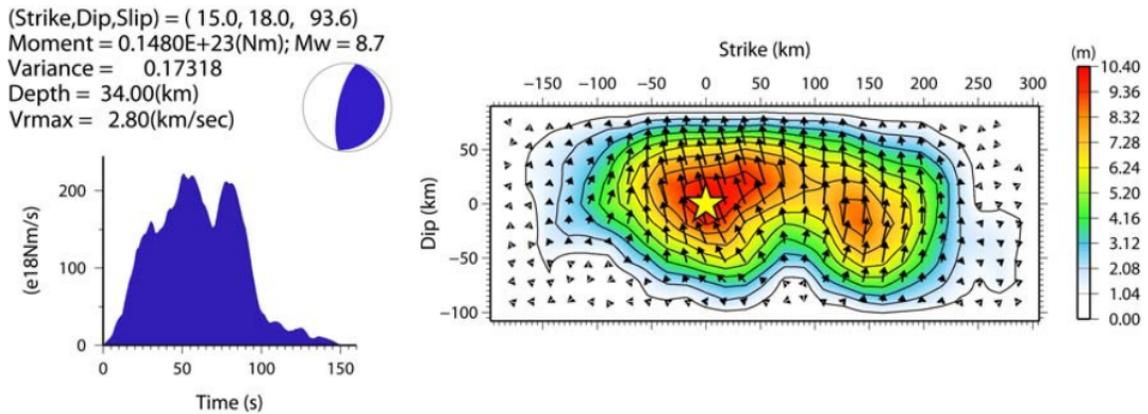


Figura 3.2: Modelo sismogénico del terremoto del Maule JST-JICA-SATREPS (2010). A la izquierda la tasa de liberación del momento sísmico, donde se ven tres pulsos y una duración total de unos 150 s (según Barrientos (2010) es de 110 s). A la derecha el modelo de ruptura realizado por Pulido y otros (2011).

La zona de falla comprende un área de alrededor de 450 km x 160 km con un desplazamiento promedio de 20 m Moroni y otros (2012). La ruptura se propaga a partir del hipocentro a una velocidad del orden de 2.5 a 3.5 km, asimétricamente en el caso del sismo del Maule siendo mayor su extensión hacia el norte, donde se obtuvieron las mayores intensidades sísmicas como se ve en la Figura 3.7.

Existen diversos modelos de la fuente a partir de la que se originó el terremoto (e.g Vigny otros, 2011; Lorito y otros, 2011; Pulido y otros, 2011; Tong, 2010), dependiendo del tipo de

datos, y de la metodología de inversión de éstos, se presentan las diferentes soluciones que muestran algunas características en común: a) extensión de unos 450 km; b) dos principales zonas de mayor desplazamiento (o mayor liberación de energía) en la falla, una hacia el norte y otra al sur del epicentro; c) menor desplazamiento en la sección norte se ubica entre la fosa y la costa, e) el mayor desplazamiento en la sección meridional principalmente bajo la Península de Arauco, f) límite oriental de la zona de ruptura se interna unos pocos kilómetros al interior, bajo el continente (Barrientos (2012)). En la Figura 3.2 vemos uno de los modelos realizado por Pulido y otros (2011).

3.2. Deformación de la corteza, movimientos cosísmicos

Luego del terremoto se reportaron movimientos verticales y horizontales de la costa y puntos GPS al interior del continente. En el trabajo de Vargas y otros (2011) se evidenciaron alzamientos del orden de los 2 metros en la península de Arauco, usando como indicador algas coralinas (litholamnium), y subsidencia en la costa de los 34.13°S hasta los 38.34°S. En la Figura 3.3 están indicados los alzamientos y subsidencias medidas en las costas de Chile, desde Quintay (Región de Valparaíso) hasta Niebla (Región de los Ríos). Se observa claramente que en la Península de Arauco se dan los mayores alzamientos.

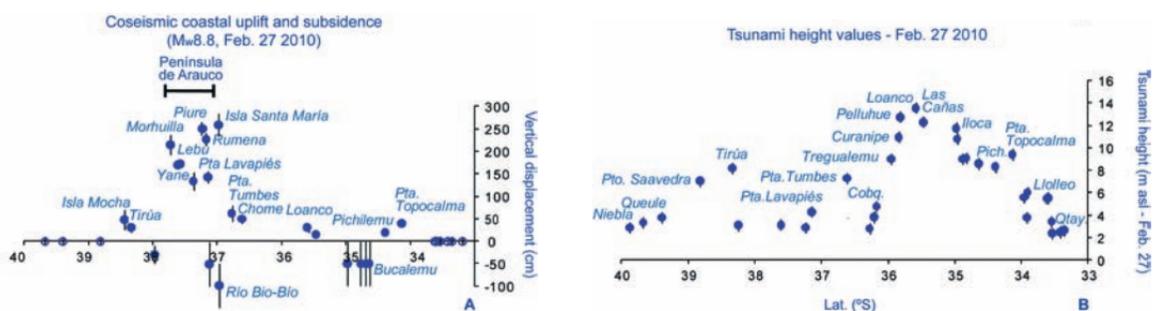


Figura 3.3: Comparación entre los alzamientos y subsidencia costero y la altura del maremoto a lo largo de Chile centro-sur. Fuente: Vargas y otros (2011)

Los megaterremotos como el del Maule, producen una deformación de la corteza puede ser cuantificada mediante mediciones geodésicas. Vigny otros (2011) usó datos GPS y cGPS para inferir la deformación estática y cinemática del sismo de subducción del 27 de Febrero del 2010. En la Figura 3.4 se resumen los movimientos cosísmicos horizontales y verticales, además de un perfil transversal de los cambios en la superficie como función de la distancia a la fosa. Según las mediciones, el máximo desplazamiento horizontal alcanza a 5 m en el extremo de la península de Arauco y cerca de Constitución, lo que indicaría que el deslizamiento en frente de Constitución fue mayor que cerca de Concepción, contradiciendo algunos estudios anteriores. Los desplazamientos verticales alcanzan 1.8 m de alzamiento en la península de Arauco, el punto más cercano a la fosa. En el valle central la subsidencia prevalece y en los Andes pequeños alzamientos son observados.

Otro elemento importantísimo, que se ha sumado al sistema GPS para determinar cambios topográficos en la zona directamente afectada por el terremoto es la tecnología de interfero-

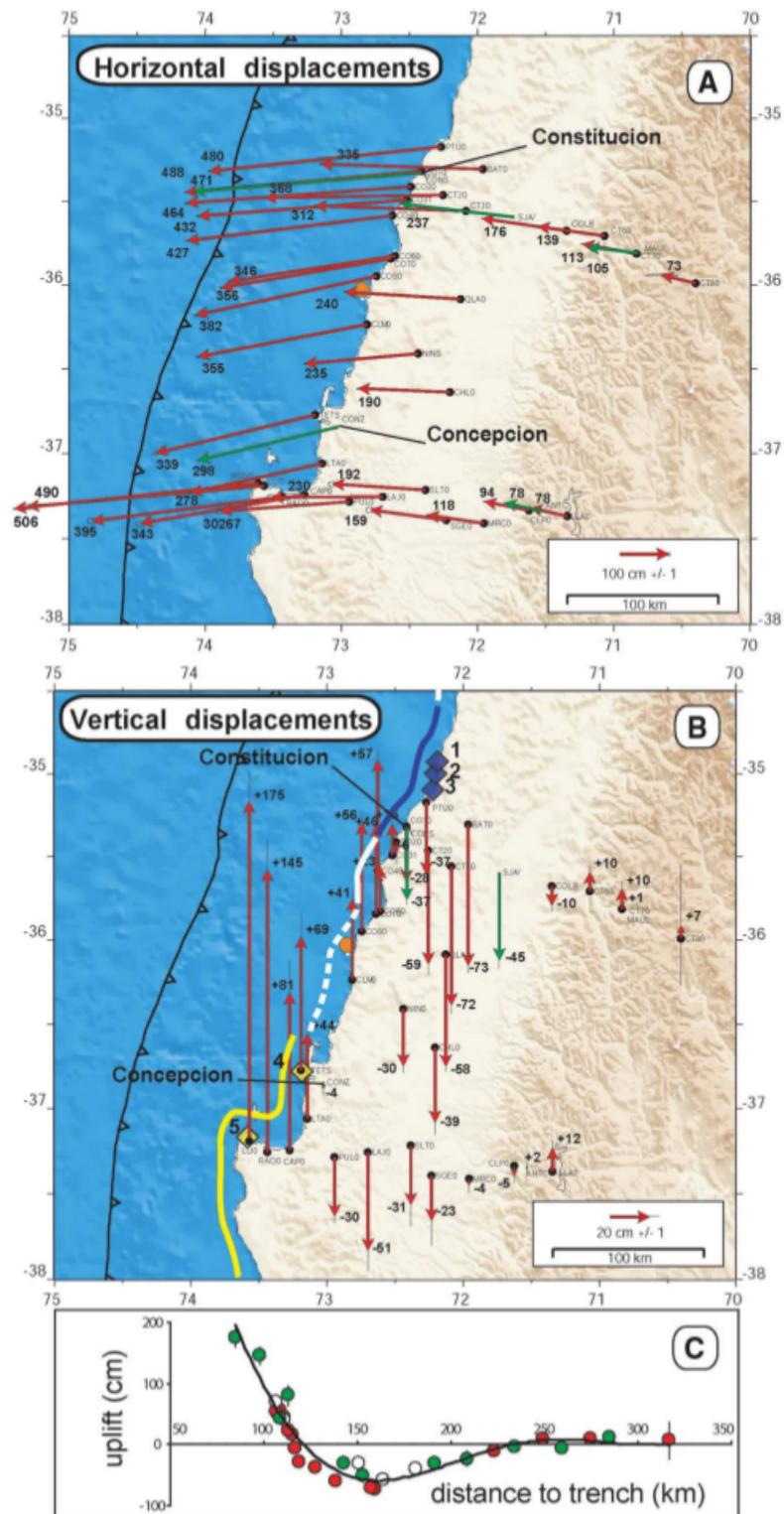


Figura 3.4: El máximo desplazamiento horizontal en esta figura alcanza a 5 m en el extremo de la península de Arauco y cerca de Constitución; 3.7 m en la ciudad de Concepción (Proyecto CAP, Bevis et al). Para la ciudad de Constitución, C. Vigny (en Barrientos (2010)) reporta 4.7 m de desplazamiento horizontal. Tomado de Vigny otros (2011)

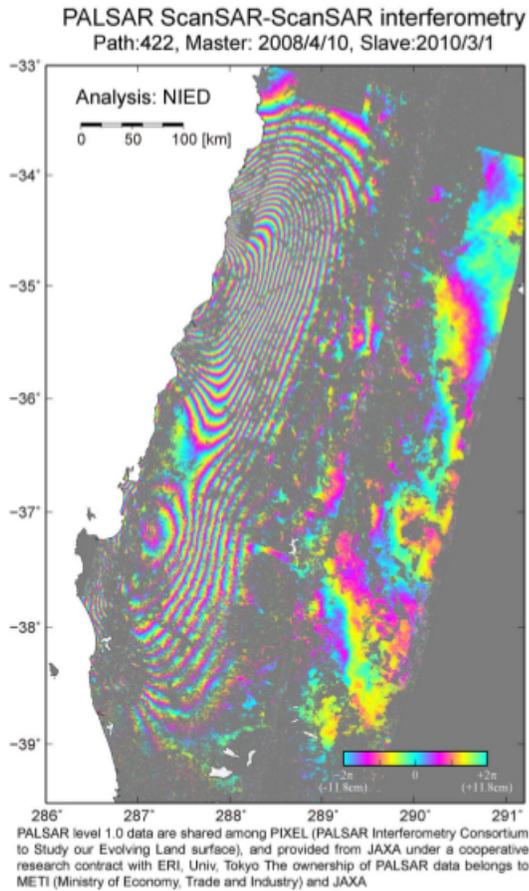


Figura 3.5: Interferograma que revela la deformación (principalmente vertical) de la corteza asociada a la falla que se activó el 27 de Febrero de 2010. Esta figura fue preparada por T. Ozawa, del National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED) ubicado en Tsukuba, Japón.

metría de radar (InSAR). Esta tecnología se basa en la determinación de la intensidad y fase de las señales de radar emitidas desde un satélite que se reflejan en la superficie de la Tierra. Los cambios en la fase revelan posibles cambios de distancia en la trayectoria de la señal, si se toman dos de dichas imágenes de radar de un mismo sitio, anterior y posterior al sismo, se puede generar un vector de desplazamiento superficial (Stein y Wyession, 2003; Moroni y otros, 2012). Diferentes dispositivos alojados en el satélite utilizan diferentes longitudes de onda de modo que cada franja coloreada (paso de un color al mismo) representa un cambio de distancia de una longitud de onda, que en el caso de la Figura 3.5 es de 11.8 cm. La imagen en la banda de ondas de radar (Figura 3.5) muestra principalmente la concentración de contornos que en su mayor parte corresponden a subsidencia o hundimiento a lo largo de dos zonas: a) una zona frente a Constitución, que es de mayor amplitud en la fuente dada la concentración de curvas de nivel y, b) otra que se encuentra ubicada en la latitud del Golfo de Arauco. Son éstas las zonas donde se ha concentrado la liberación de energía durante este terremoto (Barrientos, 2010).

3.3. Características del sismo

El terremoto del Maule fue registrado por 30 estaciones con acelerógrafos, 10 del Servicio Sismológico Nacional y 20 de la Red Nacional de acelerógrafos (RENADIC). La mayoría de los instrumentos son digitales, 21, y se encuentran en Santiago (10). En la Tabla 3.1, se indican las estaciones que registraron, su ubicación, instrumento usado y las mediciones de PGA y PGV que se tomaron.

El mayor valor de la máxima aceleración del suelo (PGA) longitudinal se detectó en Cauquenes con 1,25 g (Saragoni y Ruiz, 2012), sin embargo el instrumento se saturó al cruzarse sus componentes. La segunda mayor PGA encuentra en Angol y es de 909 cm/s², en Constitución se midió la mayor velocidad máxima del suelo (PGV), 69 cm/s (ver Tabla 3.1). En los acelerogramas registrados en la parte norte de la zona de ruptura, como Santiago, Melipilla, Viña del Mar se aprecian dos pulsos separados por 15 a 30 s, lo que es consistente con una velocidad de propagación de la ruptura de 2,8 km/s. Estaciones al centro y sur del área de ruptura como Constitución, Concepción y Angol no muestran subeventos que se puedan diferenciar. La estación de Angol muestra la mayor PGA lo cual indica la posibilidad de un rápido movimiento bajo la Península de Arauco (aproximadamente -37.5°latitud Sur) (JST-JICA-SATREPS, 2010), además de mayor magnitud que en otras zonas como lo indican las mediciones en los trabajo de Vargas y otros (2011) y Melnick y otros (2012).

En la Figura 3.6 se observa la distribución geográfica de las estaciones sismológicas disponibles durante el sismo del Maule, junto a los acelerogramas que allí se obtuvieron. Es notoria la mayor cantidad de acelerógrafos disponible al norte del epicentro (latitud 36.29°S) de este sismo en comparación con las que se encuentran al sur de éste. La escasez de instrumentos de medición de las aceleraciones sísmicas provoca que la determinación de la aspereza sur sea mucho más incierta que la aspereza norte y se tenga poco conocimiento de ella (Saragoni y Ruiz, 2012). Según Saragoni y Ruiz (2012) se deben realizar estudios sobre la distancia a la aspereza de la zona sur, que represente adecuadamente los cPGA de los registros de Concepción y Angol y la mayor extensión del área afectada por licuefacción con respecto al área de las isosistas que es menor.

En Chile y el mundo, se ha utilizado desde hace muchos años la intensidad sísmica como una medida cualitativa para categorizar los efectos de un sismo sobre construcciones, personas, animales y en terrenos. Su uso en el país tiene una larga data lo que permite la comparación de sismos históricos ocurridos en territorio nacional, previo a los registros sismológicos instrumentales.

La intensidad fue estimada por Astroza y otros (2010) a través de la observación en terreno de las viviendas unifamiliares de uno o dos pisos en la zona de daño, que considera las regiones V, VI, VII, VIII, IX y Metropolitana. Las localidades visitadas se ubican en todo el largo y ancho del territorio, excluyéndose las localidades costeras (por no poder diferenciarse el daño por la agitación sísmica del producido por el maremoto) y las localidades al pie de la Cordillera Principal, en las que no se informó de daños significativos en las viviendas. Para determinar la intensidad sísmica Astroza y otros (2010) usaron el método propuesto por Monge y Astroza (1989), el cual se basa en la escala de intensidades MSK-64 (Medvedev y otros, 1964).

Tabla 3.1: Estaciones sísmológicas que registraron 27 de Febrero del 2010 el terremoto del Maule. Extraído de (JST-JICA-SATREPS, 2010)

Ubicación de Estación	Código	Organización	Instrumento	Longitud	Latitud	PGA (cm/s ²)	PGV (cm/s)
Concepción	CCSP	SSN	ETNA	-73,1087	-36,8443	637	44
Santiago (Campus Antumapu)	ANTU	SSN	Episensor, Earth data	-70,6335	-33,5691	267	25
Cerro El Roble	ROC1	SSN	Episensor, Q330 digitizer	-71,0156	-32,9759	184	21
Santiago (Cerro Calán)	CLCH	SSN	SSA-12SLN, Terra Techn	-70,5369	-33,3961	220	29
Melipilla	MELP	SSN	QDR	-71,2138	-33,6874	762	46
Olmué (10 km al oeste de El Roble)	OLMU	SSN	QDR	-71,173	-32,994	347	28
Casablanca, teatro municipal	CSCH	SSN	QDR	-714108	-33,3208	322	44
San José de Maipo	SJCH	SSN	Makalu	-70,351	-33,644	471	63
Santiago (Colegio Las Américas) LACH	LACH	SSN	Makalu	-70,5308	-33,4518	302	34
Santiago (Colegio Santa Lucía)	STL	SSN	Makalu	-70,6428	-33,4405	332	46
Papudo (V Región)	-	RENADIC	SMA-1	-71,444	-32,509	413	25
Viña del Mar, Margamarga (V Región)	-	RENADIC	ETNA	-71,5099	-33,0482	344	45
Viña del Mar, Centro (V Región)	-	RENADIC	QDR	-71,5508	-33,0253	327	33
Valparaíso UTFSM (V Región)	-	RENADIC	SMA-1	-71,5956	-33,0346	261	16
Valparaíso Almendral (V Región)	-	RENADIC	SMA-1	-71,613	-33,056	298	29
Llolleo (V Región)	-	RENADIC	SMA-1	-71,615	-33,613	553	31
Santiago, FCFM	-	RENADIC	ETNA	-70,6617	-33,4572	162	22
Santiago centro (Comunidad Andalucía)	-	RENADIC	SSA-2	-70,652	-33,467	303	26
Santiago, Maipú	-	RENADIC	QDR	-70,7719	-33,467	550	44
Santiago Peñalolen (Hospital Luis Tisne)	-	RENADIC	QDR	-70,5792	-33,5006	289	29
Santiago Puente Alto (Hospital Sotero del Rio)	-	RENADIC	QDR	-70,5811	-33,5769	260	31
Santiago La Florida (Línea 5, Mirador)	-	RENADIC	K2	-70,606	-33,5135	231	19
Matanzas (VI Región)	-	RENADIC	SMA-1	-71,8734	-33,9604	335	43
Hualañe (VII Región)	-	RENADIC	SMA-1	-71,8053	-34,9765	452	39
Curico (VII Región)	-	RENADIC	QDR	-71,2364	-34,9808	461	33
Talca (VII Región)	-	RENADIC	SMA-1	-716649	-35,4299	467	33
Constitución (VII Región)	-	RENADIC	SMA-1	-72,4057	-35,3401	627	69
Concepción, Colegio Inmaculada Concepción (VIII Región)	-	RENADIC	SMA-1	-73,0483	-36,8281	394	68
Angol (IX Región)	-	RENADIC	QDR	-72,7081	-37,7947	909	38
Valdivia (XV Región)	-	RENADIC	QDR	-73,2133	-39,8244	135	18

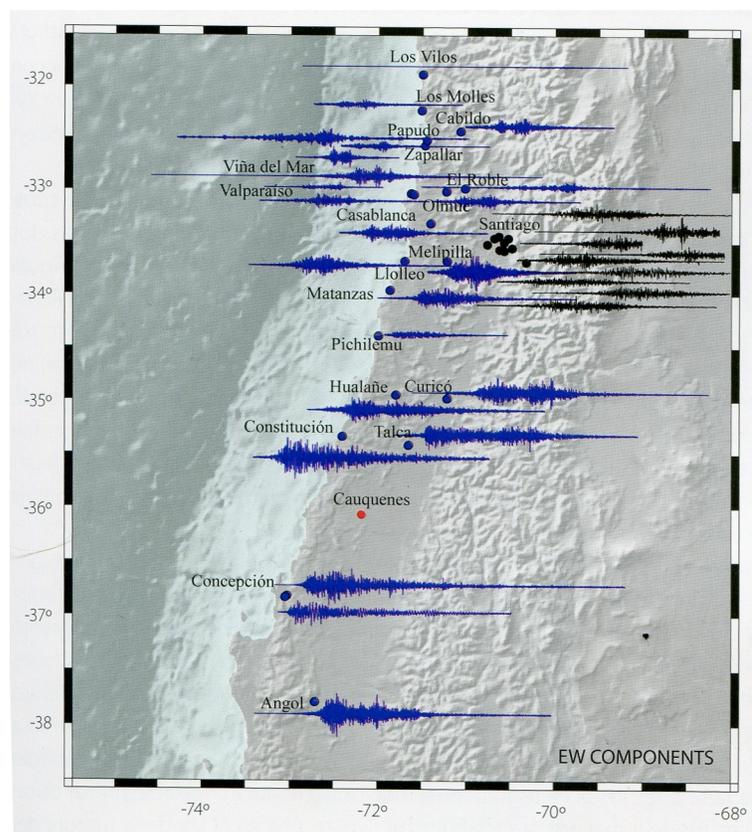


Figura 3.6: Acelerogramas de las estaciones sismológicas disponibles. Obtenida de [Saragoni y Ruiz \(2012\)](#).

En la Figura 3.7 las isosistas se realizaron considerando sólo los sitios sobre suelo duro (depósitos fluviales o aluviales antiguos y compactos) e ignorando el daño debido a el maremoto, remociones en masa o licuefacción; así el mapa de isosistas representa los valores de intensidad sísmica en un suelo duro con velocidades de corte entre 500 m/s y 900 m/s, de acuerdo al suelo tipo II según la clasificación de la norma NCh433 (INN, 2010), por ello su forma es regular al no considerarse los efectos beneficiosos o desfavorables en el daño que produce la presencia de otro tipo de suelo, por ejemplo roca o depósitos de cenizas volcánicas (Astroza y otros, 2010, 2012).

El trabajo de Astroza y otros (2012) muestra que las intensidades disminuyen a medida que se alejan de la aspereza norte (que se indica con un punto blanco en la Figura 3.7) de una forma que se ajusta mejor que la atenuación respecto al hipocentro, indicando con esto una importancia mayor de las asperezas dada por ser la zona donde se concentra la liberación de la energía durante el sismo.

3.4. Réplicas del terremoto del Maule

Para el terremoto del Maule no se observaron réplicas de gran magnitud ($M > 8$), el mismo fenómeno que se observó para el terremoto de Valdivia de 1960. Las réplicas mayores ocurrie-

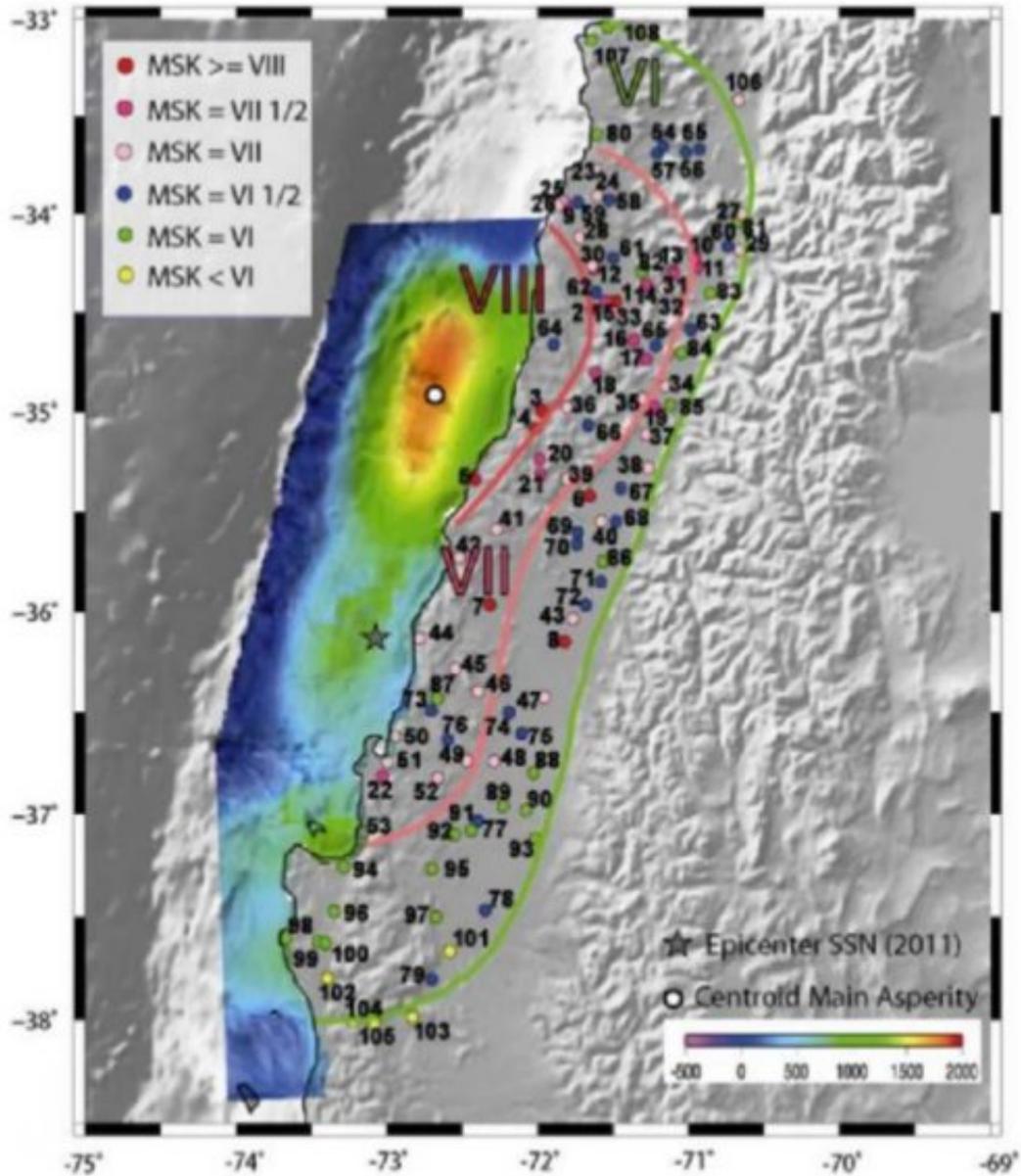


Figura 3.7: Intensidades e isosistas en la zona de daño del terremoto del 27 de Febrero del 2010. Los números romanos indican la intensidad MKS, los números arabicos están asociados a las localidades donde se realizó la observación de los daños a las viviendas. Tomado de (Astroza y otros, 2012)

ron a pocas horas del sismo principal y son de magnitudes aproximadas de Mw 7.0. No se descarta que pudiesen haber ocurrido réplicas inmediatamente después del terremoto, pero es difícil determinarlas pues las señales de ambos eventos estarían superpuestas en los registros. Hasta el momento la mayor réplica ocurrió cerca de Constitución el 25 de Marzo del 2012 con una magnitud Mw 7.1 (Moroni y otros, 2012).

En la figura 3.8 se aprecian las réplicas con magnitud mayor a 4.7, los puntos en violeta corresponde a las ocurridas el primer día y las azules, a las posteriores. Las líneas de contorno en el panel izquierdo indican cantidad de desplazamiento en el contacto entre las placas de

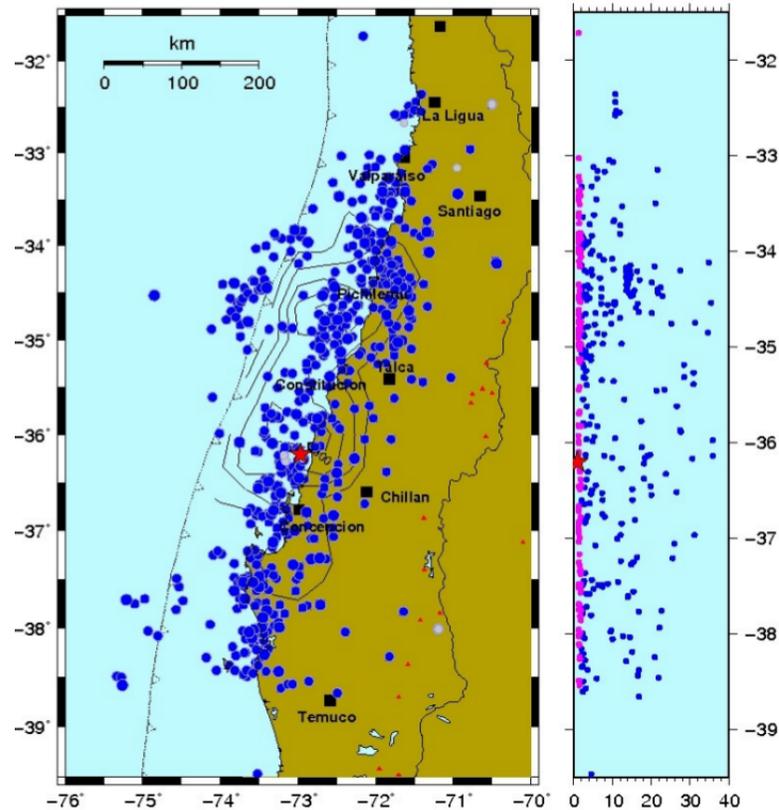


Figura 3.8: Réplicas con magnitud mayor a 4.7 y la zona de ruptura asociada al terremoto del Maule, hasta el 4 de abril del 2010. Explicación en texto, sección 3.4. Tomado de (Barrientos, 2010)

Nazca y Sudamericana, alcanzando los valores máximos del orden de 12 a 14 m (NEIC, USGS). El panel derecho muestra la actividad de réplicas determinadas por el NEIC en función del tiempo en días, después del evento principal (día 1). El 1 de abril es el día 34 y el 1 de mayo, el día 64.

La réplica más importante según Barrientos (2012) ocurrió el 11 de Marzo de 2010, sin embargo otros autores (e.g. Sepúlveda y otros, 2012; Farías, 2007) no consideran que sea una réplica debido a que su mecanismo focal es distinto, no de tipo interplaca thrust, sino que fue una secuencia de eventos asociados a una falla previamente calificada como no activa y que presentó reactivación producto de la transferencia de esfuerzos producida por el terremoto del Maule (Ryder y otros, 2012). Fueron dos eventos de magnitud 6.9 y epicentro cercano a Pichilemu ($\sim 34^\circ\text{S}$), superficiales, tuvieron un desfase de 15 minutos entre ellos, asociados a una o dos fallas normales de direcciones noroeste, sin expresión superficial; la profundidad de los hipocentros es aproximadamente 8 km según (Ryder y otros, 2012) y entre 10 y 14 km según Ruiz (2012) (comunicación personal).

3.5. Maremoto

El sismo del 27 de Febrero del 2010, produjo un maremoto que afectó las costas de las regiones del Maule y Biobío, como también el Archipiélago de Juan Fernandez. Según se indica en [Fritz y otros \(2011\)](#) la cantidad de victimas fatales debido al tsunami es de 124, concentradas en las regiones costeras del Maule (69) y Biobío (33), la Isla de Robinson Crusoe en el Archipiélago de Juan Fernández (18) e Isla Mocha (4) y es el maremoto en Sudamérica que ha dejado más muertes desde el sismo y maremoto en Tumaco el año 1979, frente a las costas de Colombia.

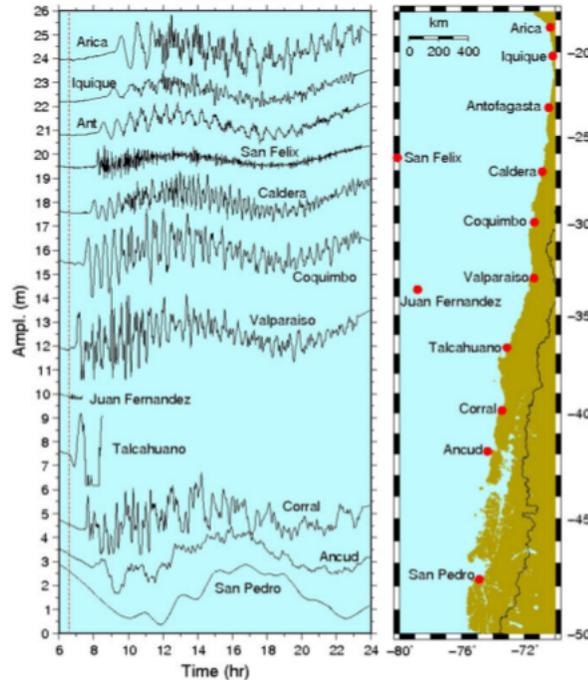


Figura 3.9: Registro del maremoto en 12 estaciones mareográficas a lo largo de la costa de Chile. La línea roja segmentada vertical indica el tiempo de origen del terremoto. Tomado de [Fritz y otros \(2011\)](#)

Tres son las variables principales que determinan la altura de la ingesión del mar en la costa debido a un tsunami producido por un terremoto: a) tamaño de la perturbación inicial, que depende de la geometría de la dislocación, de la ubicación espacial, y la amplitud del deslizamiento en la falla que genera el terremoto; b) batimetría por el lugar donde se propaga la perturbación, entre sitio de generación y costa; c) batimetría y topografía de las regiones cercanas a la costa ([Barrientos, 2012](#)).

El maremoto generado por la deformación producto del movimiento de la placa de Nazca, se extendió rápidamente alcanzando las costas de Chile pocos minutos más tarde de ocurrido el sismo, por ejemplo en la Isla de Robinson Crusoe, el marégrafo alcanzó a medir durante un poco más de 50 minutos después del terremoto antes que fuera destruido por la llegada de las grandes olas (ver Figura 3.9). En Talcahuano la primera llegada se manifiesta como un retroceso gradual de las aguas, luego un ingreso de casi 2 m continuando con un retiro del mar que deja el marégrafo fuera del rango de medición para posteriormente ser destruido

por el segundo ingreso del mar ([Moroni y otros, 2012](#)). Al registrar los maréógrafos más de 17 horas, se puede apreciar el efecto de las mareas, que se superponen a las oscilaciones producidas por el mecanismo de generación del maremoto y de la respuesta de la bahía dada por su batimetría, causando la intrusión marina del mar en tierra por varias horas, lo que es un hecho inusual comparandolo con tsunamis históricos en el país.

En la Figura [3.3](#) se aprecia la altura de las olas en distintas localidades costeras de la zona centro de Chile. En [Fritz y otros \(2011\)](#) y [JST-JICA-SATREPS \(2010\)](#) hay medidas del runup o cota de inundación registradas para los terremotos de 1960 y 2010. Las áreas inundadas las estudiaron dichos autores usando imágenes satelitales y visitas a terreno.

Capítulo 4

Análisis de Remociones en masa generadas por el terremoto del 2010.

4.1. Recopilación de eventos registrados

Se recopiló la mayor cantidad de información posible sobre eventos registrados de remociones en masa cuya actividad pudiese ser asociada al sismo del 27F. Las principales fuentes son informes técnicos realizados por el SERNAGEOMIN, entre Marzo y Abril de 2010, en las regiones de: Valparaíso (Narajo y Contreras, 2010c; Gajardo y otros, 2010), Metropolitana (Arenas y otros, 2010a; Ortiz y Fernández, 2010), O'Higgins (Contreras y otros, 2010; Naranjo y Contreras, 2010a), Maule (Fernández y Venegas, 2010; Arenas y otros, 2010b; Narajo y Contreras, 2010b), Biobío (Vázquez, 2010; Falcón y Vázquez, 2010a,b; Ramírez y Derch, 2010a,b,c,d; Blanco y otros, 2010a,b; Duhart y otros, 2010a; Falcón y otros, 2010a,b; Blanco y Creixell, 2010a,b; Espinoza y otros, 2010; Sepúlveda y Espinoza, 2010b,a; Marín y Derch, 2010) y Araucanía (Duhart y otros, 2010b). Estos informes fueron encargados por autoridades locales, realizados en lugares donde se notificó un riesgo inminente, o por geólogos que acudieron a hacer una revisión de los efectos geológicos del sismo del 27 de Febrero de 2010 por cuenta propia. A ello se suma una base de datos georreferenciada de los puntos donde fueron registrados problemas en los caminos producto del terremoto, facilitada por la Dirección de Vialidad del MOP, el catastro de extensiones laterales realizado por Verdugo y otros (2012) en el marco del estudio de los efectos del fenómeno de licuefacción, y un catastro realizado por Mardones y Rojas (2012) en la franja costera de la Región del Biobío.

De dichas fuentes se extrajeron o dedujeron los datos de las ubicaciones de las RM registradas, y se colocaron en un archivo kml de *Google Earth*, para posteriormente ser agregadas a las remociones ya identificadas mediante el análisis de imágenes satelitales.

4.2. Mapeo a través de imágenes satelitales

La zona de ruptura del terremoto del Maule, según los informes del Servicio Sismológico Nacional (SSN) (Barrientos, 2010), comprende unos 450 km de largo por 150 km, por lo que el área susceptible a sufrir fenómenos de remoción en masa es muy extensa. Según las extrapolaciones realizadas por Keefer (2002), Rodríguez y otros (1999) y Delgado y otros (2011), la máxima distancia al epicentro para una RM gatillada por un sismo de magnitud de momento (M_w) 8.8 es de alrededor de 600 km; y usando las ecuaciones del trabajo de Malamud (2004), el número de eventos totales gatillados por el sismo del Maule sería del orden de 55.000 RM. Sin embargo, por los antecedentes previos de visitas en terreno y testimonios se señala que las RM posteriores al sismo, no involucraron grandes volúmenes desplazados (Sepúlveda, S.; Farías, M.; Aguilera, D.; comunicación personal)

Dadas estas condiciones, para realizar un estudio de estas remociones es necesario aplicar técnicas que permitan realizar un examen de la zona de la manera más económica posible, tanto en términos monetarios como temporales.

Actualmente el uso de imágenes satelitales se ha extendido para diferentes usos como planificación territorial, uso de suelos, análisis temporales de expansión urbana, vigilancia de desastres naturales, exploración minera, localización de bienes raíces y muchas otras. Las imágenes de satélite ofrecen detalles de la superficie terrestre, una visión global de objetos y relaciones entre ellos que no pueden verse a ras de suelo. Es posible abarcar grandes áreas con un mismo patrón espectral (iguales colores), y tener imágenes de una misma zona con diversos intervalos temporales (por ejemplo MODIS que obtiene imágenes todos los días). Todas estas características las hacen ideales para poder lograr los objetivos de la presente investigación.

En este estudio era necesario contar con imágenes pre y post sismo para poder determinar si el proceso de remoción en masa se generó debido al movimiento telúrico, mientras más temporalmente cercanas al 27 de Febrero del 2010 la certeza de su causalidad por el terremoto es mayor.

Inicialmente se trabajó con imágenes LANDSAT y ASTER que poseen una resolución espacial de 30 m y 15 m respectivamente, pero dadas las dimensiones de las RM esa escala de trabajo no era la adecuada, por lo que se decidió utilizar el programa *Google Earth*, el que tiene una resolución máxima de 1 m (Cascante, 2010) en las imágenes suministradas por DigitalGlobe en algunos sitios, y cubre toda el área que interesa examinar, además el programa cuenta con una herramienta que permite acceder a imágenes de diferentes fechas, lo que lo hace apropiado para este estudio.

4.2.1. Metodología

La zona de estudio de este trabajo es la Cordillera de la Costa y la Planicie Costera entre la latitud -32.9 y -38.5, es decir, desde Viña del Mar hasta Tirúa. Para cubrirla se dividió el

área usando la grilla SIRGAS, escala 1:50.000, del Instituto Geográfico Militar¹, la que a su vez fue subdividida longitudinalmente en 15 a 18 franjas de aproximadamente 1.5 kilómetros para cada celda. Paralelamente a esto se realizaron mapas de altitud, orientación y pendiente (ver Figuras 2.4, 2.5, 2.6) en el programa ArcGIS, a partir de un modelo de elevación digital (DEM) de 30 m de resolución, que fue confeccionado como un mosaico de imágenes DEM descargadas desde la página del proyecto ASTER GDEM² desarrollado por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI) y la NASA.

En *Google Earth* se anexó el mapa de pendiente (Figura 2.6) donde las pendientes menores que 15° se les dio un 100 % de transparencia y las mayores de 15° quedaron como una capa morada (por su mayor contraste con la imagen). Luego se examinó sobre la imagen post-sismo cada franja a una altura del ojo entre 2 a 1 km, disminuyéndola cuando se veía alguna alteración en la vegetación, zonas desnudas o morfologías típicas de procesos de remoción en masa, siguiendo como pauta para el reconocimiento las tablas del capítulo 8 de [Soeters y Van Western \(1996\)](#). La escala de las imágenes que se observaban en *Google Earth* para identificar las remociones en masa variaba entre 1:2.000 y 1:10.000. Si existía la sospecha de ser una RM se observaba la imagen pre sismo disponible, en caso de no observarse en esa imagen o mostrar una menor área que implicará una reactivación se marcaba mediante la herramienta Marca de Posición asignándole un nombre representativo del tipo de remoción observada y alguna información adicional si aplicaba. La remoción más pequeña distinguida mediante este método tiene un área de 89 m.

De acuerdo a las tablas de clasificación de [Soeters y Van Western \(1996\)](#) se clasificaron preliminarmente las remociones por tipo, como deslizamientos traslacionales, deslizamientos rotacionales, caídas de roca y flujos, detectándose ubicaciones que mostraban más de un tipo de remoción y otras que no fue posible clasificar.

Una vez completada la información de las ubicaciones de los PRM que pueden haber sido gatillados por el sismo del Maule del 27 de Febrero del 2010 y sus réplicas, pues los intervalos entre las imágenes pre y post sismo no permiten acotar las remociones en masa sólo al evento principal, se procede a pasarlos al formato shape de ArcGIS. Para exportar los datos desde el formato KML a SHP se utilizó el programa complementario XTools Pro.

Se creó un sistema de información geográfica (SIG) en ArcGIS que contuviera las siguientes capas de información relevante para la realización del inventario.

- Mapa litológico de la zona de estudio modificado del mapa geológico de Chile a escala 1:1.000.000 realizado por el [SERNAGEOMIN \(2003\)](#),
- Mapas geológicos de mayor detalle en las zonas donde estuvieran disponibles. A escala 1:250.000 : [Ferraris y Bonilla \(1980\)](#); [Gajardo \(1980\)](#); [Corvalan y Davila \(1964\)](#); [Escobar y otros \(1977\)](#); a escala 1:15.000: [Pineda \(1986\)](#) (Ver Figura 4.1).
- Polígonos de las comunas, puntos de las localidades e hidrografía de las regiones: de Valparaíso, Metropolitana, de O'Higgins, del Maule, Biobío y Araucanía, bajados del Sistema Integrado de Información Territorial de la Biblioteca del Congreso Nacional (http://siit2.bcn.cl/mapas_vectoriales/index_html/).

¹<http://www.igm.cl/>

² <http://www.gdem.ersdac.jspacesystems.org.jp>

- Mapa geomorfológico de la zona de estudio. Elaboración propia en base a los trabajos de [Melnick \(2007\)](#) y [Fariás y otros \(2010\)](#)
- Mapa base de relieve sombreado de la biblioteca de mapas de ArcGIS.
- Epicentro del sismo del Maule, publicado por el Servicio Sismológico Nacional en el informe técnico de [Barrientos \(2010\)](#).

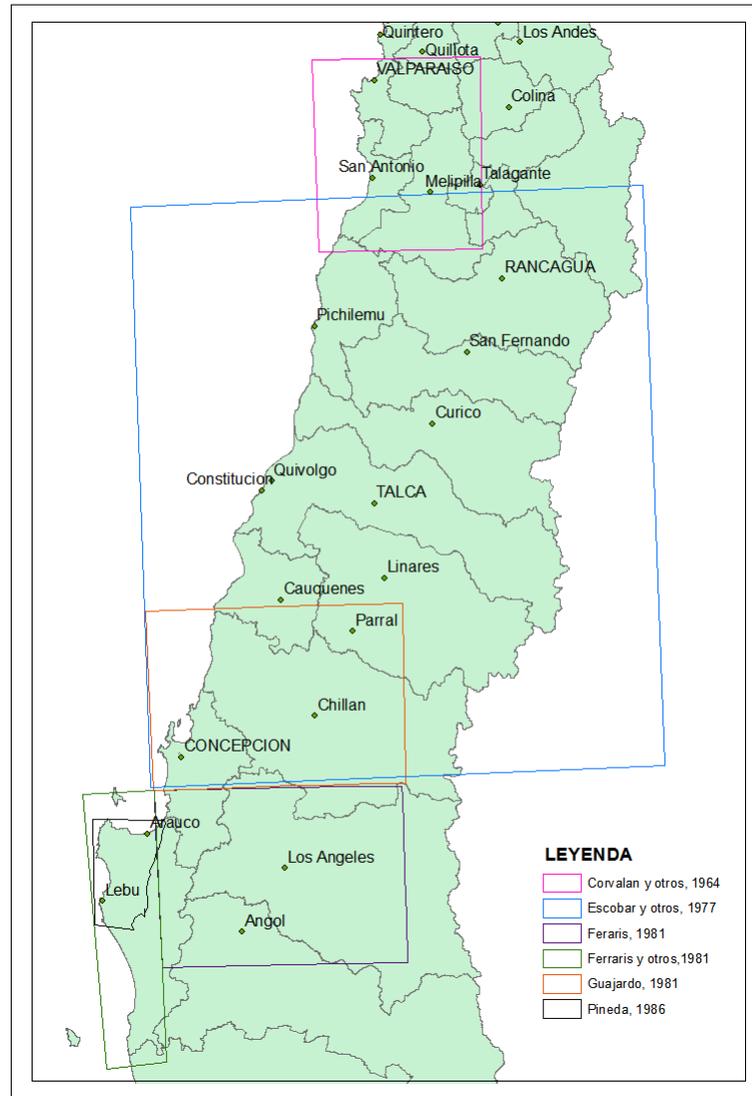


Figura 4.1: Cobertura de los mapas geológicos usados para refinar los datos litológicos. La cobertura del mapa de [Escobar y otros \(1977\)](#) es aproximada.

Sobre este SIG que se encuentra en la proyección UTM sobre el geoide WGS-1984, Zona 19 S, se agregaron los shapes de puntos con las RM identificadas mediante *Google Earth* y los puntos con los eventos registrados de la recopilación bibliográfica. Se llenaron los campos Región Comuna, Litología en la tabla de atributos usando la información contenida en el SIG. También en esta etapa se completaron los datos de la Fuente de información a partir de la cual se obtuvo la ubicación del proceso de remoción en masa.

Posteriormente se hizo una inspección de los puntos a través de *Google Earth*, reclasificando algunos, eliminando otros y se completaron los datos de altura de la base de la ladera, altura

de la ladera, altura de la corona, orientación y pendiente de la ladera usando las herramientas disponibles del software. Además se agregaron las coordenadas este y norte del punto y, la fecha de las imágenes pre y post sismo que se usaron para su identificación.

Para determinar el área de las remociones en masa se mapearon los polígonos de cada RM observable en *Google Earth* guardándola en una carpeta que luego se exportó al formato de ArcGIS, donde mediante la herramienta del complemento *Xtools Pro/Tabla de Operaciones/Calculate Area, Perimeter, Length* se obtuvo y se anexó a la tabla de atributos de los shapes de puntos.

La distancia entre el área de ruptura del sismo del Maule y las RM reconocidas en este trabajo, se calculó mediante una rutina desarrollada en *Matlab* (en Anexo D) a partir de programas creados por [Contreras \(2009\)](#) en su Memoria de Título.

La distancia entre una remoción en masa identificada y el área de ruptura (r_{rup}) se define cómo la distancia más corta entre el punto dado por la ubicación de la RM y el plano que corresponde a la superficie deslizada (ver Figura 4.2) en el evento sísmico, de la manera en que hace [Keefer \(1984\)](#). Se utilizaron los puntos de la grilla realizada en [Lorito y otros \(2011, Tabla Suplementaria S₁\)](#), los que definen el área de ruptura. Con esos puntos, se realizó una interpolación cúbica, para generar una superficie en el espacio y proceder a calcular la distancia entre los puntos que conforman la superficie y las ubicaciones de las RM identificadas.

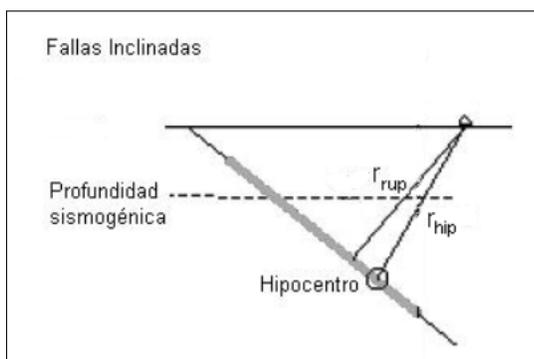


Figura 4.2: Esquema de la distancia entre una RM registrada y el área de ruptura de un sismo.

Se creó una escala de 1 a 3 con respecto al grado de certeza de que la remoción en masa fuera efectivamente desencadenada por el sismo del Maule y sus réplicas, donde 1 es muy certero y 3 es poco certero. Ese grado de certidumbre depende de la resolución de las imágenes y del intervalo temporal entre ellas. Se tomó esto en cuenta, siguiendo lo señalado en [Highland y Bobrowsky \(2008\)](#), como información que es recomendable incluir en un mapa inventario de movimientos de ladera.

Se realizó un terreno el 9 de Julio del 2013, a la zona costera de la VI región con el objetivo de verificar las remociones identificadas a través de las imágenes satelitales y observar como se veían en terreno los procesos de remoción en masa de tipo deslizamiento superficial, sobre qué litología y así afinar la clasificación que se estaba realizando en el resto de la zona de estudio.

4.3. Catastro de remociones en masa gatilladas por el sismo del 27 de Febrero del 2010

Luego de la revisión de la zona de estudio utilizando las imágenes suministradas por el programa *Google Earth*, considerando la última imagen disponible antes del 27 de Febrero de 2010 y la primera luego de esa fecha. Se identificaron alrededor de 110 remociones en masa, principalmente deslizamientos someros traslacionales y desprendimientos. En el inventario además de las remociones identificadas mediante observación de las imágenes satelitales, se suman las registradas en los informes registrados del SERNAGEOMIN que se llevaron a cabo en los meses de Marzo y Abril del 2010, los derrumbes reportados por el Departamento de Planes de Infraestructura Vial, Ministerio de Obras Públicas (MOP), el informe sobre los efectos de la licuefacción de [Verdugo y otros \(2012\)](#) y el catastro de remociones en masa en la Región del Biobío efectuado por [Mardones y Rojas \(2012\)](#). Al integrar toda esa información se contabilizan un total de 288 eventos de remoción en masa, con un tamaño mínimo de 30 m², asociados al sismo del Maule del año 2010.

En la Figura 4.3 observamos un mapa donde se localizan todos los puntos donde se identificaron y registraron RM, son 284 lugares que se distribuyen de forma no homogénea en la zona estudiada en este trabajo. En el mapa se visualiza el área de cada una de las remociones en caso de contar con ese dato, de no ser así se especifica en la leyenda. Los diferentes colores simbolizan los tipos remoción en masa identificados.

En el anexo A se entregan las posiciones geográficas de los puntos donde se observan las remociones, así como la comuna y región donde se ubica. En los puntos correspondientes a los informes del SERNAGEOMIN, su ubicación es aproximada siguiendo las indicaciones presentes en los informes en caso de no entregarse en ellos la ubicación GPS.

En el anexo A también se entrega la pendiente, orientación y litología de la ladera que falló; fecha de las imágenes pre y post sismo, la distancia a la ruptura, la certidumbre de que la remoción se desencadenara por el sismo del Maule y sus réplicas. Además del tipo de RM desencadenada por el sismo del 27 de Febrero del 2010, siguiendo la clasificación usada por [Keefer \(1984\)](#) con algunas modificaciones necesarias para representar bien el tipo de fenómeno de remoción en masa con los antecedentes disponibles. Así se creó una categoría RM indiferenciada para aquellas RM donde no se disponía de mayor información que permitiera poder clasificarla en alguna de los otros tipos y la categoría PRMi que incluye dos tipos de movimientos según [Varnes \(1984\)](#) deslizamiento traslacional y flujo.

De los 290 fenómenos en remoción en masa (ver Tabla 4.1), 118 corresponden a Deslizamientos superficiales; 55 son Caídas de Roca; 51 corresponden a extensiones laterales; 4 son Procesos de Remoción en Masa Mixtos donde ocurre un desprendimiento inicialmente y luego un deslizamiento; 6 corresponden a Deslizamientos Rotacionales, la mayoría de ellos sobre zonas con eventos previos o se encuentran en etapas tempranas con generación de grietas de escarpes; y un flujo de detrito. Además 53 son remociones en masa indiferenciadas. Cabe señalar que en los sitios 45 y 81 del Anexo A se registraron tanto caídas de roca como deslizamiento, y en el sitio 168 del Anexo A son dos los deslizamientos, por lo que el total de puntos con ubicaciones de RM son 286.

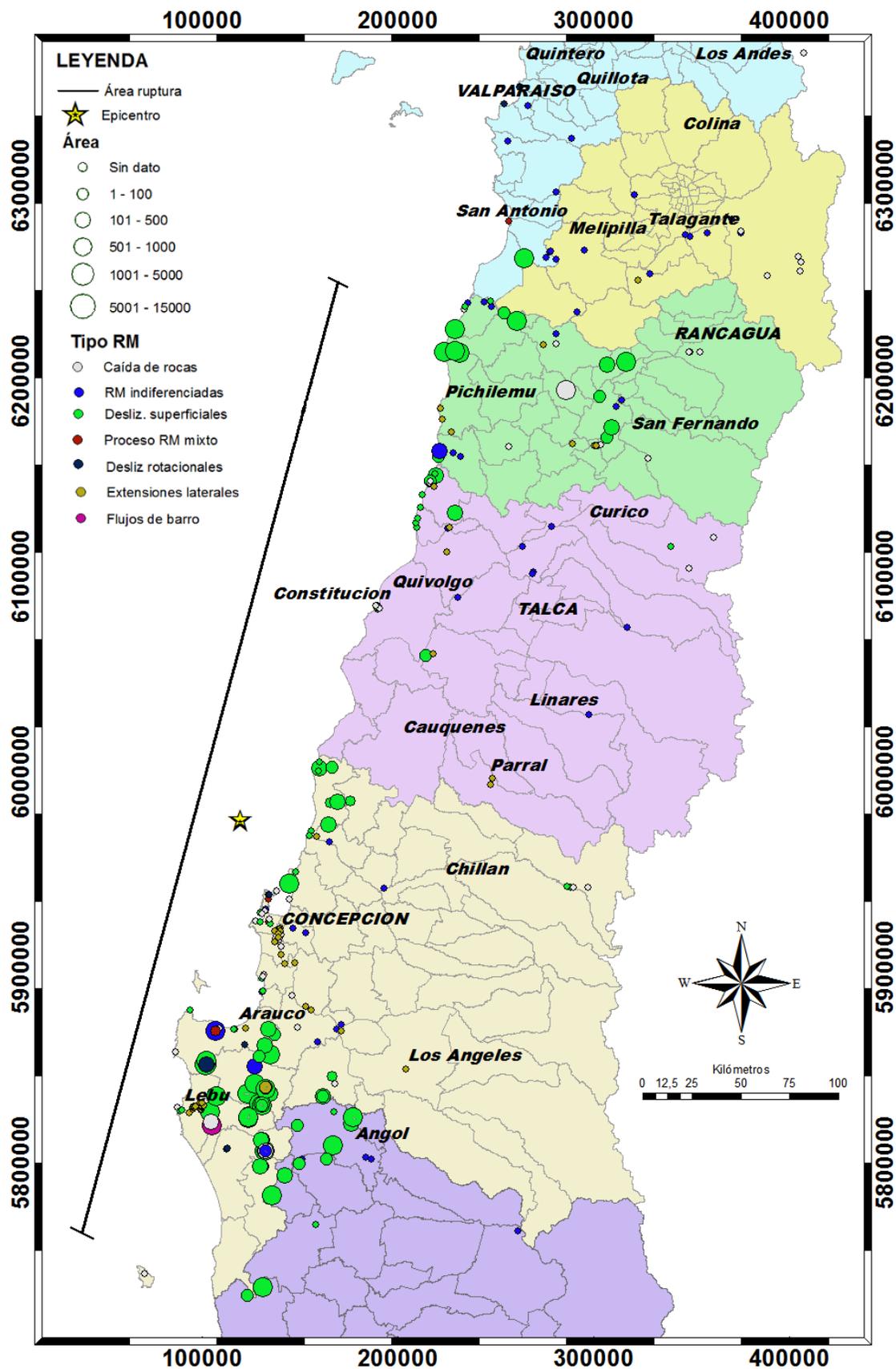


Figura 4.3: Distribución por tipo y área de las remociones en masa inducidas por el sismo del Maule. El epicentro corresponde al entregado por el SSN corregido y el área de ruptura a la indicada por Vigny otros (2011).

Tabla 4.1: Catastro de remociones en masa identificadas y/o recopiladas.

Tipo de RM	N° en toda el area	N° en zona occidental
Caídas de roca	55	35
Deslizamientos de suelo y roca	118	110
Procesos de remoción en masa mixta	4	4
Deslizamientos rotacionales	8	6
Flujo de barro	1	1
Extensiones laterales	51	47
RM indiferenciadas	53	46
Total	290	249

Según las categorías en [Keefer \(1984\)](#), la mayoría de las remociones en masa identificadas en este trabajo corresponden al tipo disgregado (*disrupted landslides*) con un alto desorden interno, someras, de una profundidad estimada menor que 3 m y corresponden a deslizamientos de suelo y roca (DtRS), caídas de roca (CR) y deslizamientos de roca. De la categoría remociones en masa coherente (*coherent landslides*) sólo encontramos algunos casos, deslizamientos rotacionales (DrSR), que tienen profundidades mayores a 3 m, que presentan un ordenamiento interno mayor y se mueven como paquetes. Las extensiones laterales y flujos de barro corresponden a otra categoría definida por [Keefer \(1984\)](#), que son aquellas remociones cuyo mecanismo de movimiento es parecido a un flujo. Según lo señalado por [Verdugo y otros \(2012\)](#) son producto de la licuefacción de suelos, que corresponden a depósitos fluviales y lacustres mayoritariamente. Los proceso de remoción en masa mixto, como su nombre lo indica involucra dos de las categorías definidas por [Keefer \(1984\)](#) tanto deslizamientos disgregados como flujos.

4.3.1. Deslizamientos superficiales

Son los más abundantes de los fenómenos de remoción en masa identificados. Son someros (menos de 3 m de profundidad) con una razón altura de talud sobre espesor menor a 25 y tienen una organización interna disgregada. Se encontró que el ángulo mínimo al que ocurren es a 13° y su área promedio es de 1000 m². En la gran mayoría de estos deslizamientos no fue posible la determinación del porcentaje de suelo versus roca involucrada por lo que se considera que ambos materiales intervienen. La litología donde hay mayor cantidad de deslizamientos es sobre rocas metamórficas: esquistos, filitas, pizarras del Basamento Metamórfico.

El deslizamiento de mayores dimensiones se encuentra en la ladera oeste del Estero Huillinco, comuna de Curanilahue, Octava Región. En la Figura 4.4 se le ve en la parte inferior del flanco suroeste como reactivación de un deslizamiento rotacional mucho mayor (demarcado con una línea blanca). No se observa el depósito del deslizamiento probablemente porque el estero transportó el material. El área de este movimiento de ladera es de 13234 m² y la litología corresponde a roca sedimentaria paleógena-neógena, compuesta de areniscas, limonitas, coquina y caliza. La pendiente de la ladera no es posible calcularla usando las herramientas de *Google Earth*, pues previo al sismo existía una cubierta vegetal que impide apreciar el relieve de la zona, y en la imagen posterior (del 19 de Agosto del 2011) los árboles de la ladera se



Figura 4.4: Dos deslizamientos en Curanilahue, Octava Región. Deslizamiento rotacional en la parte central de la imagen, donde se aprecia el escarpe de esta nueva remoción en la parte SW de una antigua remoción. Deslizamiento traslacional en la zona inferior SW, que se destacó en la imagen encerrandola en un círculo rojo. Imagen extraída de *Google Earth*, sitios 87 y 201 del Anexo A.

talares y la pendiente se ve muy pronunciada, más de lo que indica el DEM de *Google Earth*. El deslizamiento se ubica justo en la zona externa del meandro del Estero Huillinco, donde la erosión es mayor, lo que aumentaría la inestabilidad de la ladera. Probablemente el suelo se encuentra en una condición parcialmente saturada lo que también puede ser un factor que haga más susceptible a esta ladera a deslizamientos. El depósito de este deslizamiento no se observa, por lo que probablemente fue transportado por el estero desde que ocurrió el deslizamiento hasta la fecha en que tomo la imagen satelital.

El segundo deslizamiento con mayor área se encuentra en el cerro Doñihue, comuna de Doñihue, Sexta Región con 3336 m^2 , sobre rocas volcánicas del Cretácico Inferior-Superior: como basaltos, andesitas, riolitas (SERNAGEOMIN, 2003). Ocurre en una zona en que se manifiestan evidencias de RM anteriores, de hecho el evento ocurre en una ladera perteneciente al flanco izquierdo de una remoción rotacional anterior que aumentó en ese lugar la pendiente que originalmente era 23° , por lo que se aprecia en la Figura 4.5.

Durante visita a terreno realizada el 9 de Julio del 2013, se chequearon algunas RM identificadas previamente mediante imágenes. En la ribera norte del río Rapel al lado este del puente Rapel se aprecia un deslizamiento de suelo y roca de profundidad intermedia, de aproximadamente 4 metros con una leve tendencia rotacional (Figura 4.7). La roca se encuentra meteorizada y pertenece a la Formación Navidad, de rocas sedimentarias marinas. En el camino hacia la localidad de Puertecillo, casi llegando al pueblo, se ubica un deslizamiento de suelo y roca traslacional (Figura 4.6) sobre roca granítica moderadamente meteorizada, grado III en ISRM (1981) (Figura 4.6 b).

Los deslizamientos superficiales donde se pudo determinar que la masa deslizada corresponde principalmente a roca fueron cuatro eventos registrados. Uno al oeste de la península

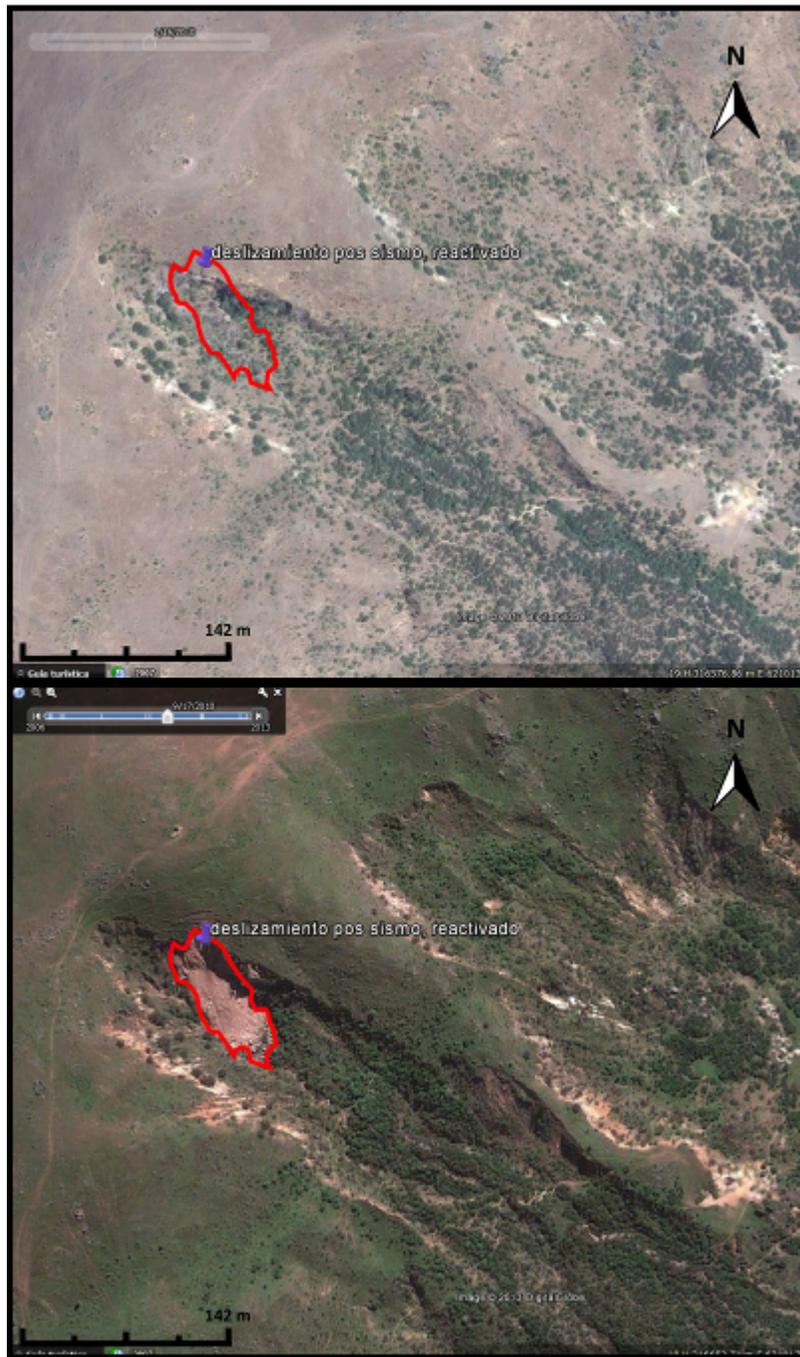


Figura 4.5: Uno de los deslizamientos de mayor área inventariado en la zona de estudio, cerro Doñihue, Sexta Región. Imagen satelital de Google Earth pre (superior) y post sismo (inferior), se aprecia que esa zona presenta cicatrices de remociones anteriores, que modifican las pendientes del relieve.

de Tomé-Coliumo, sector Caleta Cocholgüe (sitio Anexo 203 [A](#)), otro en acantilados de la península de Arauco (sitio 202 Anexo [A](#)) y dos en Caleta Lo Bagres. En ésta última se evidenciaron dos deslizamientos de roca (sitio Anexo [A](#)) según lo indicado en el informe del SERNAGEOMIN ([Sepúlveda y Espinoza, 2010b](#)), sin embargo [Mardones y Rojas \(2012\)](#) lo clasifica como desprendimiento. En vista de la evidencia fotográfica en el catastro realizado

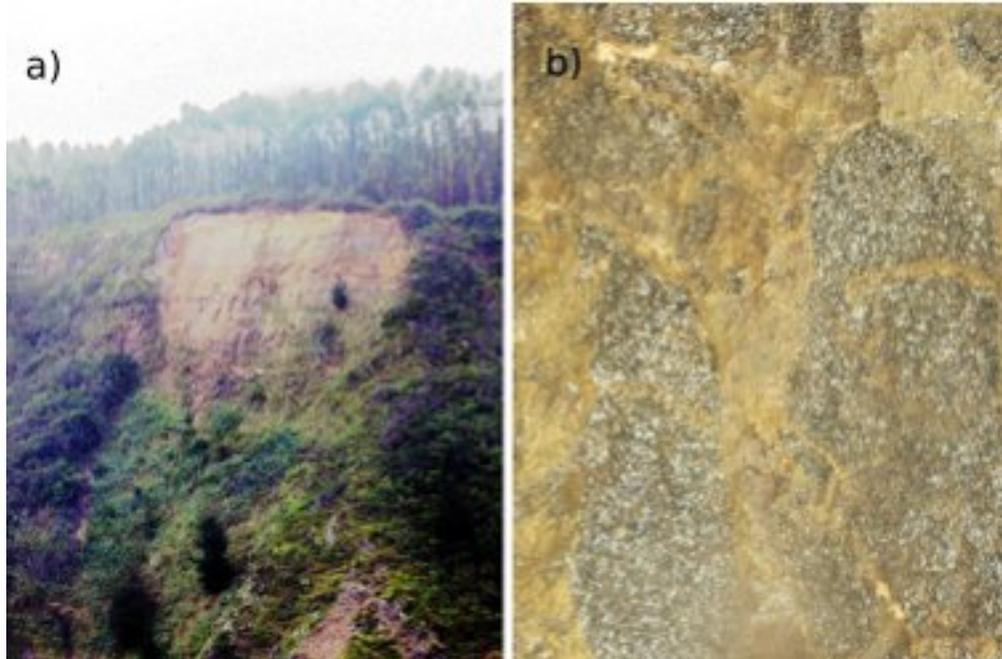


Figura 4.6: Deslizamiento de suelo y roca en Puertecillo, Navidad. a) Escarpe y zona de arranque en parte alta de la ladera, más abajo se ven depósitos. b) Roca granítica moderadamente meteorizada (grado de meteorización III (ISRM, 1981)) sobre la que ocurrió el deslizamiento. Visita a Terreno.



Figura 4.7: Deslizamiento de suelo y roca en Zona Río Rapel, Navidad. Visita a Terreno.

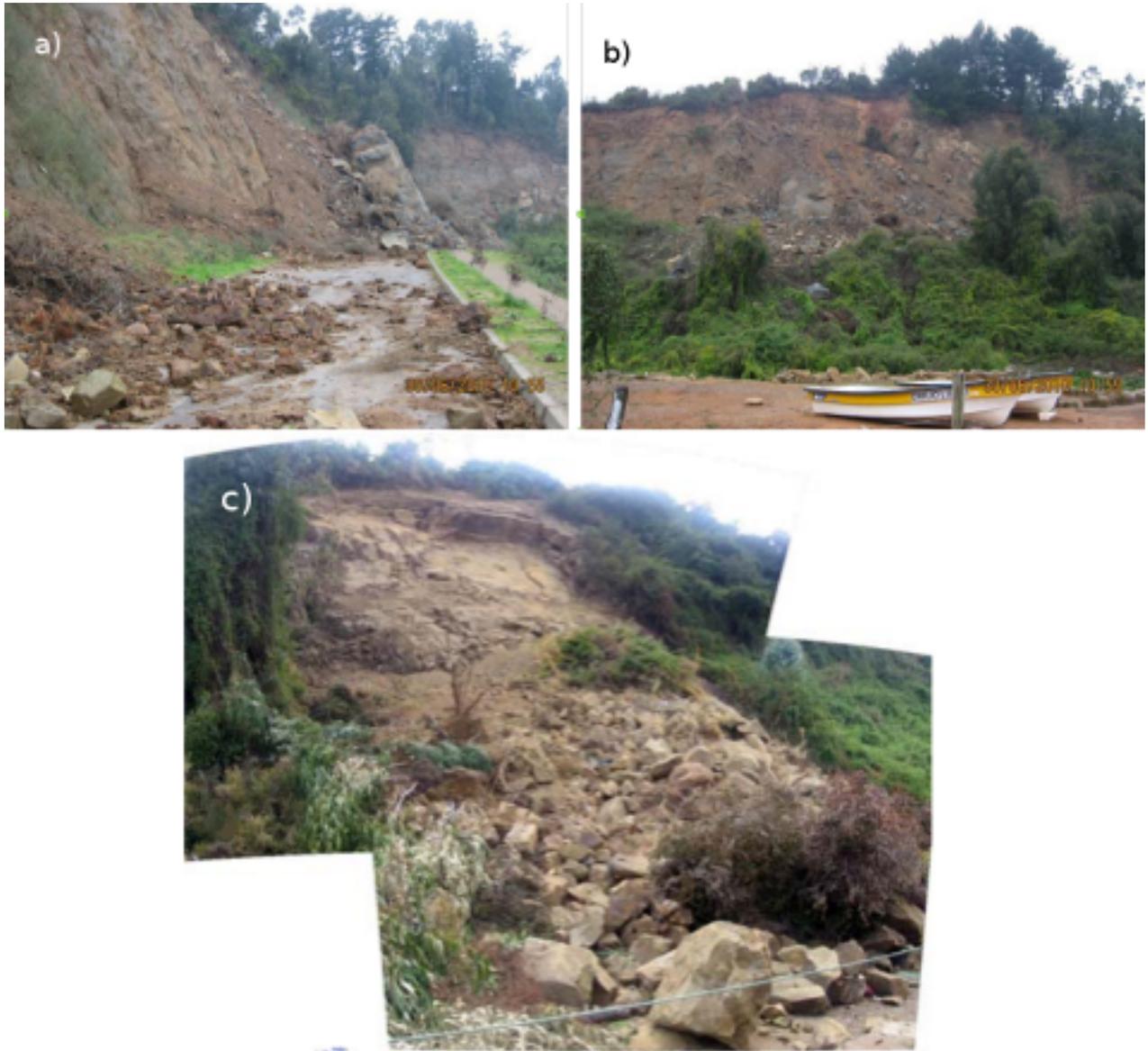


Figura 4.8: a) y b) Deslizamiento de roca en Caleta Cocholgüe. Fotografía tomada por Aguilera (comunicación personal); c) Deslizamiento de roca en Caleta Lo Bagres. Planos de debilidad en lo alto de la ladera paralelos a la ladera. Fotografía obtenida de [Sepúlveda y Espinoza \(2010b\)](#)

en este estudio se clasificó como deslizamiento de roca, pues en la Figura 4.8 c) se aprecian en la parte alta de la ladera los planos de debilidad naturales, que son semi paralelos a la ladera y que facilitaron el deslizamiento de la roca sobre ese plano.

En la ruta de acceso a la caleta Cocholgüe son frecuentes los deslizamientos de rocas detonados por las lluvias invernales, por ser un talud de erosión activo. Las irregularidades topográficas en el sector sur de la caleta y la pérdida de continuidad del escarpe, indican paleodeslizamientos y PRM recientes. Además [Mardones y Rojas \(2012\)](#) señala la existencia de una estructura en forma de paquetes en el pie del talud, producida por la presión sobre los materiales, propia de deslizamientos rotacionales. Durante el sismo de Cauquenes, el talud se reactivó, bloqueando totalmente la vía de acceso a la Caleta. En el escarpe afloran

rocas sedimentarias paleógenas-neógenas (para más detalle ver trabajo de [Mardones y Rojas \(2012\)](#)).

Los deslizamientos superficiales se distribuyen a lo largo de toda la zona de estudio. En algunas zonas se dan como cúmulos de deslizamientos, por ejemplo en el lado sur del río Trongol en la Cordillera de Nahuelbuta (sitio 126, 127, 128, 143, 144, 145 en Anexo A), que son laderas de roca madre granítica del batolito del Carbónífero-Pérmico, con pendientes que varían entre 22° y 33°, y probablemente se encuentren con un grado alto de meteorización.

4.3.2. Caídas de roca - desprendimientos (CR)

Un desprendimiento o caída de roca son procesos gravitacionales relacionados con la caída libre de fragmentos de roca o de una mezcla de roca, suelo o ambos, desde el talud hacia el pie de la ladera ([Mardones y Rojas, 2012](#)). Suelen generarse en laderas con pendientes pronunciadas, ya sea naturalmente como en los acantilados costeros que además tienen socavamiento en su base, como taludes artificiales modificados para la construcción de caminos o expansión urbana. El rango de pendientes a las que se registró este tipo de remoción en masa varía desde 30° a 90° y se da en varias litologías, principalmente rocas sedimentarias del neógeno-paleógeno e intrusivas que presentan fracturamiento y diaclasas.



Figura 4.9: Caída de roca en calle Alto Horno, Villa Huachicoop, Talcahuano; sitio 167 del Anexo A. Fotografía obtenida de [Blanco y Creixell \(2010b\)](#)

En la Figura 4.9 se aprecia una caída de rocas desde un promontorio rocoso subhorizontal en la parte alta de la ladera, con bloques rodados de hasta 2 metros de diámetro [Blanco y Creixell \(2010b\)](#). Al parecer se trataría de roca más competente y menos meteorizada que la que se encuentra bajo ella, está última a sido removida por erosión. Según testimonios de



Figura 4.10: Caída de roca sobre roca sedimentaria meteorizada en Población Gerdarme Aguilera, Coronel; sitio 166 del Anexo A. Bloque mayor alcanza un diámetro de 1 metro. Flechas amarillas indican lugar desde el que se desprendieron. Fotografía obtenida de [Blanco y Creixell \(2010a\)](#)

habitantes de la localidad durante el sismo del 27 de Febrero del 2010, bloques cubrieron la calzada y algunos llegaron cerca de viviendas.

La expansión urbana en muchas de las localidades, ha llevado a la construcción de viviendas bajo laderas inestables, que en el evento sísmico del 27 de Febrero presentaron caídas de rocas (ver Figura 4.10), siendo potencialmente susceptibles a próximos eventos de ese tipo.

4.3.3. Deslizamientos rotacionales (DrSR)

Los deslizamientos rotacionales presentes en el catastro provienen tanto de los eventos registrados en informes del SERNAGEOMIN como de uno observado a partir de las imágenes de *Google Earth*. Este deslizamiento rotacional se ubica en Curanilahue en una ladera que cae al Estero Huillinco. Se aprecia como una reactivación de un deslizamiento anterior rotacional. En la imagen presísmica del 14 de Noviembre de 2009 está cubierto por bosque forestal, mientras en la imagen post sismo que se dispone, del 19 de Octubre del 2011 se ha talado recientemente el bosque. En la Figura 4.4 se aprecia el deslizamiento, donde se ve un cambio abrupto de pendiente y una forma cóncava y luego convexa, una corona semi lunar y el escarpe. En su flanco inferior izquierdo existe otro deslizamiento, tipo traslacional que ya mencionamos en la sección 4.3.1.

En el informe elaborado por [Blanco y otros \(2010b\)](#) se da cuenta de un deslizamiento rotacional sobre suelo seco en la vertiente sur de la Caleta Tumbes (Figura 4.11). Este des-



Figura 4.11: Deslizamiento rotacional en caleta Tumbes. Fotografía sacada de [Blanco y otros \(2010b\)](#)

lizamiento tiene una extensión de 5 m de largo por 2 de ancho, se desacopla de la roca fundamental metamórfica (esquistos) y la capa de suelo alcanza un espesor de unos 60 cm.

4.3.4. Remociones en masa mixtas (PRMi)

Corresponden a procesos en los se combinan deslizamientos con flujos. Son rápidos a extremadamente rápidos y se producen en suelos parcialmente saturados. [Mardones y Rojas \(2012\)](#) catastró dos eventos: uno en Punta Tumbes sobre roca metamórfica paleozoica meteorizada, donde la complejidad del proceso se asocia a la explotación de una cantera para áridos. Los depósitos al pie de la ladera fueron arrastrados por el tsunami. La otra remoción en masa mixto fue en una rinconada con exposición SSE del cerro Denavi Sur, sobre areniscas media a fina, arcilla inconsolidada y una capa de suelo limo-arcillosa, corresponde a una reactivación de un deslizamiento anterior. La autora postula que la meteorización de la roca, la saturación del manto meteorizado que opone poca resistencia al colapso, el ángulo de la ladera y el manejo o erosión del escarpe para construir un conjunto habitacional son los factores que facilitaron la remoción.

En la Figura 4.12 se ve un Proceso de remoción en masa mixto, donde se aprecia en la fotografía de la izquierda el escarpe desde donde se inicia el deslizamiento y a la derecha el flujo de barro. Se señala que el día en que se reconoció este proceso de remoción en masa llovía intensamente en la zona por lo que el sismo no fue zona andinae el único gatillante de este PRMi.

A través de las imágenes se identificaron otros tres procesos de remoción que al parecer



Figura 4.12: Proceso de remoción en masa mixto que involucra a un deslizamiento que termina como un flujo de barro. Fotografía facilitada por Diego Aguilera (comunicación personal).



Figura 4.13: Procesos de remoción en masa mixto. Cordillera de Nahuelbuta, comuna de Los Alamos, Octava Región. Imagen extraída de *Google Earth*, sitio 83 y 84 de Anexo A

comenzaron como deslizamientos y al entrar en una quebrada pasaron a ser flujos de detritos que no alcanzan a recorrer una larga trayectoria. En la Figura 4.13 se aprecia un proceso de remoción en masa mixto, en la comuna de Los Alamos, Octava Región; donde se aprecia un deslizamiento superficial que al llegar a la quebrada continua como un flujo.

4.3.5. Extensiones Laterales (EL)

Las extensiones laterales ocurren en suelos cohesivos o macizos rocosos que lateralmente no están confinados, cuando la capa subyacente más plástica se extiende fracturando la masa cohesiva superior. Ocurren en superficies de pendiente suave a plana, en sustratos saturados a parcialmente saturados (Keefer, 2002). Si la capa menos resistente es delgada, los bloques fracturados que lo sobreyacen pueden sufrir subsidencia, traslación, desintegración e incluso fluir. (e.g Highland y Bobrowsky, 2008)

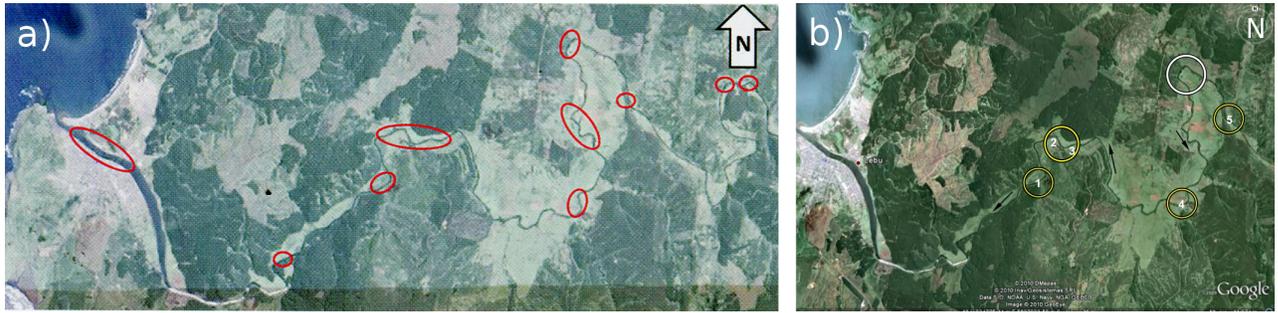


Figura 4.14: Comparación entre los registros de: a) [Verdugo y otros \(2012\)](#) b) [Duhart y otros \(2010a\)](#) en las riberas del río Lebu. Imágenes extraídas de *Google Earth*



Figura 4.15: Extensiones laterales que muestran movimientos de componentes rotacionales y traslacionales de los bloques. Ribera del río Lebu, sitio 183 del Anexo A. Fotografía obtenida de [Duhart y otros \(2010a\)](#)

Las extensiones laterales identificadas en este trabajo, provienen de registros realizados por [Verdugo y otros \(2012\)](#) y por los informes del SERNAGEOMIN ([Duhart y otros, 2010a](#); [Espinoza y otros, 2010](#)). En estos últimos, fueron clasificados como deslizamientos compuestos tanto de tipo rotacional como traslacional, pero luego de compararlos con los registros realizados por el equipo de [Verdugo y otros \(2012\)](#) en cuanto su ubicación (ver Figura 4.14), pendiente y litología, se decidió reclasificarlas como extensiones laterales.

Las extensiones laterales desencadenadas por el sismo del Maule, fueron uno de los eventos más abundantes en la zona de estudio, alcanzando a 50 eventos registrados en este trabajo. Fueron generados por la licuación de terrenos aledaños a riberas de ríos y lagos y es probablemente el fenómeno más recurrente observado a pequeña y gran escala en este terremoto ([Verdugo y otros, 2012](#)). En los ríos de las regiones VII y VIII: Nilahue, Mataquito, Itata y Biobío, Carampangue y Lebu destacan numerosos casos, en la Figura 4.15 se observan los bloques que sufren movimientos rotacionales y traslacionales al producirse una subsidencia



Figura 4.16: Flujo de barro en ladera oeste estero Ranquilco, Los Alamos, sitio 136 del Anexo A. Imagen obtenida de base de datos de imágenes de Arcgis

bajo la capa más plástica. Se generaron grietas de grandes extensiones que alcanzaron kilómetros, con aberturas y profundidades métricas en algunos lugares. Los lagos más afectados por extensión lateral fueron Laguna Aculeo, lago Rapel, Vichuquén, Calafquén, Panguipulli y las principales lagunas de Concepción. En una parte de la ribera del río Lebu, la extensión lateral alcanzan un área de aproximadamente 20000 m² (Verdugo y otros, 2012).

4.3.6. Flujo de Barro (FB)

En el sitio 136 del Anexo A, en la ladera oeste del estero Ranquilco, comuna de los Alamos, se ubica un flujo de barro identificado en las imágenes satelitales con fechas 9 de Diciembre del 2009 y 19 de Agosto del 2011. Debido al intervalo de tiempo entre ambas imágenes y que para que se genere un flujo de barro es necesario la saturación del sustrato, el grado de certeza es el mínimo dentro de la escala señalada en la subsección 4.2.1.

Al ser un sólo evento, indicaremos todas sus características de la ladera donde se identificó en este apartado, ya no se le considerará en los siguientes análisis de los factores condicionantes. Su pendiente es aproximadamente 28°, la exposición al sol es este y la litología corresponde a roca sedimentaria paleógena-neógena.

4.3.7. Remociones en masa indiferenciada (D)

Se nombró así a aquellos fenómenos de RM donde no fue posible diferenciar qué tipo de proceso de remoción en masa es, debido a falta de información a partir la fuente del que se recopiló el evento, o porque la imagen satelital por su resolución no permitía una mejor clasificación. Principalmente ocurrieron a lo largo de rutas viales con un volumen de material desplazado que en general sólo alcanza a obstruir una vía del camino. Para la mayoría de ellos no se cuenta con los datos del área involucrada, pues los eventos registrados provienen en gran parte de la base de datos del MOP y no fue posible identificarlos en el mapeo realizado usando las imágenes de Google Earth. Sin embargo, para aquellos que no cuentan con dato areal, se estima que su área es menor que 100 m^2 . El derrumbe de mayor área alcanza a 532 m^2 y se ubica en Pichilemu, en una ladera cercana a la playa.

4.4. Análisis de la distribución espacial de las remociones en masa

En la Figura 4.21 se presenta el catastro por tipo y por área de las RM identificadas, donde se aprecia su distribución espacial. Se muestra gráficamente el rango de área de las remociones, representado por diferentes radios de los círculos cuyo centro es la ubicación de alguno de los procesos de remoción en masa. Existen varios movimientos de ladera donde no existe información areal, sin embargo, también han sido incluidos en el mapa.

La distribución de las remociones en masa desencadenadas por el sismo del Maule se concentra en dos sectores principalmente, uno norte entre los 34° y 35° latitud sur y otro entre los 36.8° y 38.5° . Sin embargo en el sector norte están muy cercanas a la parte costera a diferencia de lo que ocurre en la parte sur donde se distribuyen en un área más grande que abarca toda la Cordillera de la Costa.

Se aprecia una mayor densidad de remociones en masa en la parte sur de la zona de ruptura del sismo del Maule, en la península de Arauco y Cordillera de Nahuelbuta, en lo que [Moreno \(2004\)](#) denomina Bloque de Arauco, que corresponde a un segmento del antearco que va desde el río Biobío hasta el río Imperial (ver Figura 2.8). Hay varios factores que podrían contribuir a la mayor cantidad de RM en ese lugar: i) se encuentra más cerca de la ruptura; ii) es una zona intervenida antrópicamente, con abundantes piques mineros; iii) fallas mapeadas a escala regional; iv) litología, con un porcentaje mayor de rocas sedimentarias poco consolidadas del neógeno-paleógeno; v) mayor deslizamiento del área de ruptura, en lo que [Saragoni y Ruiz \(2012\)](#) denomina la aspereza de la zona sur; vi) mayor relieve de la Cordillera de la Costa en este lugar donde alcanza alturas sobre los 1500 metros (ver Figura 2.4). En las discusiones ahondaremos más en la alta concentración de remociones en masa en este sector.

Se observa un área sin remociones en masa entre el sur de Empedrado y Punta Pullay, aproximadamente entre la latitud -35.35° S y -36.04° S en la Cordillera de la Costa, Esta zona tiene una intensidad sísmica de VII según el trabajo de [Astroza y otros \(2012\)](#) (ver Figura 3.7). Esta zona presenta algunas características que la distinguen de otros lugares a lo largo

del área de estudio. Aquí no existe un acantilado costero pronunciado; en la parte más al norte de esta región, inmediatamente al sur de Constitución las laderas están cubiertas por abundante vegetación lo que podría aumentar el factor de seguridad de las laderas ver (Lara, 2007; Erikson y Högstedt, 2004; Toro, 2007).

El área total de la superficie deslizada por fenómenos de remoción en masa alcanza alrededor de 110 mil metros cuadrados ($0,11 \text{ km}^2$). Este valor se calculó sumando las áreas de todas las inestabilidades que pudieron ser mapeadas como un polígono, más el resto de las remociones que no registraban datos de área y no podían ser mapeadas; a estas últimas se les asignó un valor estimado de 100 m^2 . La remoción en masa de mayor área mapeada corresponde al deslizamiento superficial ubicado en la ladera W del Estero Huillinco, sitio 87 del Anexo A y la más pequeña es el proceso de remoción en masa mixto en Caleta Las Peñas que involucró un área de 30 m^2 , sitio 205 del Anexo A.

Las remociones en masa se concentran a una distancia al epicentro entre 150 y 250 kilómetros, sin embargo este dato no es muy relevante, al ser éste un evento con una gran área de ruptura, que tuvo sus mayores deslizamientos y por tanto, mayor liberación de energía en sus extremos (e.g Lorito y otros, 2011; Ruiz y Madariaga, 2012; Barrientos, 2012; Saragoni y Ruiz, 2012).

En la Figura 4.17 se observa como la mayor concentración de las RM desencadenadas por el sismo del Maule se encuentra en las zonas que según el modelo de deslizamiento de Lorito y otros (2011) muestran los mayores deslizamientos, del orden de 10 m, en la península de Arauco y en las costas de la Sexta Región.

En la Figura 4.18 se observa que las remociones en masa en la zona occidental (Planicie Litoral y Cordillera de la Costa) tienen una distancia a la ruptura en el rango de 21.76 a 85.53 km. La más cercana a la fosa es un deslizamiento superficial en un paleoacantilado en al NE de Isla Mocha (sitio 153 del Anexo A) y el más alejado el deslizamiento sobre arena en Viña del Mar (sitio 11 anexo A). Entre los 30 y 40 km del área de ruptura es donde se concentran las remociones en masa, con una media de 39 km.

El gráfico de la Figura 4.18 no muestra una tendencia clara que correlacione el área de las remociones y distancia a la ruptura, ya que hay muchos factores más en juego, como son el tipo de litología presente y su resistencia a tensiones, geometría de la ladera, espesor y tipo de suelo, condiciones hidrológicas e intervención antrópica.

Tabla 4.2: Remociones en masa de mayor área. Ver Anexo A.

Sitio	Localidad	Área [m^2]
87	Estero Huillinco	13234
203	Caleta Cocholgue	5000
31	Acantilado costero	3811
35	Cerro Doñihue	3336
30	Puertecillo	3105

En la Tabla 4.2 se indican los cinco deslizamientos de mayor área. En el caso de Caleta Cocholgue es habitual la caída de material debido al talud artificial realizado para la construcción del camino que conecta esa localidad con Tomé, presenta una inestabilidad ocasionada

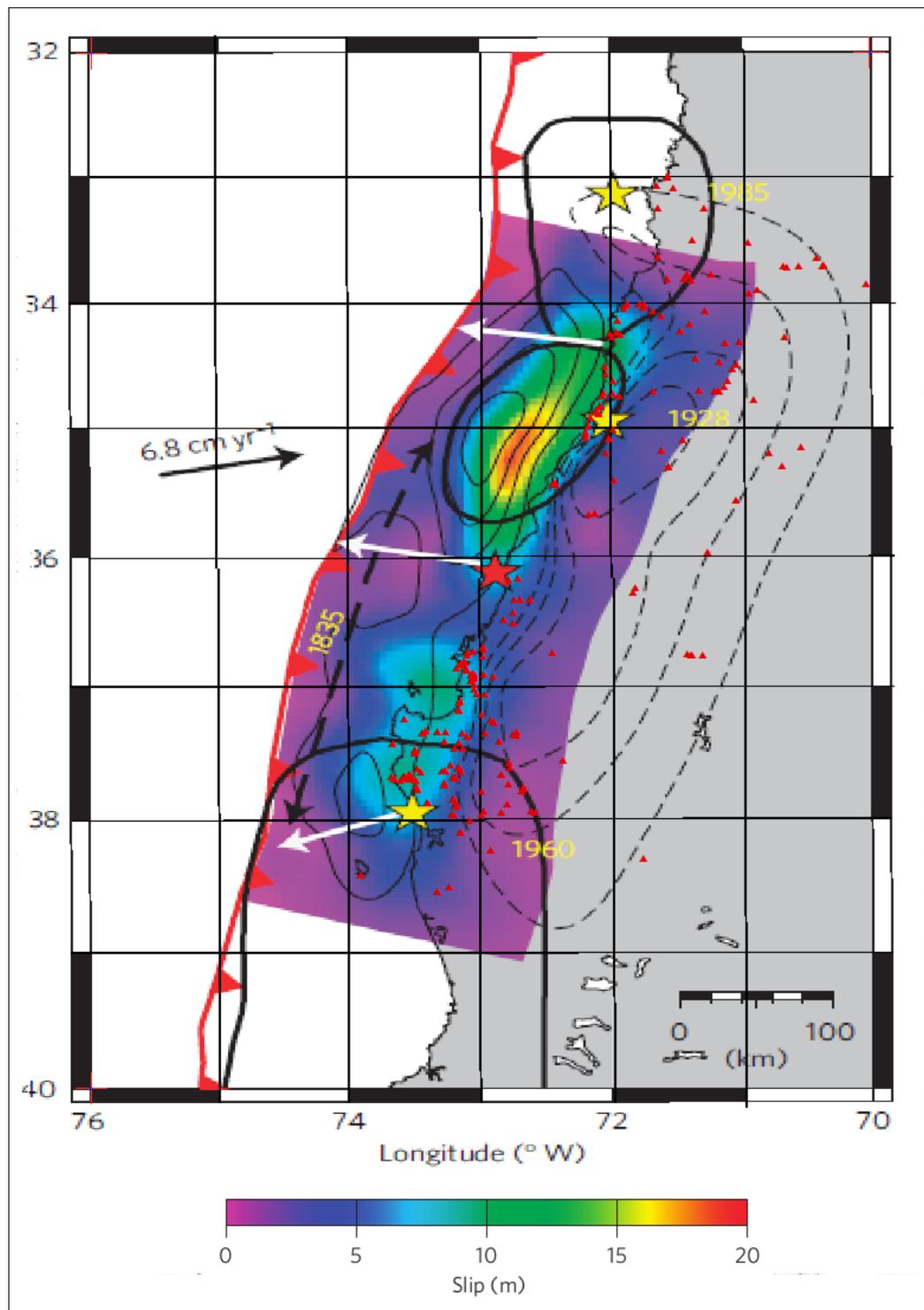


Figura 4.17: Mapa con el modelo de deslizamiento de la zona de falla de [Lorito y otros \(2011\)](#). En triángulos rojos las RM identificadas en este estudio.

por la litología (rocas sedimentarias paleógenas-neógenas) y por paleodeslizamientos en la zona ([Mardones y Rojas, 2012](#)).

Calculamos el área siguiendo lo realizado por [Keefe \(1984\)](#), donde considera el área afec-

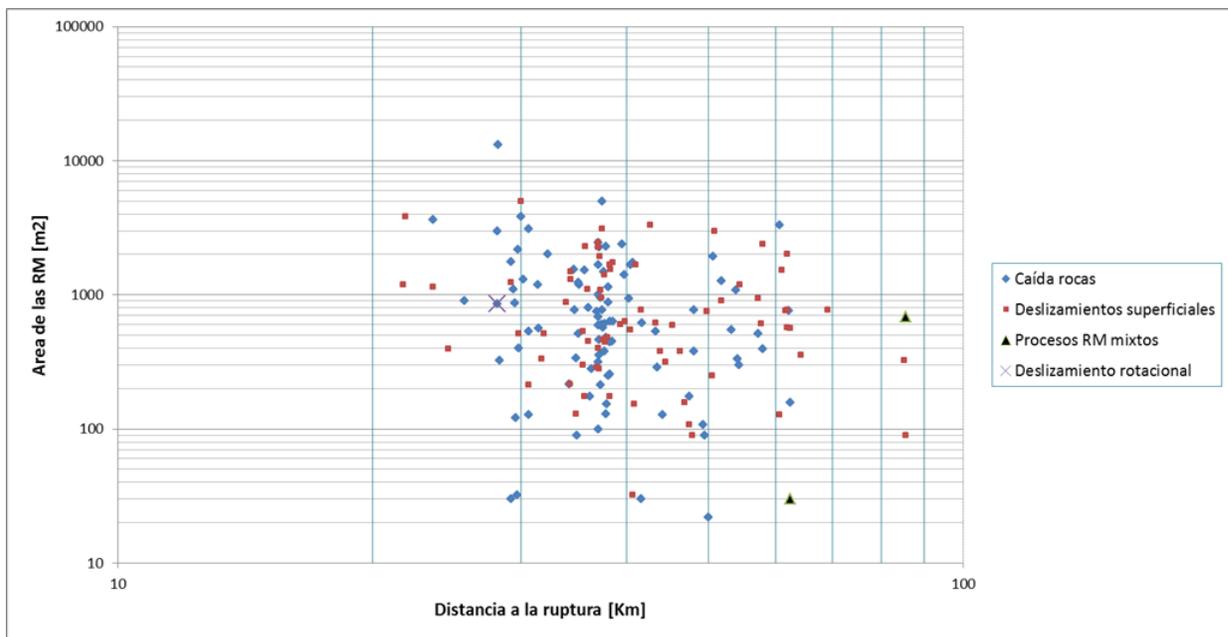


Figura 4.18: Área de las remociones en masa vs distancia a la superficie de ruptura.

tada por las remociones desencadenadas por un sismo como la superficie que las encierra a todas, sin importar si se incluyen zonas que no registran remociones. En la Figura 4.19 comparamos el área afectada por el sismo del Maule con las curvas límite realizadas por Keefer (1984) y Rodríguez y otros (1999) en base a recopilación de registros históricos a nivel mundial de eventos de remociones en masa generadas por sismos. Se observa que está bajo la curva límite por lo que corresponde a lo que se esperaría de RM generadas por un sismo de magnitud M_w 8.8.

Si estudiamos que sucede con la distancia a la ruptura según categoría obtenemos los gráficos de la Figura 4.20. En la imagen superior observamos la distancia máxima a la ruptura de deslizamientos disgregados, cabe señalar que este dato proviene de Wick y otros (2010) el que registro caída de rocas en el Valle Las Cuevas, Argentina, en la ruta 7 y que es el evento registrado más alejado del área de ruptura, el punto **a** corresponde al evento principal, y los puntos **b1** y **b2**, se generaron luego de réplicas. En la imagen inferior tenemos la máxima distancia a la ruptura a que se registraron extensiones laterales (flujos), que cumplen con presentarse más cercanas a la superficie de ruptura del sismo, relación que tanto Keefer (1984) como Rodríguez y otros (1999) dejaron de manifiesto en sus curvas límite.

Como punto de comparación con otro sismo interplaca tipo thrust, tenemos que las RM gatilladas por el sismo de Valparaíso ($M_w=8.1$), del 3 de Marzo de 1985, afectaron un área de 11000 km² según se indica en Rodríguez y otros (1999), aunque en ese dato sólo se consideraron las RM en la parte costera.

Se observan un importante número de remociones en masa en torno a estructuras geológicas a escala regional como en el caso de la península de Arauco y la zona del lago Vichuquén (ver Figura 4.21). También se concentran en cuencas del paleógeno-neógeno como son la cuenca de Arauco (Martínez-Pardo, 1990) y en la Cordillera de Nahuelbuta. Dichos cúmulos

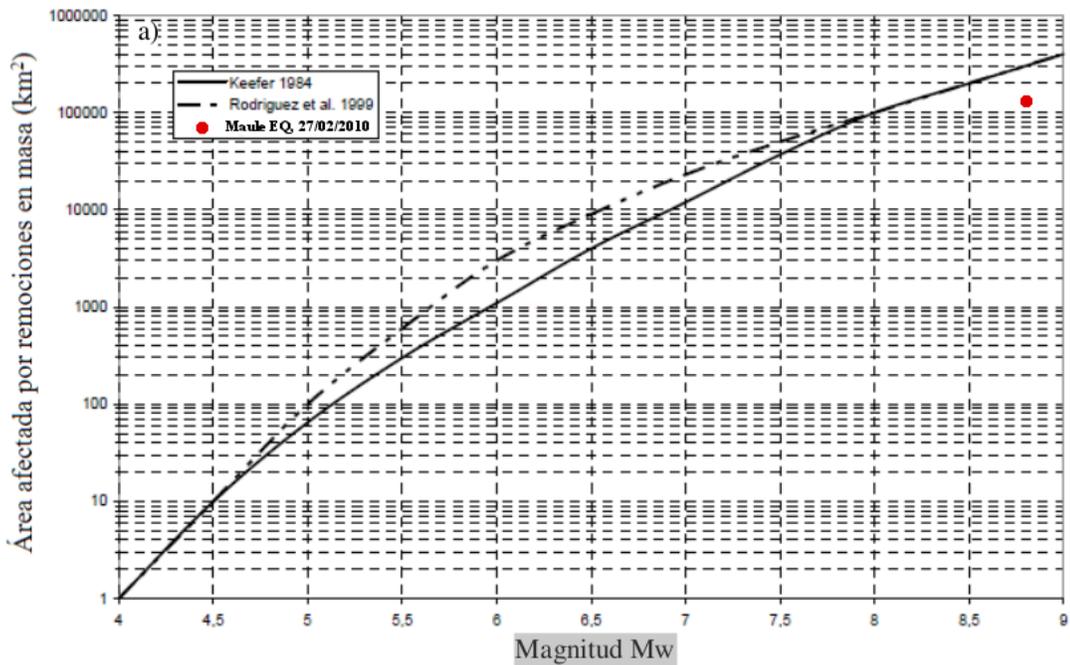


Figura 4.19: Comparación con las curvas para el área afectada por remociones en masa desencadenadas por sismos confeccionadas por [Keefe \(1984\)](#) y [Rodríguez y otros \(1999\)](#) en base a recopilación de eventos a nivel mundial.

pueden agrupar hasta 5 RM en un radio menor a un kilómetro cuadrado, alcanzando una concentración máxima de 9.5 RM/Km² en Estero Cabrería, Cañete. Aproximadamente un 18 % de todas las remociones en masa identificadas se ubican en la Cordillera de Nahuelbuta.

Otra correlación interesante de realizar es la relación entre la intensidad sísmica y las remociones que se generaron. Superpusimos el mapa de intensidades sísmicas (ver Figura 3.7) realizado por [Astroza y otros \(2012\)](#) sobre el mapa de los puntos donde se desencadenaron remociones producto del sismo del Maule (ver Figura 4.21). En la Figura 4.22 se aprecia como a mayor intensidad mayor concentración de remociones en masa. Cabe señalar que la distribución dentro del área de cada isosista no es uniforme, en especial para el área correspondiente a la isosista VI donde las remociones en masa se agrupan en los extremos norte y sur, que coinciden con la Cordillera de la Costa, además de la península de Arauco en el caso de la parte sur.

[Astroza y otros \(2012\)](#) explica la forma de las isosistas basado en el mayor deslizamiento del área de ruptura alrededor de la aspereza norte (punto rojo en Figura 4.1) ([Vigny otros, 2011](#); [Lorito y otros, 2011](#); [Pulido y otros, 2011](#); [Tong, 2010](#)). Sin embargo en [Saragoni y Ruiz \(2012\)](#) se dice que los acelerógramas de mayor aceleración máxima, mayor duración del movimiento fuerte y mayor potencial destructivo, se ubican al sur de la ruptura del sismo del Maule ([Saragoni y Ruiz, 2012](#)). Queda la interrogante de por qué lo que indica [Saragoni y Ruiz \(2012\)](#) no se ve reflejado en la intensidad sísmica determinada por [Astroza y otros \(2012\)](#). Se dejará para la sección Discusiones esta pregunta.

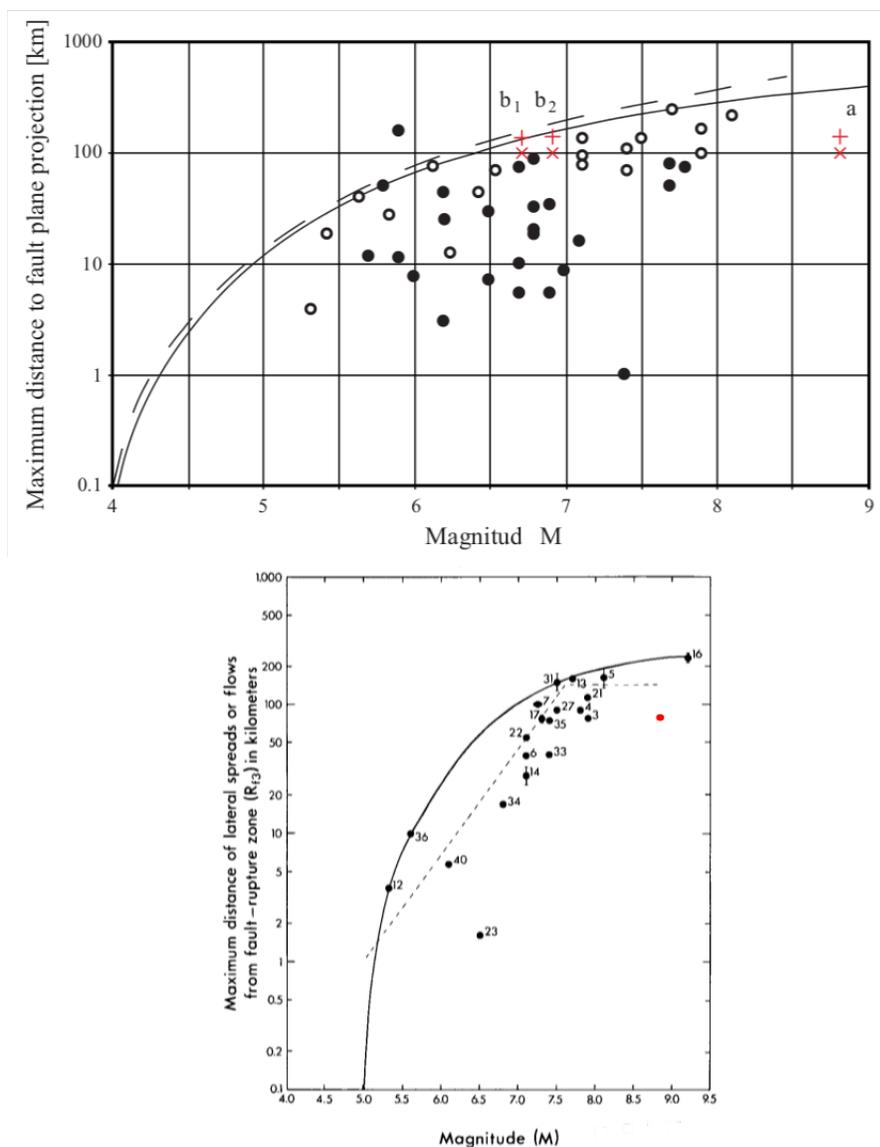


Figura 4.20: Comparación de las curvas de Keefer (1984). Imagen superior extraída de Wick y otros (2010), muestra la distancia máxima a la proyección del plano de falla de deslizamientos disgregados (caídas de rocas), en ruta nacional 7, Argentina. Imagen inferior modificada de Keefer (1984), el punto rojo indica la máxima distancia al plano de falla calculado en este trabajo.

4.5. Análisis de los factores condicionantes.

En el análisis que se realiza a continuación se consideraron solamente las remociones en masa registradas en la zona occidental, que se desencadenaron sobre laderas pertenecientes a las unidades morfológicas Plataforma Costera y Cordillera de la Costa, pues es esta zona la que fue cubierta mediante la observación de imágenes satelitales y se tiene un número de RM que permite realizar un análisis. En adelante a esta zona la designaremos como “zona de estudio” o “área de estudio”.

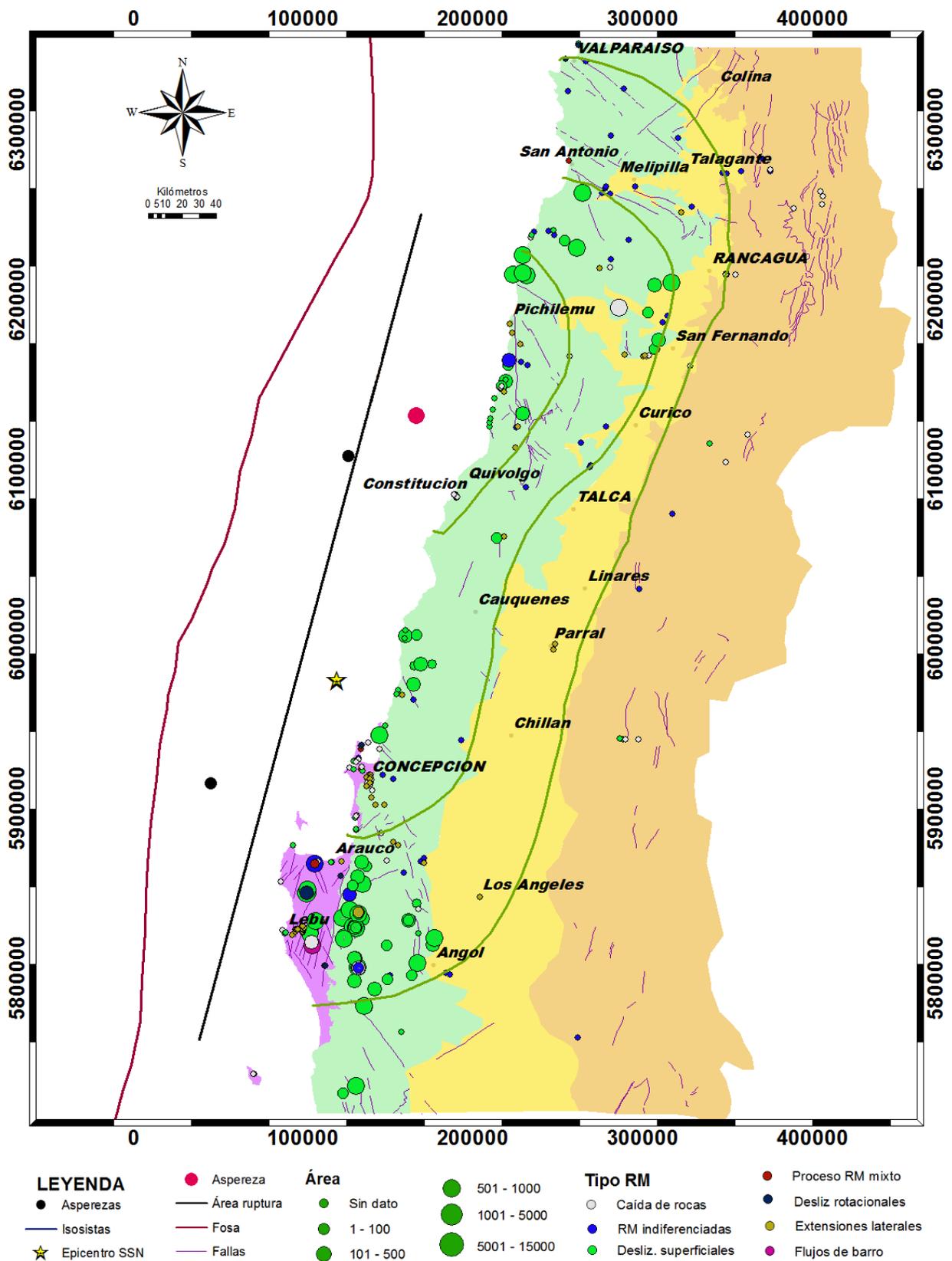


Figura 4.21: Mapa de la distribución de las remociones en masa por tipo, junto con factores con los que se puede correlacionar su ocurrencia según Tong (2010). Fallas de acuerdo a SERNAGEOMIN (2003), asperezas (negras) y área de ruptura según Vignny otros (2011), aspereza norte (roja), epicentro informado por Servicio Sismológico de Chile, isosistas extraídas de Astroza y otros (2012).

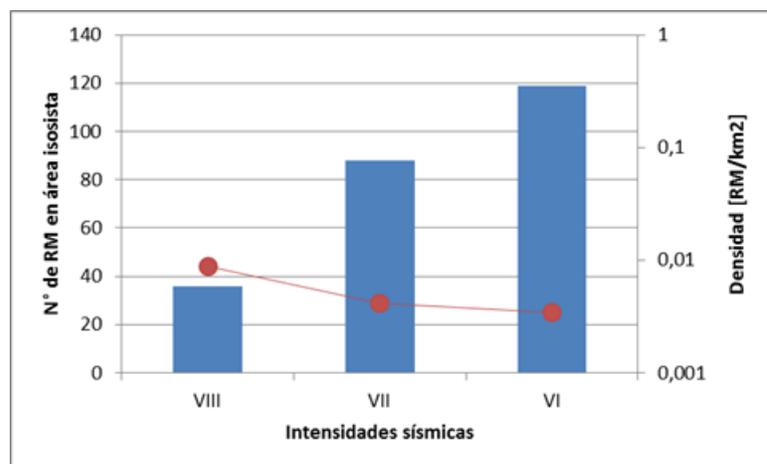


Figura 4.22: Cantidad (barra) y densidad (línea) de remociones en masa entre cada isosista.

4.5.1. Relación entre litología y ocurrencia de remociones en masa.

Uno de los factores que resulta interesante correlacionar con las remociones inducidas por la agitación sísmica es la litología de la ladera. En el mapa litológico de la Figura 2.7 se puede observar cómo algunas de las litologías presentes son más abundantes que otras, por esto se hace relevante considerar además de la cantidad de remociones en masa sobre cada tipo de roca o depósito, cuántas son por unidad de área, es decir, su concentración.

En el gráfico superior de la Figura 4.23 apreciamos el porcentaje de área que cubre cada litología. Predominan con un 40 % las rocas intrusivas del Batolito Costero, seguidas por las rocas metamórficas (21 %) del Basamento Metamórfico que constituyen el esqueleto de la Cordillera de la Costa.

El tercer material más abundante (12 %) en la zona de estudio son los depósitos no consolidados que rellenan los valles fluviales inmersos en la Cordillera de la Costa y los sedimentos actuales en la zona costera de la región estudiada.

El cuarto puesto es compartido por las rocas sedimentarias paleógenas-neógenas y las rocas volcanoclásticas que representan un 9 % del área de estudio. Las rocas sedimentarias del Paleógeno-Neógeno constituyen prácticamente en su totalidad la península de Arauco y se encuentran en la mayor parte de la zona costera de la comuna de Navidad, mientras las rocas volcanoclásticas afloran en la parte norte del área de estudio, en la parte más oriental de la Cordillera de la Costa hasta aproximadamente la latitud de San Javier (VII región).

Las litologías que cubren menos área de la zona estudiada son: i) Rocas sedimentarias pérmicas-mesozoicas que se observan principalmente entre el sur de Pichilemu y el norte del río Ñuble; ii) Depósitos piróclásticos pleistocenos que se encuentran en valles dentro de la Cordillera de la Costa de las regiones V y VI; iii) Rocas Volcánicas entre la latitud de Rancagua y Talca en la parte central de la Cordillera de la Costa. i) y ii) cubren un 3 % de área y iii) tan sólo un 2 % (ver Figura 4.23).

El gráfico inferior de la Figura 4.23, muestra la cantidad de remociones en masa catastradas

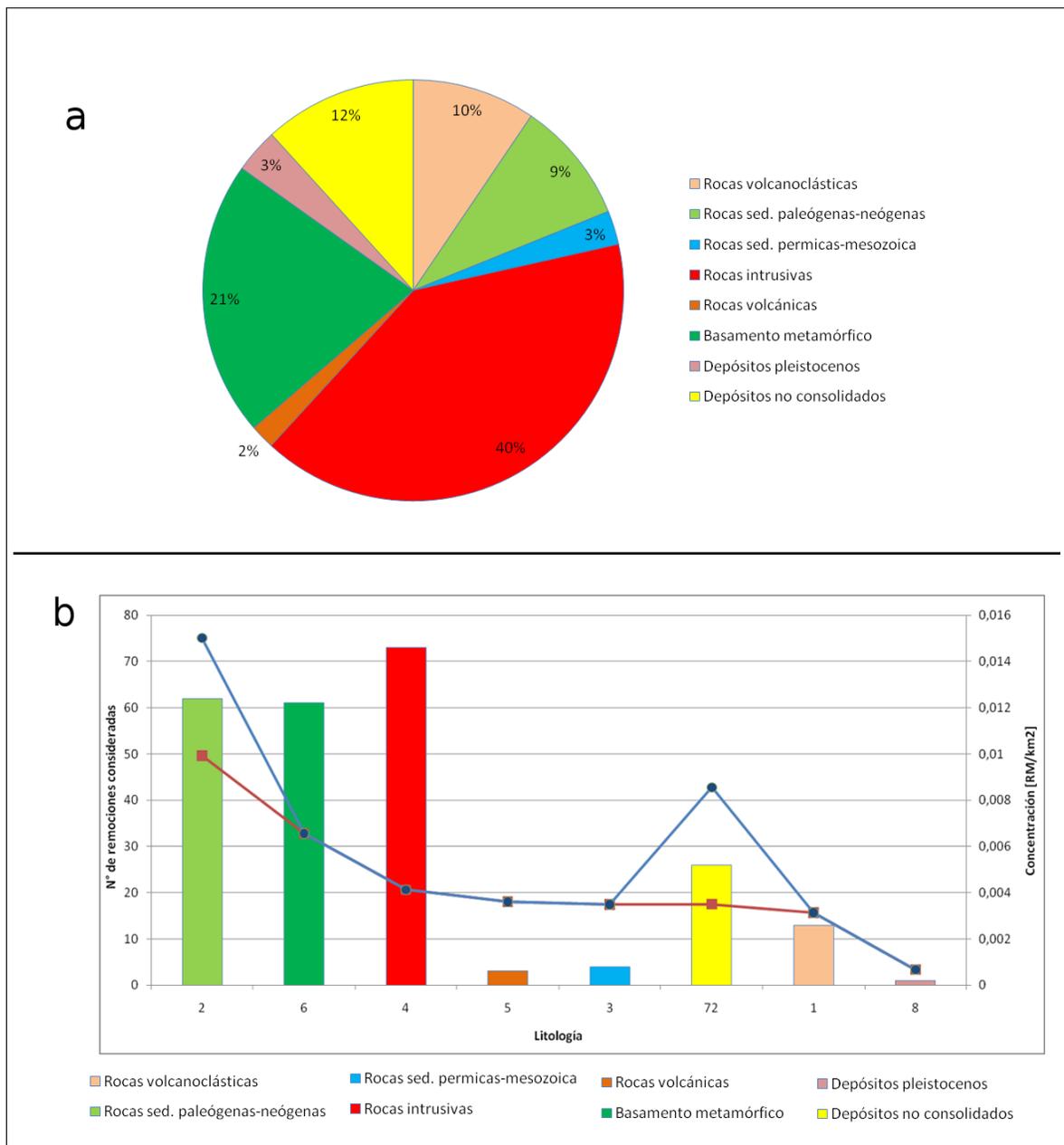


Figura 4.23: Arriba: Gráfico circular representa el porcentaje de área cubierta por cada litología. Abajo: Gráfico de barras con el número de remociones en masa registradas de acuerdo a cada tipo de litología; el gráfico de líneas indica la concentración de RM según litología, considerando todos los tipos de remociones (línea azul) y sin las extensiones laterales (línea burdeo).

(barras) y su concentración (líneas azul y burdeo). La concentración se calculó dividiendo el número de remociones sobre el área que cubre cada litología en el área de estudio. En la concentración graficada como una línea azul se han considerado todas las remociones en masa registradas en la zona de estudio, sin diferenciar a que tipo de remoción corresponden, también se calculó una concentración sin considerar las extensiones laterales (línea burdeo), pues ellas tienen características diferente al resto de las RM estudiadas en cuanto su ubicación que se limita a bordes de ríos y lagos, por lo que priman los depósitos actuales de esos ambientes sedimentarios. Así vemos en la Figura 4.23 como las concentraciones sobre depósitos no

consolidados representan el tercer puesto considerando las extensiones laterales y el sexto, cuando se las excluye del análisis.

Ordenadas de mayor a menor las litologías que presentan el mayor número de remociones en masa (sacando extensiones laterales) por unidad de área son:

1. Rocas sedimentarias neógenas-paleógenas,
2. Basamento metamórfico,
3. Depósitos no consolidados,
4. Rocas intrusivas,
5. Rocas volcánicas,
6. Rocas sedimentarias pérmicas-mesozoicas,
7. Rocas volcanoclásticas y
8. Depósitos piróclásticos pleistocenos.

La mayor cantidad de remociones inducidas por el terremoto del 27 de Febrero del 2010 sobre rocas sedimentarias paleógenas-neógenas se ubican en la península de Arauco. Esta litología presenta el mayor número de caídas de rocas, extensiones laterales y deslizamientos rotacionales, como se aprecia en el gráfico de barras de la Figura 4.24. En la visita a la zona de Navidad, la geología de la ladera donde se produjo el deslizamiento en la ladera norte del río Rapel, se observa como sedimentos arcillizados, poco consolidados y sin litificación que corresponden a la Formación Navidad. Las caídas de rocas se dan principalmente en taludes abruptos en acantilados y en caminos, asociados a un diaclasamiento multidireccional que genera bloques propensos a caer por acción de la gravedad. (Contreras y otros, 2010).

Respecto a sus propiedades geotécnicas, los valores típicos de resistencia de la matriz rocosa sana para areniscas, lutita, limolita, coquina y caliza están en el rango medio bajo, siendo la lutita la que presenta menor resistencia a la compresión simple y las areniscas las que pueden alcanzar los valores más altos (Anexo C). Sin embargo para poder entregar una buena caracterización del comportamiento geotécnico de las rocas donde fallaron las laderas, es necesario realizar ensayos geotécnicos de muestras, lo que está fuera de los alcances de este trabajo.

También se identificaron una cantidad importante de remociones en basamento metamórfico, compuesto principalmente por metapelitas, esquistos, filitas, pizarras. Es la litología donde mayoritariamente ocurren los deslizamientos superficiales (ver Figura 4.24). En Lumaco, provincia de Malleco, región de la Araucanía Duhart y otros (2010b) observaron un deslizamiento de suelo y roca en rocas metamórficas tipo filitas fisibles, intensamente fracturadas y con una foliación en la misma dirección del corte del talud. Señalan que la dirección de traslación es consistente con la foliación promedio de N75°E/30°N. Otro factor interesante en este deslizamiento es la presencia de una falla inmediatamente bajo la capa de suelo de rumbo N20°E y subvertical, que controlaría la ocurrencia de esta remoción en masa. Los depósitos a la fecha del registro (18 de Marzo de 2010) estaban inestables y presentaban peligro de ser arrastrados pendiente abajo durante periodos de lluvia y/o movimientos sísmicos afectando a las casas más cercanas.

En la Figura 4.23 podemos apreciar como la mayor cantidad de remociones ocurre sobre

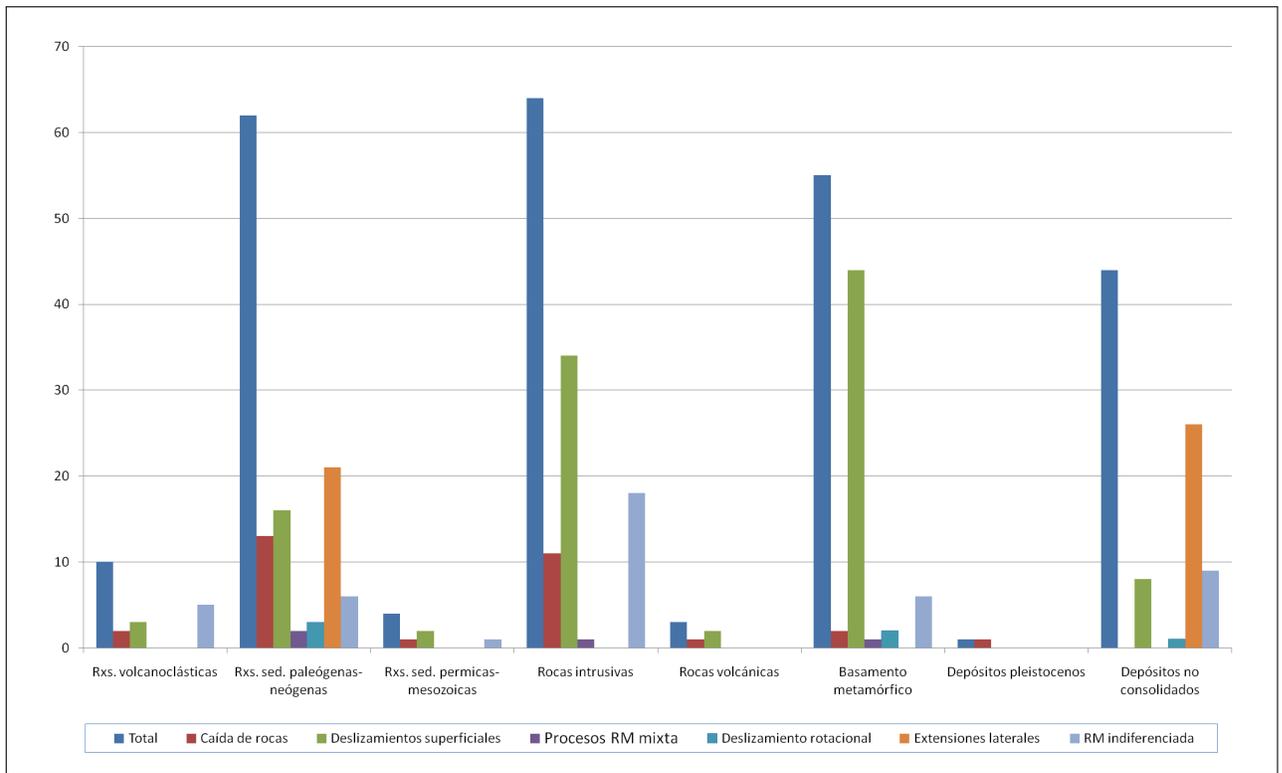


Figura 4.24: Gráfico del número de remociones en masa vs la litología, para cada tipo de RM.

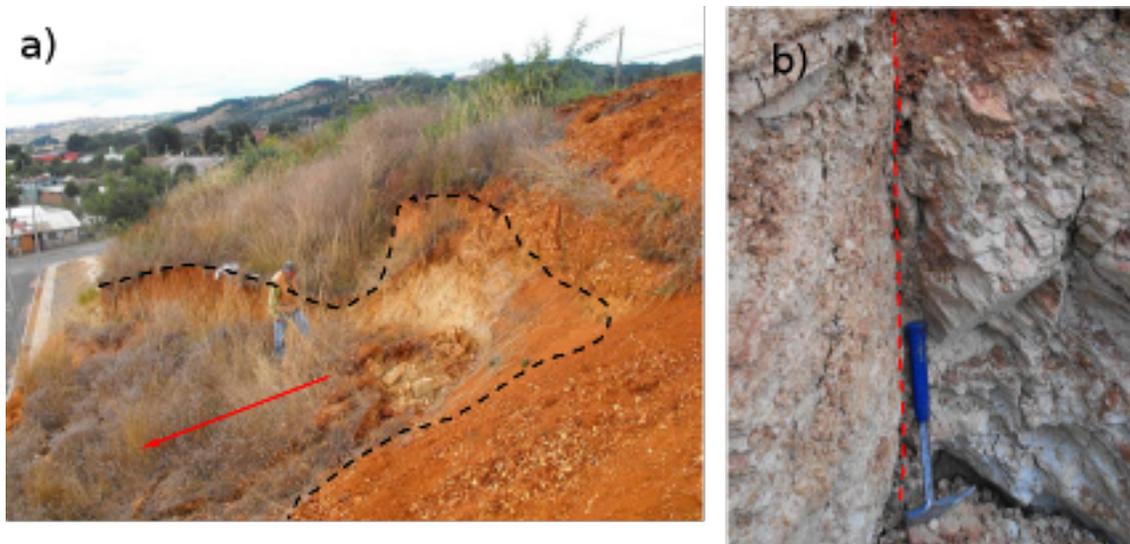


Figura 4.25: Remoción en masa en Lumaco, IX Región. a) Deslizamiento suelo y rocas en Lumaco. Línea cortada indica corona, salto (1.5 m) y su traslación (flecha) b) Plano de falla en rocas metamórficas de rumbo N20° E y manto subvertical. Se indica con línea cortada su traza principal. Fotografías sacada de [Duhart y otros \(2010b\)](#).

rocas intrusivas de edades que varían entre carboníferas hasta jurásicas, aunque al ponderarlo respecto al área que cubre esta litología, sea la tercera con más concentración de RM. Como vimos en la subsección 2.2 ellas corresponden a granito, granodiorita, tonalita, diorita. Este

tipo de roca tiene una resistencia media a la compresión simple, alcanzando valores de entre 500 y 3500 kp/cm² para la matriz rocosa sana (González y otros, 2004), sin embargo las rocas graníticas que afloran en la región presentan en general una alta meteorización y son erosionadas rápidamente por las lluvias invernales (Toro, 2007). Según Ferraris y Bonilla (1980) en la hoja Angol-Los Angeles el mayor fracturamiento y/o fallamiento ocurre en la Cordillera de Nahuelbuta especialmente afectando al Batolito Costero.

El producto de la meteorización de las rocas graníticas es el maicillo. Según lo indicado por Toro (2007) el suelo generado a partir de la meteorización creciente en profundidad de roca madre granítica puede mantener los planos de clivaje o diaclasas del macizo rocoso que le dio origen, los que a veces pueden estar rellenos de arcilla y constituir planos de debilidad. Esto favorece los deslizamientos dependiendo de que dichos planos tengan suficiente frecuencia y cómo se orienten respecto al corte de la ladera. La resistencia al corte de estos planos argilizados es baja, más aún cuando hay interacción con agua.

Diferentes deslizamientos registrados con anterioridad se encuentran asociados a este tipo de litología, como son las remociones en masa generadas en el sector costero de la región del Biobío el año 2005 y los frecuentes deslizamientos en Viña del Mar y Valparaíso en diferentes años (Erikson y Högstedt, 2004; Toro, 2007).

La concentración de RM depósitos no consolidados muestran una variación importante si se consideran o no las extensiones laterales, ya que un total de 26 RM, 9 son de este tipo. La razón de ello es que las zonas donde se ubican principalmente los depósitos no consolidados son más bien planas por lo que las condiciones son poco favorables a movimientos donde sea primordial el factor gravitacional, como en las caídas de rocas y deslizamientos. Una excepción a esto fueron los deslizamientos de arena en Viña del Mar (sitio 11 Anexo A, Gajardo y otros (2010)), que ocurrieron en dunas de una altura aproximada de 50 metros a una cota de 80-90 m s.n.m. Se señala en el informe que la arena se encontraba seca y que el comportamiento fue diferenciado entre duna con vegetación (donde no ocurrió movimiento) y desforestada. Lo que deja de manifiesto la acción protectora de la capa vegetal en procesos superficiales.

Sobre los depósitos piroclásticos pleistocenos sólo una remoción en masa fue registrada en el área de estudio, en la parte sureste del lago Rapel, comuna de Las Cabras (sitio 285 del Anexo A, comunicación personal Romero, J.), en el talud de un camino donde cayeron bloques. En Romero y otros (2010) se menciona que en el sector del Lago Rapel es común encontrar deslizamientos de ladera importantes con grandes bloques rodados, agrietamientos, fenómenos de subsidencia y licuefacción sobre depósitos de la Ignimbrita Pudahuel y que durante el sismo del 27 de Febrero del 2010 y sus replicas no fue la excepción. En la zona precordillerana, en la comuna de Machali, localidad de Tierras Blancas Romero (2010) y Sepúlveda (comunicación personal) registraron poco después del sismo principal deslizamientos superficiales, caídas de roca y un deslizamiento rotacional en la Carretera del Cobre (sitios 280-284 y 269 del Anexo A).

Cabe señalar que en los sitios 105, 106 y 107 del Anexo A en las comunas de Coronel y Talcahuano, se originaron sobre relleno artificial dispuesto para nivelar el terreno para la construcción de viviendas. En el caso de el sitio 107 en la población Los Lobos Viejos el deslizamiento produjo daños en las casas que se ubican bajo la ladera (Blanco y otros,

2010b).

4.5.2. Orientación y pendiente de las laderas donde se generaron remociones en masa.

Las pendientes y orientaciones de las remociones se obtuvieron mediante herramientas del programa *Google Earth*, debido a las pequeñas dimensiones de las remociones que se indujeron por el sismo del Maule y sus réplicas, además porque según algunos trabajos como el de [Cascante \(2010\)](#) los datos topográficos tienen menor error respecto a lo que se mide en terreno.

En el gráfico de la Figura 4.26 vemos el número de remociones en masa en las que se posee información de la pendiente ordenadas según rango usado por [Lara \(2007\)](#) en la confección de las ponderaciones para un mapa de susceptibilidad de remociones en masa. Al considerar el total de las remociones en masa desencadenadas por el sismo del Maule, en el área de estudio, se tiene que la mayor parte de las RM se concentra entre los 0° y 15° . Pero es necesario tener en cuenta que esta alta cifra corresponde casi en su totalidad a extensiones laterales (47) y algunos pocos deslizamiento que ocurrieron en pendientes suaves (5).

Las laderas fallaron como deslizamientos superficiales a ángulos desde los 13° hasta más de 60° , mostrando un amplio espectro de pendientes a las que pueden ocurrir. La mayor cantidad ocurrió entre los 16° y 25° disminuyendo en número a medida que los rangos de pendiente aumentan, registrándose 4 deslizamientos superficiales a pendientes mayores que 60° . Se debe considerar que las laderas con altas pendientes no son comunes dentro de la zona de estudio, como se visualizó en el mapa de pendientes de la Figura 2.6.

La mayor cantidad de caídas de rocas se observa a pendientes mayores de 60° . La pendiente menor donde se registra una caída de rocas es en el sector centro de Isla Mocha en una ladera con pendiente de 30° ([Mardones y Rojas, 2012](#)) sobre filitas y esquistos con un alcance de 61 m (sitio 152 Anexo A).

Los deslizamientos rotacionales registrados se dan entre los 31° y 60° ; y los procesos de RM mixtos ocurren entre los 16° hasta los 60° . Estos dos tipos de remociones fueron poco representados en los movimientos de laderas que se registraron y menos aún los que cuentan con información de las pendientes de ladera.

Otro factor que se examinó en este estudio es la orientación de las laderas, que indica la exposición al sol que sufre, el que si bien tiene un peso menor que la pendiente ([Lara, 2007](#); [LEU, 2013](#)) no deja de ser relevante como condicionante de la generación de una remoción en masa.

La orientación de la ladera la medimos usando el ángulo que forma la línea de máxima pendiente de un elemento de la superficie del terreno con respecto al norte geográfico (según el sentido de las agujas del reloj), según el rango de los ángulos se determinó la exposición al sol de la ladera de la forma que se indica a continuación: Norte: $1^\circ - 45^\circ$ y $315^\circ - 359^\circ$; Este: $45^\circ - 135^\circ$; Sur: $135^\circ - 225^\circ$; Oeste: $225^\circ - 315^\circ$.

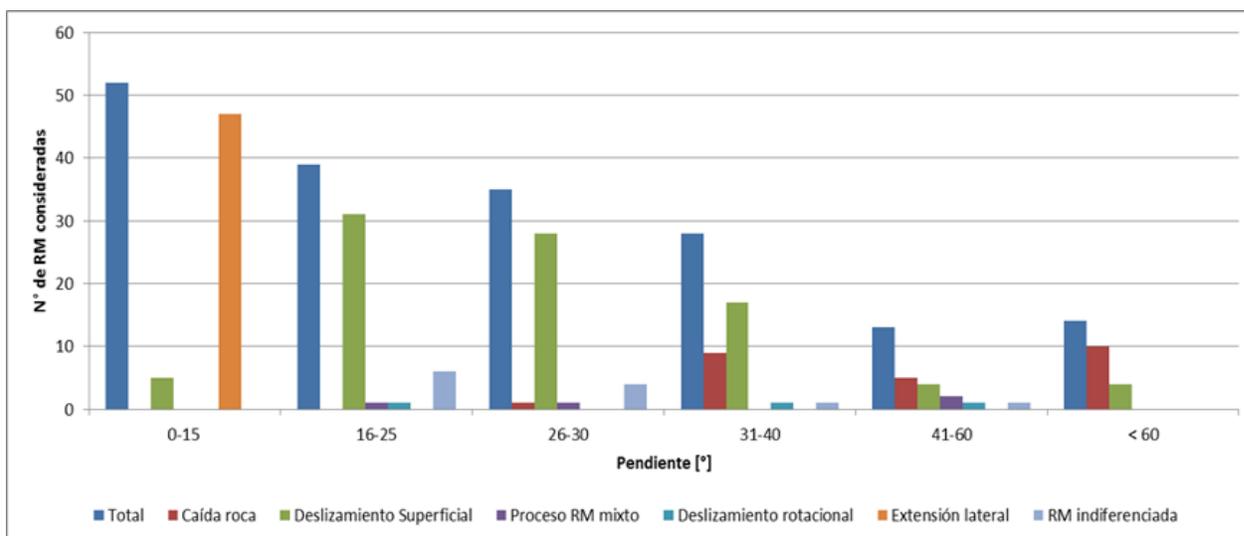


Figura 4.26: Gráfico del número de remociones en masa versus la pendiente de la ladera donde se producen, para cada tipo de RM. Se utilizaron los rangos de pendiente de acuerdo a tablas para calcular la susceptibilidad de la ladera a RM (Lara, 2007).

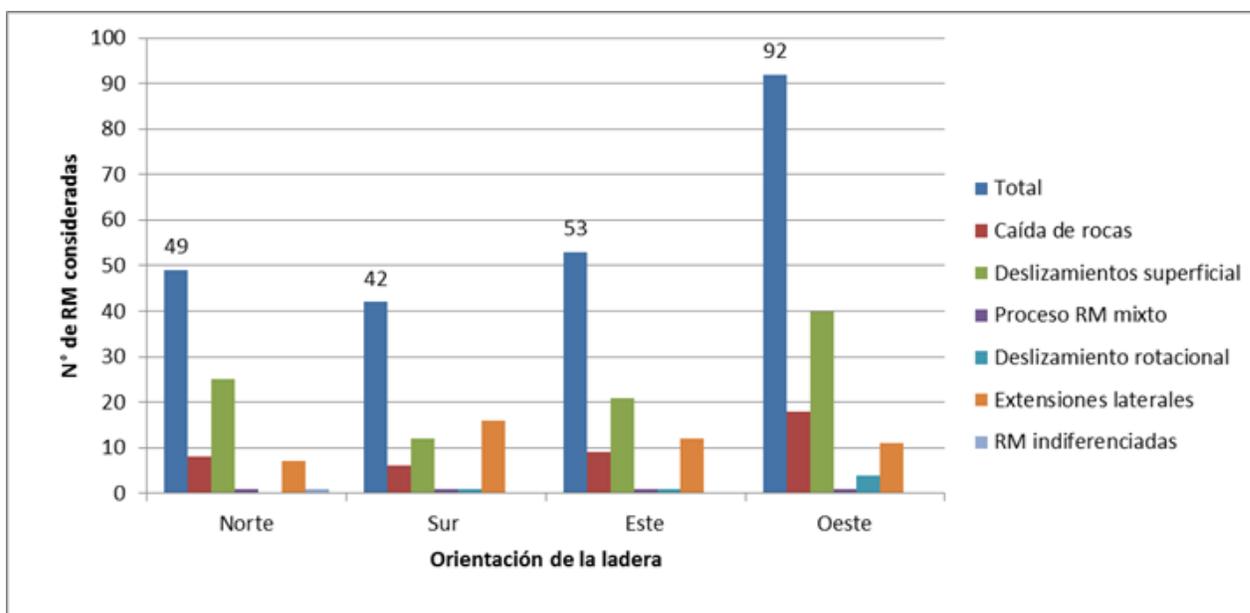


Figura 4.27: Gráfico del número de remoción en masa versus la orientación de la ladera donde se producen. Norte: 1°-45 y 315°-359°; Este: 45°-135°; Sur: 135°-225°; Oeste: 225°-315°.

Cuando consideramos el total de remociones en masa se tiene que la orientación de las laderas que fallan es principalmente Oeste (ver Figura 4.27), esto se debe en gran medida a las remociones que ocurren en los acantilados costeros que tienen esa orientación preferentemente.

Para las extensiones laterales se tiene que la orientación preferencial es la sur, quizás porque al tener menos tiempo diario de exposición solar, se encuentre con un mayor grado

de saturación.

Notamos que para los deslizamientos superficiales la orientación norte es la segunda en importancia, lo que puede explicarse considerando que en Chile Central la exposición al sol de las laderas que dan al Norte ocurre durante todo el día lo que favorece el ressecamiento de los materiales, compactación y fragmentación mecánica en suelos arcillosos, aumentando su susceptibilidad a movimientos gravitacionales de tierra (Peña y Mardones, 1999).

4.5.3. Posición relativa de las remociones en masa en las laderas.

Se ha estudiado que las aceleraciones sísmicas varían dependiendo del tipo de suelo, aumentando en suelos tipo la topografía también juega un rol importante en la amplificación de las ondas sísmicas ya que en la base de una cima topográfica las ondas son parcialmente reflejadas hacia la roca y difractadas a lo largo de las superficies libres, lo que conlleva a mayores amplitudes en el movimiento del terreno hacia las crestas de las laderas que en la base de ellas.

Diferentes estudios (e.g Meunier y otros (2008); Sepúlveda y otros (2005a,b)) han propuesto que la posición en las que se producen las remociones en masa respecto a la altura de las laderas es un indicador de amplificación topográfica. Los casos que ellos analizaron tratan de remociones en masa inducidas por sismos superficiales intraplaca de fallas con movimiento inverso.

El trabajo de Meunier y otros (2008) usa una metodología gráfica para representar la ubicación de las remociones en masa a la ladera. La posición de las RM es descrita usando tres parámetros: 1) la distancia desde el punto más alto sobre la corona de la remoción en masa y la cresta de la ladera en la que se localiza; 2) la distancia que separa la lengua (toe) del deslizamiento y la parte más baja del valle en que se encuentra la ladera en estudio y 3) la longitud del deslizamiento medido a lo largo de la línea de mayor pendiente. Para mayor claridad en la Figura 4.28 se muestra un esquema de cuales son los parámetros 1) y 2) mencionados. En el presente estudio, esas distancias se midieron usando la herramienta para medir longitudes de *Google Earth* sobre una línea con la máxima pendiente que pasa sobre la RM estudiada trazada previamente.

La Figura 4.29 muestra en la abscisa la distancia entre la cresta de la ladera y el punto más alto del deslizamiento (corona) y en la ordenada la distancia entre la base de ladera y el punto más bajo de la RM, ambas normalizada por el largo total de la ladera (desde la cresta hasta la base). Los datos en el gráfico que caen a lo largo del eje Y se originan cerca o en la cresta del monte y, los que se están a lo largo del eje X corresponden a aquellas que terminan en un canal de drenaje. Los datos que se encuentran lejos de ambos ejes indican una situación intermedia.

En el gráfico de la Figura 4.29 observamos que la mayoría de las RM terminan en un canal de drenaje, por esa misma razón en muchos casos parte o la totalidad del depósito está ausente.

Distancia entre el escarpe del deslizamiento y la cresta de la ladera

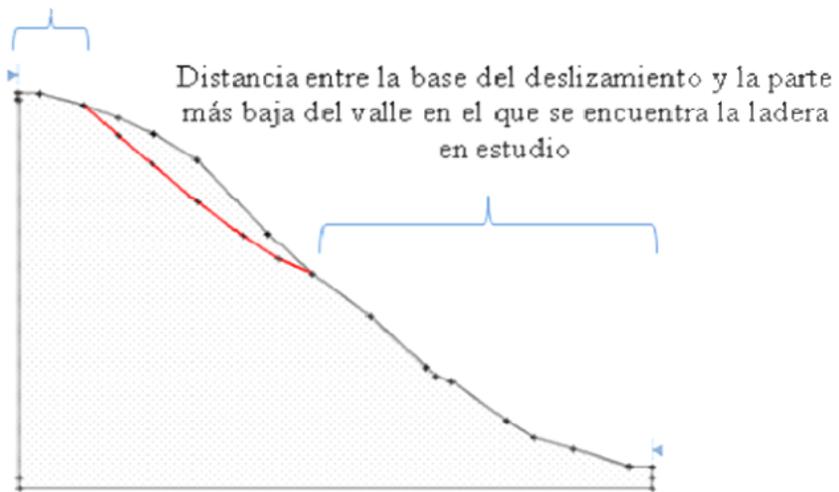


Figura 4.28: Esquema indicador de cómo se obtuvieron los valores utilizados en el método propuesto por Meunier y otros (2008). Las distancias se midieron a lo largo de la ladera. Modificado de Serey (2011a).

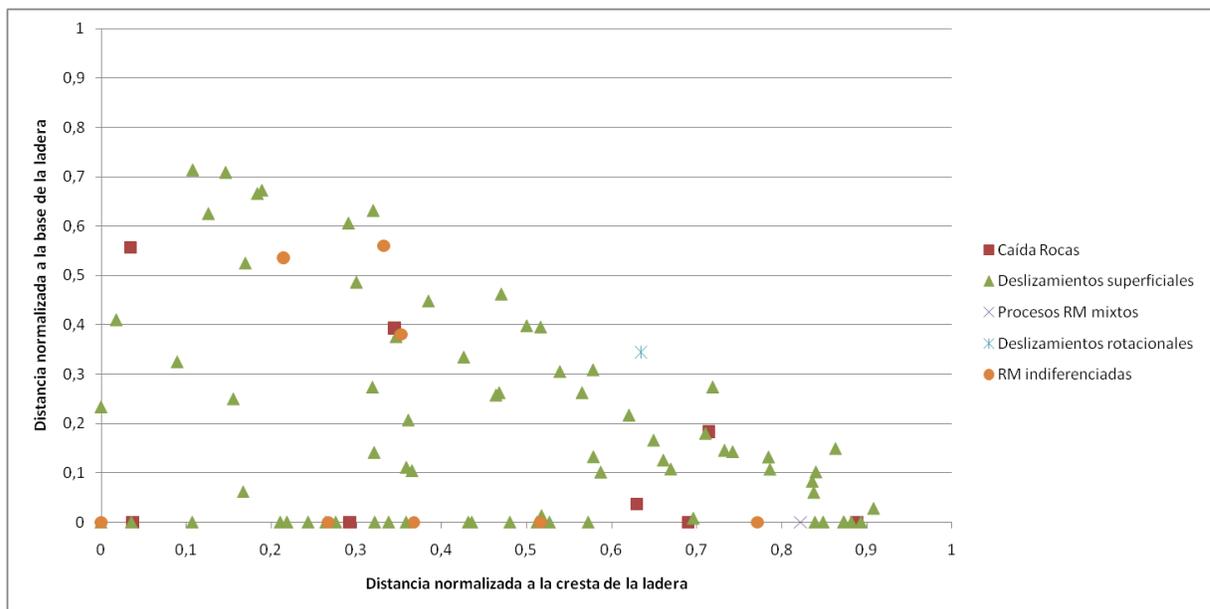


Figura 4.29: Posición relativa de las remociones en masa en las laderas. Distancia normalizada entre el escarpe de remoción y la cresta de la ladera versus distancia normalizada entre la base de la remoción y la base de la ladera en que se encuentra en estudio. Los puntos están diferenciados por tipo de RM.

Por otro lado se tiene que un 25 % de las remociones se generaron en el cuarto superior de la ladera y un 22 % en el cuarto inferior por lo que no existe un pronunciado conjunto de remociones que ocurra en la parte más alta de la ladera a diferencia de lo encontrado en los sismos en el Fiordo Aysén de 2007 (Serey, 2011a; Sepúlveda y otros, 2010) y Northridge California

en 1994 ([Meunier y otros, 2008](#)). La distribución observada, luego, no muestra una influencia de amplificación topográfica en la generación de las remociones en masa desencadenada por el sismo del Maule.

Capítulo 5

Discusiones, Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Discusiones

5.1.1. Distribución de las remociones

Al observar cómo se distribuyen geográficamente las remociones en masa, destaca la alta concentración de estos movimientos de laderas en la península de Arauco y la Cordillera de Nahuelbuta. Existen diferentes factores litológicos, climáticos, tectónicos, geomorfológicos que combinados podrían explicar el porqué la mayor cantidad de inestabilidades en esta zona.

La Península de Arauco esta compuesta prácticamente en su totalidad por rocas sedimentarias neógenas-paleógenas, poco consolidadas y arcillizadas, que probablemente tienen un bajo coeficiente de cohesión, por lo que las laderas con dicha litología son más propensas a fallar frente a sollicitaciones sísmicas. Además, la presencia de abundantes estructuras mayores (Pineda, 1986; Ferraris y Bonilla, 1980), pueden estar afectando la zona produciendo un mayor fracturamiento y diaclasamiento en este tipo roca, que facilita la caída de bloques de roca. La historia geológica de esta zona con varios procesos de alzamientos y subsidencias, ha producido secuencias emergidas de terrazas marinas y plataformas de abrasión que van desde los 75 hasta los 300 m. Dichas terrazas representan mayores altitudes sobre todo en el sector oriental de la península y en la parte noroeste en Punta Lavapie (Moreno, 2004). Los desniveles entre terrazas, generan laderas con mayores pendientes susceptibles a remociones en masa.

Con respecto a la Cordillera de Nahuelbuta, ella es un rasgo morfológico mayor en esta zona (ver en la Figura 2.4), alcanza alturas sobre los 1500 metros y es el tramo más ancho de la Cordillera de la Costa al sur de los 35°S, siendo su máximo entre Angol y Cañete, de 170 km (Moreno, 2004); las pendientes en esta zona son más pronunciadas (ver Figura 2.6), siendo en muchos lugares sobre los 30°. La litología presente, comprende en la parte occidental rocas metamórficas y al oriente rocas intrusivas. Es este sector, Cordillera de

Nahuelbuta, el que según [Ferraris y Bonilla \(1980\)](#) presenta un fallamiento y/o fracturamiento más intenso en el área, esencialmente afectando al Batolito Costero (constituido por granitos, tonalitas, granodioritas, y dioritas, con zonas de migmatitas y gneises). Se constató en este estudio, que en la zona de contacto entre el Batolito Costero y el Basamento Metamórfico ocurren una cantidad importante de remociones en masa (ver [Figura 5.2](#)), postulamos que debido a la inestabilidad propia al producirse una interfase entre dos medios de propiedades mecánicas distintas. Sobre el basamento metamórfico y donde se concentra el mayor relieve de la Cordillera de Nahuelbuta se observa también una mayor concentración de RM, alineadas norte-sur (ver [Figura 5.1](#) y [5.2](#)). Quizás exista una influencia climática en la zona, debida a las precipitaciones orográficas que producen un aumento significativo de las precipitaciones en las cumbres en comparación con las zonas de barlovento y sotavento ([Garreaud y otros, 2011](#)). La mayor precipitación en esa zona podría producir un aumento en las condiciones de saturación, favorecer la meteorización y erosión por lluvia, por nombrar algunas de sus consecuencias.

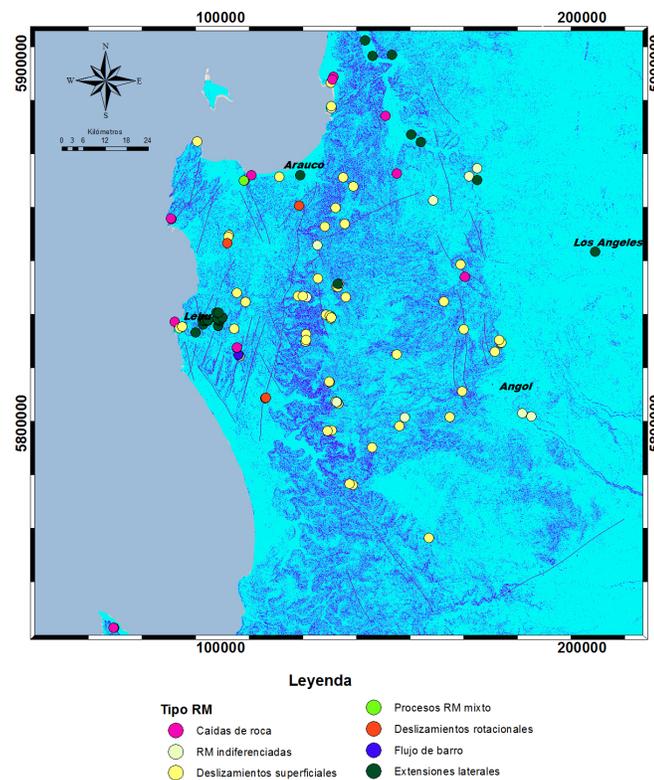


Figura 5.1: Mapa de pendientes del sector que presenta la mayor cantidad de remociones en masa inventariadas. Involucra Cordillera de Nahuelbuta y península de Arauco. Se incluyen fallas mapeadas por [SERNAGEOMIN \(2003\)](#)

Al revisar los eventos sísmológicos históricos más grandes en el territorio de Chile se verifica que este es un segmento de transición entre dos zonas sísmicas (ver [Figura 5.3](#)), lo que produciría una deformación cosísmica ponderada por ambos segmentos [Moreno \(2004\)](#). Lo mismo aplica en la otra zona que muestra una concentración importante de remociones en masa, entre los 34° y 35°. [Vargas y otros \(2011\)](#) y [Melnick y otros \(2012\)](#) midieron alzamientos y subsidencias relativamente mayores en estos dos lugares. Existe entonces una coincidencia geográfica entre los mayores movimientos cosísmicos y la distribución de las remociones en

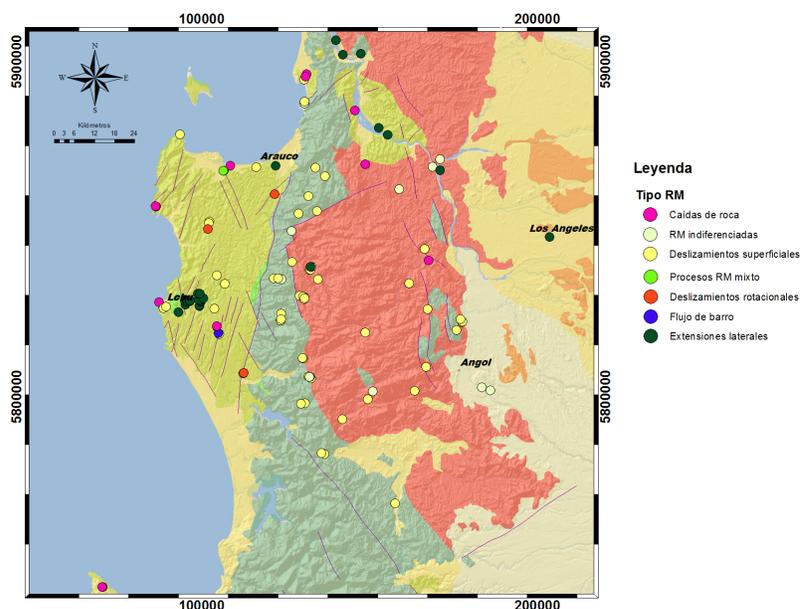


Figura 5.2: Mapa de litológico del sector que presenta la mayor cantidad de remociones en masa inventariadas. Involucra Cordillera de Nahuelbuta y península de Arauco.

masa, el porqué de esta relación no es directa y no fue posible dilucidarla en este trabajo

Los registros de los acelerógramos en Concepción y Angol dan cuenta de la mayor aceleración máxima y mayor duración del movimiento fuerte al sur de la ruptura del sismo del Maule (Saragoni y Ruiz, 2012), esto podría indicar que en este sector las aceleraciones máximas horizontales tuvieron una magnitud mayor que en otros sectores que comprenden el área afectada por remociones en masa desencadenadas por el sismo y que por tanto las laderas estuvieron sometidas a una mayor agitación sísmica. Otro factor importante es la mayor duración del movimiento fuerte, que según Keefer (1984) hace más probable la generación de extensiones laterales producto de la licuefacción de los suelos.

Para poder concluir qué factores son los más relevantes en la concentración en este lugar, es necesario ahondar en cada factor, realizar estudios en terreno de la calidad geotécnica de las rocas donde se produjeron estas remociones, su morfología en detalle, el tipo de suelo y microzonificación sísmica.

5.1.2. Amplificación topográfica.

En el presente estudio luego de realizar el procedimiento gráfico indicado por Meunier y otros (2008) (ver Figura 4.29), vemos que no existe un apilamiento en torno al eje Y, de ser así daría cuenta que la mayor cantidad de remociones tiene su corona en las inmediaciones de la cresta de la ladera. Ello nos indica que para el sismo del Maule la amplificación topográfica no es un factor importante en su generación. El por qué esto si ocurrió en el enjambre sísmico del Fiordo Aysén de 2007 (Serey, 2011a; Sepúlveda y otros, 2010) y el sismo de Northridge California en 1994 (Meunier y otros, 2008) podría ser explicado por las características topo-

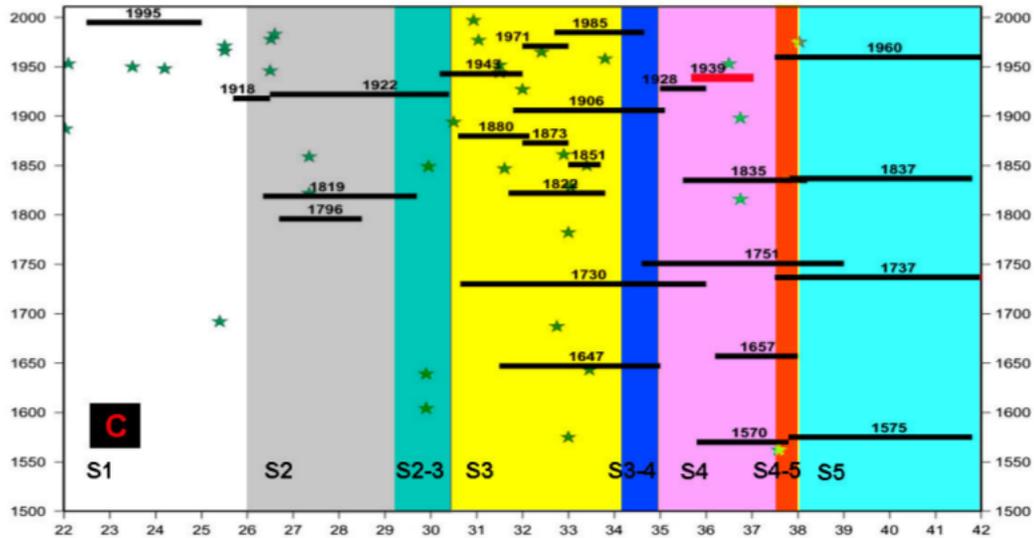


Figura 5.3: Gráfico de latitud versus años de los grandes terremotos históricos en Chile. Las barras negras corresponden a ruptura de los sismos. Modificado de Moreno (2004) Notar que los segmentos S3-S4 y S4-S5 coinciden aproximadamente con las zonas donde se produjeron las asperezas en el sismo M_w 8.8 del Maule

gráficas en cada ambiente, tanto el Fiordo Aysén como en Northridge California, tienen un elevado relieve con altas cumbres y estrechos cañones, en cambio la zona en la que se identificaron las remociones en masa mediante el uso de imágenes satelitales (zona occidental), corresponde a la Cordillera de la Costa y Planicie Costera cuyo relieve no es tan abrupto bajo los 600 m de altitud y presenta pendientes moderadas, no existiendo lugares donde existan profundos cañones ni laderas que alcancen largas extensiones.

5.1.3. Clasificación de las remociones en masa desencadenadas por el terremoto. Escala de trabajo y factores condicionantes.

Para la identificación de las RM en las imágenes satelitales uno de los rasgos más relevantes es la ausencia de vegetación, pues se trata de un evento reciente. La imagen post sismo del Maule más alejada temporalmente del evento data del 24/01/2012, es decir, menos de dos años. Por lo que en las imágenes, la vegetación sobre el área deslizada no ha alcanzado a restablecerse.

En este trabajo las RM se identificaron mediante foto interpretación y resulta difícil distinguir entre deslizamientos superficiales de suelo, deslizamientos superficiales de roca y deslizamientos someros que involucran tanto suelo como roca, porque parte del sustrato rocoso donde ocurren se encuentra meteorizado (e.g. Toro, 2007; Duhart y otros, 2010b) o corresponde a depósitos sedimentarios poco consolidados, arcillizados y sin litificación (e.g. Contreras y otros, 2010). Por lo que un examen en terreno sería necesario para poder realizar una buena distinción.

En varias ocasiones en los eventos recopilados no se contaba con el dato sobre el tipo de re-

moción, y no fue posible reconocerla en imágenes para obtener esa información. Las imágenes algunas veces no tenían la resolución suficiente para poder distinguir bien las características del movimiento de ladera, por lo que en esos casos se dejaron como indiferenciadas o con un grado de certeza de 3 y en la clasificación la que pareciera más probable.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que los mapas geológicos usados para cubrir la zona occidental tenían una escala 1:250.000 y que los deslizamientos, caídas de roca y flujos, fueron identificados a una escala aproximada de 1:10.000 por lo que para un exhaustivo análisis de la estabilidad de las laderas, un mapeo de detalle es requerido. Dada el área involucrada en este trabajo de aproximadamente 53000 km² la incorporación de mapas geológicos a la escala en que se identificaron las remociones (1:2000 a 1:10000) se encontraba fuera de los alcances de este. Un ejemplo de esta situación es el examen del punto 9 (sitio 30 del Anexo A) de la visita a terreno, que se realizó el 9 de Julio del 2013 a la Comuna de Navidad, donde según el mapa geológico [Escobar y otros \(1977\)](#) usado corresponde a secuencias sedimentarias marinas transgresivas del paleógeno-neógeno (MP 1m), mas en terreno la roca de la ladera que falló corresponde a una roca granítica meteorizada (ver Figura 4.6 b)). Al revisar la geología en un mapa de detalle de la zona en [Encinas y otros \(2006\)](#) vemos que el deslizamiento de Puertecillo se encuentra sobre basamento ígneo y metamórfico indiferenciado (ver Figura 5.4). Esto no significa que la mayoría de los puntos tengan una mala clasificación litológica, pues lo más probable es que así no sea, sino advertir que dada la pequeña escala a la que ocurrieron los sismos puede haber cambios locales imposibles de ser evidenciados a la escala abordable por este trabajo.

El mismo argumento anterior de escala es aplicable a las pendientes y orientaciones, las cuales tienen como base DEM de 30 m, lo que es insuficiente para una caracterización profunda de cada remoción. Sin embargo como una aproximación a los factores condicionantes en toda el área de estudio si se cumple el objetivo.

Un factor que no ha sido analizado en este estudio y que tiene relevancia dado que el tipo mayoritario de remoción en masa son deslizamientos superficiales, es el tipo de suelo y vegetación sobre el que ocurren. En el trabajo de [LEU \(2013\)](#) realizaron una revisión de factores condicionantes para las comunas costeras de la región del Biobío e incluyeron estos factores en su modelo de susceptibilidad, sin embargo en su modelo no diferenciaron entre cada tipo de remoción en masa.

Las condiciones hidrogeológicas no pudieron ser consideradas en este estudio dado su carácter local que implica realizar una visita a terreno para recabar dicha información y no estaba dentro de los objetivos. Se plantea que una de las razones en el bajo número de remociones desencadenadas por el sismo del Maule tenga relación con el periodo del año donde ocurrió, fines de Febrero, que esta dentro del periodo seco en la zona central de Chile por lo que los suelos se encontrarían no saturados a parcialmente saturados siendo menor entonces su susceptibilidad a fallar.

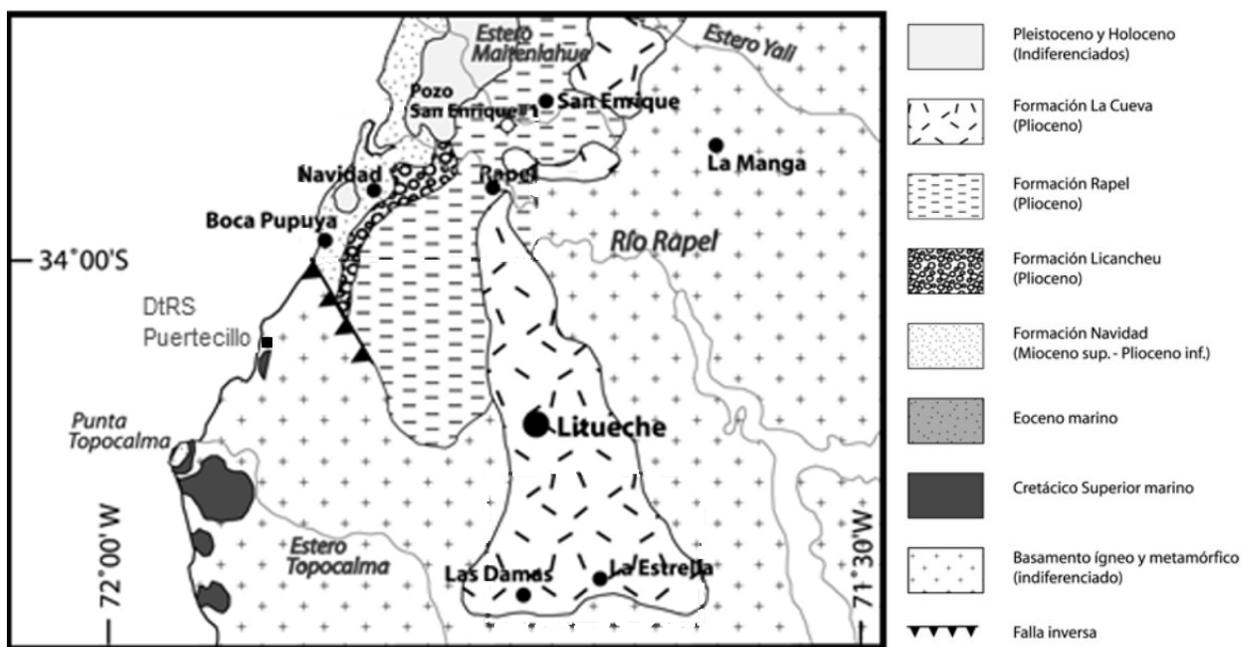


Figura 5.4: Detalle del mapa geológico de Encinas y otros (2006) en la zona de Navidad. En cuadrado negro se indica ubicación del sitio 30 en Anexo A, deslizamiento de suelo y roca en Puertecillo, comuna de Navidad, región de O'Higgins.

5.1.4. Imágenes satelitales.

Como se mencionó en la sección 4.2, para realizar la identificación mediante imágenes satelitales se utilizaron las imágenes más cercanas temporalmente al evento sísmico principal que tuvieran la resolución suficiente para poder extraer información de ellas. Dentro de las dinámicas de las laderas existe la posibilidad de la ocurrencia de remociones en masa por algún efecto gatillador de ella como en ausencia de uno (Keefer, 2002) si la ladera se encuentra altamente inestable. Para tener una mayor certeza que efectivamente el fenómeno de remoción en masa se deba al evento sísmico del 27 de Febrero del 2010, podemos estudiar que otros desencadenantes fueron importantes durante el periodo entre el sismo del Maule y la captura de la imagen analizada.

En la zona de estudio entre el 27 de Febrero del 2010 y el 24 de Enero de 2012, se registraron algunos eventos de intensas precipitaciones, como durante el 13 al 16 de Julio de 2011¹, en la Octava Región, donde según lo publicado en el Diario La Tercera (reproducido en la página de la Fundación Terram²). se produjeron flujos de barro en la aldea El Esfuerzo, Dichato, en la ruta de acceso a la ciudad de Laja y en una de las poblaciones de esta última se produjo un enorme socavón en el sector cuando se deslizó parte de la ladera.

Sin embargo, luego de revisar los Informes Climatológicos - Precipitaciones diarias, disponibles en la página de la Dirección Meteorológica de Chile, para la Estación Carriel Sur, Concepción, verificamos que en más de una ocasión se superaron los 50 mm en 72 horas. En

¹<http://164.77.222.61/climatologia/>

²http://www.terram.cl/index.php?option=com_content&task=view&id=8034

Valparaíso esa intensidad es suficiente para generar movimientos de ladera (Erikson y Högstedt, 2004), pero en Concepción en los meses de Mayo a Agosto las precipitaciones alcanzan los 218.4, 259.4, 234.4 y 152,5 mm como promedio mensual en los meses de Mayo, Junio, Julio y Agosto respectivamente (Asesoría-Urbana, 2011) por lo que la cantidad de agua caída no significa un evento importante en esa región. Por otro lado, en el Informe de Monitoreo Diciembre del 2012, se muestra en el Índice de Precipitaciones Estandarizado (IDE)³ a 24 meses (entre diciembre de 2011 y diciembre del 2012) que entre las regiones de Coquimbo y la Araucanía se presenta sequía. Con estos antecedentes consideramos que las remociones en masa desencadenadas por precipitaciones intensas no son muy significativos y que estarían restringidos a flujos de barro, y que la mayoría de los eventos inventariados están asociados al sismo del Maule y sus réplicas.

Otros puntos a discutir y mencionar es sobre el uso de imágenes obtenidas a través de Google Earth. La resolución de las imágenes varía de lugar en lugar y de fecha en fecha, sin poder disponer de la información de la resolución que tiene cada imagen. Existen unas pocas zonas en las que no fue posible realizar la identificación de remociones en masa por no disponer de imágenes con poca cobertura de nubes que permitiera la visualización del terreno, y otras donde no existía una imagen post sismo.

5.1.5. Área y número de remociones

Como antecedentes previos de remociones gatilladas por sismos de subducción, tenemos los sismos de Valparaíso 1906 ($M_s=8.4$), Illapel 1943 ($M_s=7.9$), y el evento de San Antonio-Valparaíso 1985 ($M_s=7.8$), los cuales no han generado deslizamientos de roca de grandes dimensiones sino sólo pequeñas caídas de roca y flujos de detritos Antinao y Gosse (2009); Erikson y Högstedt (2004) que fueron reportados.

El área afectada por las remociones en masa desencadenadas por el sismo del Maule es aproximadamente 120000 km², al compararla con las curvas límite propuestas por Keefer (1984) y Rodríguez y otros (1999) (ver Figura 4.19) tenemos se encuentra dentro de los valores esperados para RM desencadenadas por un sismo de magnitud Mw 8.8. También están dentro de los rangos de los datos recopilados a nivel global, las distancias a la ruptura de las categorías extensiones laterales y deslizamientos disgregados, aunque para las extensiones laterales se esperaba que fuese mayor. En las RM inventariadas en este trabajo se cumple que los flujos y extensiones laterales ocurren más cercanas a la fuente de liberación de energía.

Respecto a la cantidad de remociones en masa que desencadenó el sismo del Maule, es menor a las generadas en el Fiordo Aysén por el enjambre sísmico de Abril del 2007 Serey (2011a) donde se identificaron 538 remociones en masa, mientras que en el presente estudio 269 siendo el área afectada mucho mayor. Sin embargo el mecanismo focal de los eventos que se estudiaron en Sepúlveda y otros (2010) corresponde a los generados por sismos corticales, lo que puede explicar esta significativa diferencia en la cantidad de RM por unidad de área afectada.

³http://www.meteochile.gob.cl/nino_nina/monitoreo201212.html

Ya en el artículo de [Antinao y Gosse \(2009\)](#) se mencionó la escasez de RM (tipo deslizamiento de roca, pero es extrapolable al resto de deslizamientos) en sismos superficiales históricos que son contrarios a las predicciones de modelos empíricos (e.g [Keefer, 1994](#)). Sin embargo, en el trabajo de [Malamud \(2004\)](#) se seleccionaron inventarios con una gran cantidad de remociones en masa: 11111 para el de Nothridge, California; 4233 para el de Umbria, Italia; 9594 para el de Guatemala, cabe preguntarse si todos los inventarios temáticos (debido a un gatillante específico), tienen tal abundancia de remociones generadas y si estos 3 terremotos son representativos en diferentes condiciones morfoestructurales como en el caso de nuestro estudio que corresponde a un área con un relieve moderado, sólo en algunas zonas pronunciado.

5.1.6. Completitud del inventario.

Según [Malamud \(2004\)](#) una definición funcional de completitud es que el inventario de RM incluya una fracción sustancial de todas las RM en todas las escalas. Dice el autor que un inventario completo debe incluir una parte sustancial de las RM más pequeñas. En el presente estudio los movimientos de ladera más pequeños registrados son de 30 m^2 ($3 \cdot 10^{-5} \text{ km}^2$), tamaño comparable a los inventariados por Harp and Jibson, 1995; Cardinali et al., 2000; Bucknam et al., 2001 en [Malamud \(2004\)](#) con escalas de longitud mayores que 5 m ($A_L \approx 25 \text{ m}^2$), 15 m ($A_L \approx 225 \text{ m}^2$), y 15 m ($A_L \approx 225 \text{ m}^2$), respectivamente. Por lo que en la parte de remociones pequeñas nuestro inventario cumple con el requisito.

En el presente inventario las RM de mayores dimensiones corresponderían a las extensiones laterales, que llegan en algunos sectores a más de 20000 m^2 (ver punto 246 del Anexo A, en el sector de Licantén, Río Mataquito). Durante la realización de un inventario es fácil subestimar las RM de menores dimensiones debido a que por su tamaño son más difícil de detectar si no se ocupan imágenes o fotografías de muy buena resolución en el caso de la identificación remota, pero también las pequeñas remociones están sujetas a procesos erosivos, antrópicos, vegetación, que hacen que conserven menos tiempo. Por otro lado las RM más grandes se conservan mejor y su identificación es más sencilla por lo que difícilmente, de existir, no serán incorporadas a algún registro.

Se intentó recabar la mayor cantidad de información bibliográfica disponible y el examen de la Cordillera de la Costa mediante las imágenes satelitales fue exhaustivo, pero indudablemente deben existir eventos que no han podido ser recogidos en el catastro, especialmente las caídas de roca que involucran bloques que no pueden ser apreciados mediante imágenes satelitales y se ubican en zonas despobladas, donde no existen testigos. El catastro en la Cordillera Principal esta incompleto, pues sólo cuenta con eventos recopilados y no por inspección de la zona.

Respecto a la Cordillera Principal, del trabajo de [Antinao y Gosse \(2009\)](#) se desprende que si bien los grandes sismos de subducción pueden jugar un rol importante en el gatillamiento de grandes deslizamientos de roca ($>10^8$), en su inventario no se logra establecer una clara relación entre los deslizamientos de roca catastrados por él y los terremotos de subducción, sino más bien se deberían a sismos someros intraplaca asociados a sistemas de fallas tales como la Zona de Falla Pucuro. Lo señalado por [Antinao y Gosse \(2009\)](#) podría indicarnos que

en la zona cordillerana las remociones en masa ocasionadas por el sismo del 27 de Febrero del 2010 no serían significativas arealmente dentro del inventario al disminuir significativamente la energía sísmica al atravesar las ondas los cientos de kilómetros que separan el área de ruptura de la Cordillera Principal. De existir remociones en masa probablemente sean del mismo tamaño o menor que las inventariadas en la Cordillera de la Costa.

5.2. Conclusiones y Recomendaciones.

- El sismo del Maule generó 290 remociones en masa en un área aproximada de 120000 km². Existen dos categorías según la clasificación de [Keefer \(1984\)](#) que son las más representativas de las generadas por este sismo. La primera son las extensiones laterales, que en general se dieron en riberas de ríos o lagos, mayoritariamente sobre rocas paleógenas-neógenas y depósitos no consolidados, en pendientes suaves en el rango entre 0 y 15°. La segunda corresponde a deslizamientos superficiales que involucran la cubierta de suelo y la parte más meteorizada de la roca subyacente, donde no existe un control claro de superficie de cizalle. Fueron clasificados como: caídas de roca (55), deslizamientos superficiales (118), procesos de remoción en masa mixta (4), deslizamientos rotacionales (8), flujo de barro (1) y extensiones laterales (51). No fue posible clasificar 53 eventos.
- Las remociones en masa desencadenadas por el terremoto del año 2010 tienen una distribución geográfica que se concentra en los extremos del área de ruptura, aproximadamente donde se dieron los mayores movimientos cosísmicos. En el extremo sur, en el sector de la península de Arauco y Cordillera de Nahuelbuta es donde se observa la mayor cantidad de remociones en masa, que alcanzan a un tercio de todas las remociones registradas en el presente inventario.
- Las inestabilidades se concentran en el relieve de la Cordillera de la Costa y acantilados costeros, en un rango de distancia al área de ruptura que varía entre 21 a 85 km en la zona occidental, existiendo registros en la Cordillera Principal a 113 km del área de ruptura, con una media de 40 km considerando el área completa.
- La distribución geográfica es acorde a lo esperado para las RM desencadenadas por un sismo Mw 8.8, con las extensiones laterales más cercanas al área de ruptura que los deslizamientos disgregados. Sin embargo el número de remociones generadas está por debajo de los rangos mundiales, no así de registros nacionales de sismos históricos de subducción como los ocurridos en Valparaíso (1906 y 1985) e Illapel (1943).
- La correlación con las intensidades sísmicas muestra que a mayor intensidad mayor es la densidad areal de remociones, sin embargo la alta concentración en la península de Arauco y Cordillera de Nahuelbuta se ubica entre las isosistas VII y VI.
- La distribución de las remociones respecto a su posición en la ladera indica que la amplificación topográfica no es un factor de primer orden en la generación de los des-

lizamientos ni caídas de roca.

- Las rocas sedimentarias paleógenas-neógenas, metamórficas e intrusivas, en ese orden, son las más susceptibles a fenómenos de remoción en masa, registrando el mayor número de inestabilidades por unidad de área.
- Las pendientes de las laderas donde se registraron deslizamientos superficiales, en general no son muy pronunciadas, entre los 16° y 30° se registran la mayor cantidad de ellas. Mientras en las caídas de roca el mayor porcentaje de ellas se encuentra a pendientes mayores de 60°. Y las extensiones laterales están acotadas a pendientes suaves que no sobrepasan los 15°. Estos rangos se recomienda tener en consideración a la hora de dar peso a los diferentes factores en los análisis de susceptibilidad.
- Las dimensiones de las remociones en masa registradas, normalmente, son menores y por tanto locales. Por eso la escala a la que se debe trabajar para realizar una buena caracterización de ellas es del orden de 1:2.000, escala que era imposible de trabajar en este estudio, considerando que su objetivo es analizar la distribución en un área que tiene una longitud de más de 500 km. Recomendamos realizar una investigación en el área del Bloque de Arauco que permita indagar más profundamente en los factores condiciones de las remociones en masa en esa zona. Es necesario realizar visitas a terreno, para evaluar las condiciones bajo las que fallaron las laderas, tomar muestras para ensayos geotécnicos que acoten los rangos de resistencia de la matriz de roca sana, coeficientes de cohesión y ángulo de fricción. Influencia de las estructuras locales en la generación de las remociones.
- Se recomienda considerar para el análisis de los deslizamientos superficiales a futuro el tipo de suelo y vegetación sobre el que ocurren para detectar la influencia de estos factores en la generación de los mismos. Además sería interesante reconocer las condiciones hidrogeológicas en que fallaron las laderas, este podría ser un factor importante respecto a la poca cantidad de remociones desencadenadas por el terremoto del Maule.
- La creación de inventarios de RM contribuye a la base de datos mundial y a estimar qué factores son más relevantes dependiendo del contexto geológico en el que ocurran los sismos, para así estructurar una normativa que busque prevenir que estos fenómenos tengan impactos sobre infraestructuras y afecten a la población. Cobra entonces importancia el crear un sistema centralizado en Chile que permita entregar información sobre remociones que se desencadenen por diferentes factores gatillantes, para construir una base de datos nacional como las existentes en Estados Unidos, Gran Bretaña y Turquía por nombrar algunas.
- El estudio de los factores que condicionan las remociones en masa generadas por sismo del Maule, de subducción de gran magnitud y área de ruptura, a pesar de las diferencias climáticas, geológicas, geomorfológicas y estructurales puede contribuir a predecir inestabilidades de ladera frente a otros sismos futuros de subducción de gran magnitud y área de ruptura en otras zonas del país.

Bibliografía

- Alcántara, I. y Murillo, F., 2008. Procesos de remoción en masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, Vol. 66, pp. 47-64.
- Alfaro, A., 2011. Peligro sísmico en el segmento norte de la región del Maule, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Antinao, J. y Gosse, J., 2009. Large rockslides in the Southern Central Andes of Chile (32-34.5 S): Tectonic control and significance for Quaternary landscape evolution. *Geo-morphology*, Vol. 104, No. 3, pp. 117-133.
- Aravena, D., 2012. Desarrollo de metodología para estimación de potencial geotérmico explotable en la región del Maule, Zona Volcánica Sur, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Arenas, M., Fernández, J., Marín, M., Sepúlveda, S., y otros, 2010. Efectos geológicos del sismo del 27 de febrero de 2010: Estado de deslizamiento activo cerro divisadero San José de Maipo, región Metropolitana [INF-RM-01]. SERNAGEOMIN, Santiago, 2 h.
- Arenas, M., Fernández, J., Mourgues, F., y otros, 2010b. Efectos geológicos del sismo del 27 de febrero de 2010: Ciudad de Constitución, región del Maule [INF-Maule-07], SERNAGEOMIN, Santiago.
- Arriagada, C., Arancibia, G., Cembrano, J., y Martínez, F., 2011. Nature and tectonic significance of co-seismic structures associated with the Mw 8.8 Maule earthquake, central-southern Chile forearc. *Journal of Structural Geology*, Vol. 33, pp. 891-897.
- Asesoría Urbana, 2011. Anexo: Estudio de Riesgos Naturales y Antrópicos. Plan de Desarrollo Comunal, San Pedro de la Paz, Región del Biobío.
- Ashford, S.A., Sitar, N., Lysmer, J., y Deng, N., 1997. Topographic effects on the seismic response of steep slopes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 87, No. 3, pp. 701-709.
- Astroza, M., Cabezas, F., Moroni, M., Massone, L., Ruiz, S., y Parra, E., 2010. Intensidades sísmicas en el área de daños del terremoto del 27 de Febrero de 2010. Departamento de Ingeniería Civil, FCFM, Universidad de Chile.

- Astroza, M., Ruiz S., Astroza, R., 2012. Damage Assessment and Seismic Intensity Analysis of the 2010 (Mw 8.8) Maule Earthquake. *Earthquake Spectra*, Vol. 28, No. S1, pp. S145-S164.
- Barrientos, S., 2010. Informe Técnico Actualizado 27 de Mayo 2010. Terremoto Cauquenes 27 Febrero 2010, Servicio Sismológico, FCFM, Universidad de Chile.
- Barrientos, S., 2012. Terremoto (Mw=8.8) y maremoto del 27 de febrero de 2010 en Chile Central. *En* Mw=8.8: Terremoto en Chile, 27 de febrero 2010. Primera edn., Departamento Ingeniería Civil, FCFM, Universidad de Chile.
- Becerra, J., Contreras-Reyes, E., y Arriagada, C., 2013. Seismic structure and tectonics of the southern Arauco Basin, south-central Chile (38° S). *Tectonophysics*, Vol. 592, pp. 53-66.
- Blanco, N. y Creixell, C., 2010a. Efectos geológicos del sismo del 27 de Febrero de 2010: Observaciones de daños y evaluación de riesgos geológicos en la comuna de Coronel, región del Biobío [INF-Biobío-26]. SERNAGEOMIN, Santiago, 9 h.
- Blanco, N. y Creixell, C., 2010b. Efectos geológicos del sismo del 27 de Febrero de 2010: Observaciones de daños y evaluación de riesgos geológicos en la comuna de Talcahuano y Hualpén, región de Biobío [INF-Biobío-16]. SERNAGEOMIN, Santiago, 7 h.
- Blanco, N., Creixell, C., y Arancibia, J.P., 2010a. Efectos geológicos del sismo del 27 de Febrero de 2010: Observaciones de daños y evaluación de riesgos geológicos en la comuna de Talcahuano [INF-Biobío-10]. SERNAGEOMIN, Santiago, 6 h.
- Blanco, N., Creixell, C., y Arancibia, J.P., 2010b. Efectos geológicos del sismo del 27 de Febrero de 2010: Observaciones de daños y evaluación de riesgos geológicos en la comuna de Talcahuano, región de Biobío [INF-Biobío-15]. SERNAGEOMIN, Santiago, 9 h.
- Brantt, C., 2010, Microzonificación sísmica del sector poniente de Santiago, comunas Buin y Paine. Memoria para optar al Título de Geóloga, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Campos, J., Hatzfeld, D., Madariaga, R., López, G., Kausel, E., Zollo, A., Iannacone, G., Fromm, R., Barrientos, S., y Lyon-Caen, H., 2002. A seismological study of the 1835 seismic gap in south-central Chile. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 132, No. 1, pp. 177-195.
- Carreño, C., 2012. Ambiente deposicional de la Formación Bahía Inglesa (Neógeno) en la cuenca de Caldera, III región, Chile. Memoria para optar al Título de Geóloga, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Cascante, R., 2010. Evaluación de tres Modelos de Elevación Digital (MED) en el área de la Línea de Transmisión Arenal-Barranca. Memoria para optar al Título de Licenciado, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal.
- Cisternas, A., 2011. El país más sísmico del mundo: Revista Anales, Séptima Serie, No. 1.
- Contreras, J.P., Naranjo, J., y Ortiz, M., 2010. Efectos geológicos del sismo del 27 de febrero

- de 2010: Observaciones de remociones en masa y depósitos de tsunamis en la comuna de Navidad, VI región de O'Higgins [INF-O'Higgins-01]. SERNAGEOMIN, Santiago, 3 h.
- Contreras, V., 2009. Curvas de atenuación espectrales para sismos chilenos. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Correa, C., 2007. Análisis de la susceptibilidad de los fenómenos de remoción en masa de la carretera Loja-Zamora. Proyecto de Titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Geólogo, Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Corvalan, J. y Davila, A., 1964. Mapa Geológico de la Hoja Valparaíso-San Antonio. Escala 1:250.000. Inst. Invest. Geológicas.
- Delgado, J., Garrido, J., López-Casado, C., Martino, S., y Peláez, J.A., 2011. On far field occurrence of seismically induced landslides: Engineering Geology, Vol. 123, pp. 204-213.
- DIPECHO, 2012. Análisis de riesgos de desastres en Chile. VII Plan de acción DIPECHO en Sudamérica: DIPECHO.
- Duhart, P., Moreno, H., Páez, D., y Ramos, A., 2010a. Efectos geológicos del sismo del 27 de Febrero de 2010: Observaciones de daños en la ciudad de Lebu, costa y Río Lebu, provincia de Arauco, región de Biobío [INF-Biobío-12]. SERNAGEOMIN, Puerto Varas, 12 h.
- Duhart, P., Moreno, H., y Ramos, A., 2010b. Efectos geológicos del sismo del 27 de Febrero de 2010: Lumaco y Capitán Pastene, provincia de Malleco, región de la Araucanía [INF-Araucanía-10]. SERNAGEOMIN, Puerto Varas.
- Duman, T.Y., Çan, T., Emre, Ö., y otros, 2005. Landslide inventory of northwestern Anatolia, Turkey: Engineering Geology, Vol. 77, No. 1, pp. 99-114.
- Encinas, A., Le Roux, J., Buatois, L., Nielsen, S., y otros, 2006. Nuevo esquema estratigráfico para los depósitos marinos mio-pliocenos del área de Navidad (33°00' - 34°30'S), Chile Central. Revista geológica de Chile, Vol. 33, No. 2, pp. 221-246.
- Erikson, I. y Högstedt, 2004. Landslide hazard assessment and landslide precipitation relationship in Valparaiso, Central Chile. Göteborgs Universitet, Institutionen för geoteknik.
- Escobar, F., Guzmán, R., Vieira, G. 1977. Avance Geológico de las hojas Rancagua-Curicó, Talca-Linares, Chanco, Concepción-Chillán. Santiago: USGS, CCHEN, IIG. 56p.
- Espinoza, F., Sepúlveda, F., y Derch, P., 2010. Efectos geológicos del sismo del 27 de Febrero de 2010: Observaciones en el Río Lebu, vertiente occidental de la Cordillera de Nahuelbuta e Isla Mocha, provincia de Arauco, región del Biobío [INF-Biobío-20]. SERNAGEOMIN, Santiago, 9 h.
- Falcón, F., Arancibia, J.P., y Vázquez, P., 2010a. Efectos geológicos del sismo del 27 de Febrero de 2010: Observaciones de daños en la comuna de Chiguayante, región de Biobío [INF-Biobío-14]. SERNAGEOMIN, Santiago, 11 h.

- Falcón, F., Ramírez, P., y Marín, M., 2010b. Efectos geológicos del sismo del 27 de Febrero de 2010: Observaciones de daños en la comuna de San Fabián de Alico, Provincia de Ñuble [INF-Biobío-28]. SERNAGEOMIN, Santiago, 8 h.
- Falcón, F. y Vázquez, P., 2010a. Efectos geológicos del sismo del 27 de Febrero de 2010, [INF-Biobío-05]. SERNAGEOMIN, Santiago, 9 h.
- Falcón, F. y Vázquez, P., 2010b. Efectos geológicos del sismo del 27 de Febrero de 2010: Observaciones de daños en la comuna de Arauco [INF-Biobío-03]. SERNAGEOMIN, Santiago, 8 h.
- 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*, Vol. 30, No. 6, pp. TC6010.
- Farías, M., 2007. Tectónica y erosión en la evolución del relieve de los Andes de Chile Central durante el Neógeno, Tesis para optar al Grado de Doctor en ciencias c/m Geología, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Fernández, J. y Venegas, C., 2010. Efectos geológicos del sismo del 27 de febrero de 2010: Localidad de Iloca y Caleta Duao, región de Maule [INF-Maule-10]. SERNAGEOMIN, Santiago, 6 h.
- Ferraris, F y Bonilla, R. 1980. Hoja Arauco-Lebu y sector norte de la Hoja Puerto Saavedra. Escala 1:250.000. Carta Geológica de Chile N°6 (Preliminar). Inst. Invest. Geológicas.
- Fock, A., 2005. Cronología y tectónica de la exhumación en el neógeno de Los Andes de Chile Central entre los 33° y los 34°S. Tesis para optar al Grado de Doctor en Cs. c/m Geología, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Fritz, H., Petroff, C., P., C., Cienfuegos, R., Winckler, P., y Kalligeris, N., 2011. Field Survey of the February 2010 Chile Tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, No. 168, pp. 1989-2010.
- Gajardo, A., 1980. Hoja Concepción-Chillán. Escala 1:250.000. Carta Geológica de Chile N°4, Preliminar, Inst. Invest. Geológicas.
- Gajardo, A., Carrasco, R., Espinoza, F., y otros, 2010. Efectos geológicos del sismo del 27 de Febrero de 2010: Observaciones en el sector Reñaca-Cochoa, comuna de Viña del Mar, región de Valparaíso [INF-Valparaíso-03]. SERNAGEOMIN, Santiago, 8 h.
- Garreaud, R., Montecinos, A., Falvey, M., 2011. Modificación de la precipitación frontal por efectos de la cordillera de Nahuelbuta: Resultados preliminares del proyecto AFEX. Segundo Congreso de Oceanografía Física, Meteorología y Clima del Pacífico Sudoriental. 5-7 Octubre 2011, La Serena, Chile.
- GEMMA, 2007. Movimientos en masa en la región andina: una guía para la evaluación de amenazas.
- González, P., 2010. Geología y Geomorfología del Complejo de Remoción en Masa La Engor-

- da, Chile Central. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- González, V., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C., 2004, Ingeniería Geológica. Primera edn., Madrid, España, Pearson Educación.
- Hauser, A., 2000. Remociones en masa en Chile. SERNAGEOMIN, boletín No 59, Versión 81 Actualizada, 89p, Santiago.
- Highland, L. y Bobrowsky, P., 2008, The Landslide Handbook: A guide to understanding landslides: US Geological Survey Reston, VA, USA.
- Instituto Nacional de Normalización (INN), 2010. NCh433: Norma Técnica de Emergencia para el Diseño Sísmico de Edificios, Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Chile.
- Jara, C., 2010, Presentación: Cambios geomorfológicos y fallas en nuestro territorio producidos tras el reciente terremoto. SERNAGEOMIN.
- JST-JICA-SATREPS, 2010. 2010 Chile Earthquake and Tsunami. Team Peru project Chile Earthquake Field Investigation.
- Keefer, D.K., 1984. Landslide caused by earthquakes. Geological Society of America Bulletin, Vol. 95, pp. 406-421.
- Keefer, D.K., 2002. Investigating landslide caused by earthquakes - a historical review: Surveys in Geophysics, Vol. 23, pp. 473-510.
- Keefer, D.K., 1994. The importance of earthquake-induced landslides to long-term slope erosion and slope-failure hazards in seismically active regions. Geomorphology, Vol. 10, No. 1, pp. 265-284.
- Laboratorio de estudios Urbanos. Universidad del Biobío. Estudio de Riesgos de Sismos y Maremotos para las comunas costeras de la región del Biobío.
- Lara, M., 2007. Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicación en Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana. Tesis para optar al Grado de Magister en Ciencias con mención Geología, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Liu, J., P.J., M., Yu, E., Wu, M., Chuan, T., Ruanqiu, H., y Hanhu, L., 2013. Earthquake Damage Zone GIS Modelling: A Modulation Between Co-Seismic Deformation and Landslide Suceptibility. *En* Landslide Science and Practice, Vol. 5: Complex Environment, Primera edn., Springer.
- Lorito, S., Romano, F., Atzori, S., Tong, X., Avallone, A., McCloskey, J., Cocco, M., Boschi, E., y Piatanesi, A., 2011. Limited overlap between the seismic gap and coseismic slip of the great 2010 Chile earthquake. Nature Geoscience, Vol. 4, No. 3, pp. 173-177.
- Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Guzzetti, F., y Reichenbach, P., 2004. Landslide inventories

- and their statistical properties: *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 29, No. 6, pp. 687-711.
- Mardones, M., y Rojas, J., 2012. Procesos de remoción en masa inducidos por el terremoto del 27F de 2010 en la franja costera de la Región del Biobío, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, No. 53, pp. 57-74.
- Marín, M. y Derch, P., 2010. Efectos geológicos del sismo del 27 de Febrero de 2010: Observaciones de daños y evaluación de riesgos geológicos en la comuna de Lota región del Biobío [INF-Biobío-27]. SERNAGEOMIN, Santiago, 5 h.
- Martinez-Pardo, R., 1990. Major Neogene events of Southeastern Pacific: The Chilean and Peruvian record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Vol: 77, pp. 263-278.
- Melnick, D., 2007. Neogene seismotectonics of the south-central Chile margin. Subduction-related processes over various temporal and spatial scales.
- Melnick, D., Bookhagen, B., Strecker, M y Echtler, H., 2009. Segmentation of megathrust rupture zones from fore-arc deformation patterns over hundreds to millions of year, Arauco peninsula, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012)*, Vol. 114, No. B1.
- Melnick, D., Cisternas, M., Moreno, M. y Norambuena, R., 2012. Estimating coseismic coastal uplift with an intertidal mussel: calibration for the 2010 Maule Chile earthquake (Mw=8.8). *Quaternary Science Reviews*, Vol. 42, pp. 29-42.
- Meunier, P., Hovius, N., y Haines, J.A., 2008. Topographic site effects and the location of earthquake induced landslides. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 275, No. 3, pp. 221-232.
- Moreno, M., 2004. Dinámica del Antearco Externo en la zona del Bloque de Arauco, 37°-38°S, Octava Región, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Concepción.
- Moreno, M., Klotz, J., Melnick, D., Echtler, H., y Bataille, K., 2008. Active faulting and heterogeneous deformation across a megathrust segment boundary from GPS data, south central Chile (36-39 S). *Geochemistry Geophysics Geosystems*, Vol. 9, No. 12, pp. Q12024.
- Moroni, M.O., y otros, 2012, Mw=8.8: Terremoto en Chile, 27 de febrero 2010. Primera edn., Santiago, Chile.
- Muñoz, E., Sepúlveda, SA, Rebolledo, S., 2012. T9. Nuevos antecedentes sobre la falla Margamarga y sus implicancias en el peligro sísmico: XIII Congreso Geológico de Chile, Antofagasta.
- Muñoz, E., 2013. Suceptibilidad de remociones en masa y de respuesta sísmica asociada a fallas mayores en zonas urbanas. Estudio de caso en Viña del Mar, V Región. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias con Mención Geología, Departamento de Geología, Universidad de Chile.

- Naranjo, J. y Contreras, J.P., 2010a. Efectos geológicos del sismo del 27 de febrero de 2010: Observaciones de destrucción y depósitos de tsunamis en Bucalemu, comuna de Paredones, VI región de O'Higgins [INF-O'Higgins-03]. SERNAGEOMIN, Santiago, 2 h.
- Naranjo, J. y Contreras, J.P., 2010b. Efectos geológicos del sismo del 27 de febrero de 2010: Observaciones de destrucción y remociones en masa en la comuna de Romeral, VII región de Maule [INF-Maule-11]. SERNAGEOMIN, Santiago, 2 h.
- Naranjo, J. y Contreras, J.P., 2010c. Efectos geológicos del sismo del 27 de febrero de 2010: San Antonio y Lolleo, V región [INF-Valparaíso-01]. SERNAGEOMIN, Santiago, 4 h.
- Ortiz, M. y Fernández, J., 2010. Efectos geológicos del sismo del 27 de febrero de 2010: Inestabilidad de laderas al poblado El Volcán, comuna San José de Maipo, región Metropolitana [INF-RM-03]. SERNAGEOMIN, Santiago, 3 h.
- Páez, D., Moreno, H., Duhart, P., y otros, 2010. Efectos geológicos del sismo del 27 de Febrero de 2010: Remociones en masa en el área urbana de la ciudad de Cañete [INF-Biobío-18]. SERNAGEOMIN, Temuco, 9 h.
- Peña, F. y Mardones, M., 1999. Planificación ecológica en el curso inferior del río Itata. VII Región del Biobío. Revista de Geografía de Chile Terra Australis, No. 44, pp. 45-62.
- Pineda, V., 1986. Evolución paleográfica de la cuenca sedimentaria Cretácico-Terciaria de Arauco. *En* Frutos, J., Oyarzún R. y Pincheira, M. (eds.) Geología y Recursos Minerales de Chile, Tomo 1. Universidad de Concepción, pp. 375-390.
- Pulido, N., Yagi, Y., Kumagani, H., y Nishimura, N., 2011. Rupture process and coseismic deformations of the 27 February 2010 Maule Earthquake, Chile. *Earth Planets Space*, Vol. 63, pp. 1-4.
- Pérez, G., 2005. La Percepción Remota. Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica, Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad de Tolima.
- Ramírez, P. y Derch, P., 2010a. Efectos geológicos del sismo del 27 de Febrero de 2010: Observaciones de daños en algunos sectores de la ciudad de Concepción región de Biobío [INF-Biobío-13]. SERNAGEOMIN, Puerto Varas, 5 h.
- Ramírez, P. y Derch, P., 2010b. Efectos geológicos del sismo del 27 de Febrero de 2010: Observaciones de daños en la ciudad de Lota [INF-Biobío-19]. SERNAGEOMIN, Temuco, 6 h.
- Ramírez, P. y Derch, P., 2010c. Efectos geológicos del sismo del 27 de Febrero de 2010: Observaciones de daños en la localidad de Caleta Las Peñas, y evaluación de los terrenos para viviendas provisorias en la ciudad de Arauco [INF-Biobío-07]. SERNAGEOMIN, Temuco, 5 h.
- Ramírez, P. y Derch, P., 2010d. Efectos geológicos del sismo del 27 de Febrero de 2010: Observaciones en las caletas Cocholgüe y Punta Lavapie, región del Biobío [INF-Biobío-04]. SERNAGEOMIN, Santiago, 7 h.

- Rodríguez, C., Bommer, J.J., y Chandler, R., 1999. Earthquake-induced landslides: 1980-1997. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 18, pp. 325-346.
- Romero, J., Perez, C., Rodrigues, F., Lara, M., y Ayala, A., 2010. Investigación sobre los efectos causados por el terremoto y tsunami del 27 de febrero en la Costa.
- Romero, J., 2010, Informe Técnico 01.03.010. Segundo reporte del evento sísmico del 27.02.10 y efectos en la Provincia de Cachapoal. Museo Regional de Rancagua, Taller de Geología.
- Ruegg, J. C., Rudloff, A., Vigny, C., Madariaga, R., De Chabaliere, J. B., Campos, J., y otros, 2009. Interseismic strain accumulation measured by GPS in the seismic gap between Constitución and Concepción in Chile. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 175, pp. 78-85.
- Ruiz, S., y Madariaga, R., 2012. Sismogénesis, proceso de ruptura y réplicas del mega terremoto del Maule 2010. *En Mw=8.8: Terremoto en Chile, 27 de febrero 2010*. Primera edn., Departamento Ingeniería Civil, FCFM, Universidad de Chile.
- Ryder, I., Rietbrock, A., Kelson, K., Burgmann, y Floyd, M., 2012. Large extensional aftershocks in the continental forearc triggered by the 2010 Maule earthquake, Chile. *Geophys. J. Int.*, No. 188, pp. 879-890.
- Sabaj, R., 2008. Identificación y caracterización de estructuras potencialmente activas en la Cordillera de la Costa entre los 33° y 33° 45' S. Memoria para optar al Título de Geóloga, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Saragoni, R., y Ruiz, S., 2012. Implicancias y nuevos desafíos del diseño sísmico de los acelerógramas del Terremoto del 2010, en *Mw=8.8: Terremoto en Chile, 27 de febrero 2010*. Primera edn., Departamento Ingeniería Civil, FCFM, Universidad de Chile.
- Sato, H.P., Hasegawa, H., Fujiwara, S., Tobita, M., Koarai, M., Une, H., y Iwahashi, J., 2007. Interpretation of landslide distribution triggered by the 2005 northern Pakistan earthquake using spot 5 imagery. *Landslides*, Vol. 4, No. 2, pp. 113-122.
- Sepúlveda, F. y Espinoza, F., 2010a. Efectos geológicos del sismo del 27 de Febrero de 2010: Observaciones en el sector costero entre Pudá y Coelemu región del Biobío [INF-Biobío-22]. SERNAGEOMIN, Santiago, 4 h.
- Sepúlveda, F. y Espinoza, F., 2010b. Efectos geológicos del sismo del 27 de Febrero de 2010: Remociones en masa y agrietamientos en población El Colo y caleta Los Bagres, Tomé, región del Biobío [INF-Biobío-21]. SERNAGEOMIN, Santiago, 7 h.
- Sepúlveda, S., Murphy, W., Jibson, R., y Petley, D., 2005a. Seismically induced rock slope failures resulting from topographic amplification of strong ground motions: The case of Pacoima Canyon, California. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 275, No. 3, pp. 221-232.
- Sepúlveda, S., Murphy, W., Jibson, R., y Petley, D., 2005b. Topographic controls on coseismic rock slides during the 1999 Chi-chi earthquake, Taiwan. *Quarterly journal of engineering*

- geology and hydrogeology, Vol. 38, No. 2, pp. 189-196.
- Sepúlveda, S., Rebolledo, S., Farías, M., y otros, 2012. Efectos geológicos, en Mw=8.8: Terremoto en Chile, 27 de febrero 2010. Primera edn., Departamento Ingeniería Civil, FCFM, Universidad de Chile.
- Sepúlveda, S.; Serey, A. Lara M.; Pavez, A.; Rebolledo, S., 2010, Landslides induced by the April 2007 Aysén fjord earthquake, Chilean Patagonia. *Landslides*, Vol. 7, No. 4, pp. 483-492.
- Sepúlveda, SA, 2005. Código N° A01-03, Reconocimiento de efectos de amplificación topográfica via análisis de deslizamientos en laderas rocosas. Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica, IX Jornadas.
- Serey, A., 2011a, Análisis de las remociones en masa generadas por el terremoto del Fiordo Aysén de 2007 (45,5°S). Tesis para optar al Grado de Magister en Ciencias con mención en Geología, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- SERNAGEOMIN, 2003. Carta Geológica de Chile, escala 1:1.000.000. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.
- Shengwen, Q., Qjiang, X., Hengxing, L., y otros, 2010. Spatial distribution analysis of landslides triggered by 2008.5.12 Wenchuan Earthquake, China. *Engineering Geology*, Vol. 116, pp. 95-108.
- Silva, C., Muñoz, M. Efectos geológicos del sismo del 27 de Febrero de 2010 en el Volcán San José, Región Metropolitana. SERNAGEOMIN (inédito).
- Soeters, R. y Van Western, C.J., 1996. Slope instability recognition, analysis and zonation. *En Landslides Investigation and Mitigation: Special Report National Academy Press Washington D.C.*
- Stein, S., y Wysession, M., 2003. *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*. Blackwell Publishing.
- Toro, K., 2007. Influencia de las características geológicas en las propiedades geotécnicas de granitoides jurásicos y suelos asociados en la Ruta 68. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Tong, X., Sandwell, D., Luttrell, K., Brooks, B., Bevis, M., Shimada, M., y otros, 2010. The 2010 Maule, Chile earthquake: Downtip rupture limit revealed by space geodesy. *Geophysical Research Letters*, Vol.37, No 24.
- Vargas, G., Farías, M., Carretier, S., Tassara, A., Baize, S., y Melnick, D., 2011. Coastal uplift and tsunami effects associated to the 2010 Mw 8.8 Maule earthquake in Central Chile. *Andean Geology*, Vol. 38, No. 1, pp. 219-238.
- Varnes, D., 1984. *Landslide Hazard Zonation: A review of principles and practice*. Natural Hazards 3.

- Vázquez, P., Falcón, F., y Ramírez, P., 2010. Efectos geológicos del sismo del 27 de Febrero de 2010: Observaciones de daños en algunos sectores de las comunas de Talcahuano y Hualpén [INF-Biobío-01]. SERNAGEOMIN, Santiago, 9 h.
- Verdugo, R., González, J., González, V., y Torres, A., 2012. Características y efectos del fenómeno de licuefacción. *En* Mw=8.8: Terremoto en Chile, 27 de febrero 2010. Primera edn., Departamento Ingeniería Civil, FCFM, Universidad de Chile.
- Vigny, C., Socquet, A., Peyrat, S., y otros, 2011. The 2010 Mw 8.8 Maule Megathrust Earthquake of Central Chile, Monitored by GPS. *Science*, Vol. 332, No. 6036, pp. 1417-1421.
- Wick, E., Baumann, V., y Jaboyedoff, M., 2010. Brief communication report on the impact of the 27 february 2010 earthquake (Chile, Mw 8.8) on rockfalls in the las Cuevas Valley, Argentina. *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol. 10, No. 9, pp. 1989-1993.

Anexo A

Inventario RM. Sismo del Maule

Sitio #	Localidad	COD_RM	Longitud	Latitud	Región	Comuna	Fecha_pre	Fecha_post	Área [m2]	Pendiente [°]	Orientación	LITO	cert	Dist_rup [km2]	Fuente
1	Camino El Asilo	2	-71,368	-33,755	V	San Antonio	-----	-----	S/D	S/D	Norte	72	1	46,5059	[2]
2	Camino Puangue-Cucumen - La Foresta	2	-71,420	-33,747	V	San Antonio	-----	-----	S/D	S/D	Este	4	1	44,6303	[2]
3	Camino Puangue - Cucumen - La Floresta	2	-71,401	-33,722	V	San Antonio	-----	-----	S/D	S/D	Norte	4	1	45,1568	[2]
4	Cuesta Alhue, San Vicente - Cuesta Alhue	2	-71,257	-34,000	V	San Pedro	-----	-----	S/D	S/D	Sur	72	1	51,0867	[2]
5	Camino a Colliguay	2	-71,268	-33,198	V	Quilpue	-----	-----	S/D	S/D	Sur	4	1	73,6719	[2]
6	Acceso a Quintay	2	-71,619	-33,205	V	Casablanca	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	4	1	60,1338	[2]
7	Via Las Palmas, varios sectores	2	-71,505	-33,045	V	Viña del Mar	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	4	1	78,1448	[2]
8	Cuesta Ibahe, sector cuesta	2	-71,358	-33,446	V	Casablanca	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	4	1	52,797	[2]
9	En intersección Quebrada Honda-Rio Maipo	3	-71,545	-33,749	V	Santo Domingo	30-01-2010	04-10-2011	1734	36	Norte	4	1	40,6786	[1]
10	Carretera costera	3	-71,547	-32,956	V	Viña del Mar	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	72	1	85,2431	[V-03]
11	Edificio Paraíso de la Costa	3	-71,547	-32,953	V	Viña del Mar	14-10-2008	02-01-2011	S/D	S/D	Oeste	72	1	85,5296	[V-03]
12	posible caída de rocas	1	-71,625	-33,574	V	San Antonio	08-10-2009	04-10-2011	S/D	> 60	Oeste	6	2	38,5597	[1]
13	Paseo peatonal 21 de Mayo	6	-71,631	-33,032	V	Valparaíso	-----	-----	S/D	35	Este	6	1	75,5484	[V-01]
14	Calle Montemar	6	-71,546	-32,961	V	Viña del Mar	-----	-----	S/D	s/d	Oeste	72	1	84,7976	[V-03]
15	Frente Islote Pupuya	1	-71,883	-33,976	VI	Navidad	17-05-2009	23-03-2010	S/D	> 60	Oeste	2	3	31,4715	[1]
16	S Quebrada Grande	2	-71,983	-34,195	VI	Pichilemu	28-04-2007	05-06-2010	532	30	Norte	2	2	30,6396	[1]
17	S quebrada Grande 2	2	-71,983	-34,195	VI	Pichilemu	28-04-2007	05-06-2010	128	30	Norte	2	2	30,6396	[1]
18	Navidad	2	-71,769	-33,945	VI	Navidad	-----	-----	S/D	S/D	S/D	2	1	34,3066	[2]
19	Cuesta Los Leones	2	-71,732	-33,968	VI	Navidad	-----	-----	S/D	55	Oeste	2	1	35,7009	[2]
20	Ruta 5 CH (Pelequen - San Antonio)	2	-71,376	-34,101	VI	Las Cabras	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	72	1	47,8134	[2]
21	Corcolen - Malloa	2	-71,022	-34,410	VI	Malloa	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	72	1	61,6169	[2]
22	Camino La Fruta	2	-71,050	-34,442	VI	San Vicente	-----	-----	S/D	S/D	Sur	72	1	61,3407	[2]
23	Lo Valdivia	2	-71,968	-34,636	VI	Paredones	-----	-----	S/D	S/D	Norte	4	1	38,313	[2]
24	Sector Las Brisas	2	-71,861	-33,947	VI	Navidad	-----	-----	S/D	S/D	Norte	2	1	31,9197	[VI-01]
25	Ruta hacia Paredones	2	-71,925	-34,654	VI	Paredones	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	4	1	39,8171	[VI-03]
26	E Loma del arbolito	3	-71,107	-34,583	VI	Placilla	06-03-2007	22-02-2011	158	23	Norte	1	3	62,4537	[1]
27	SE Loma del Durazno	3	-71,080	-34,537	VI	San Vicente	16-08-2008	24-08-2010	757	28	Este	1	2	62,2424	[1]
28	Ribera Sur Estero Quebrada Honda	3	-71,912	-34,177	VI	Pichilemu	28-04-2007	05-06-2010	2004	30	Este	4	2	32,2959	[1]
29	Sur Punta Bucalemu	3	-72,050	-34,651	VI	Paredones	01-09-2005	08-02-2010	280	27	Oeste	4	3	36,323	[1]
30	Puertecillo	3	-71,936	-34,068	VI	Navidad	17-05-2009	23-03-2010	3105	35	Sur	2	1	30,608	[1]
31	Acantilado Costero	3	-72,000	-34,170	VI	Litueche	28-04-2007	05-06-2010	3811	28	Oeste	4	3	29,9905	[1]
32	Lado Sur Estero Topocalma	3	-71,941	-34,166	VI	Pichilemu	28-04-2007	05-06-2010	1192	31	Norte	4	2	31,429	[1]
33	Ladera cae hacia ruta H-30	3	-71,143	-34,393	VI	Coltauco	28-04-2007	13-08-2010	396	27	Este	5	5	57,9391	[1]
34	Quebrada La Sepultura (loma corazón)	3	-71,098	-34,247	VI	Coltauco	16-08-2008	13-08-2010	513	24	Norte	1	2	57,2589	[1]
35	Cerro Doñihue	3	-70,991	-34,235	VI	Doñihue	03-02-2010	17-09-2010	3336	S/D	Sur	5	5	60,6186	[1]
36	O Rio Rapel	3	-71,591	-34,038	VI	Litueche	03-02-2010	21-03-2010	1684	27	Este	4	1	40,4465	[1]
37	Matanzas	3	-71,874	-33,963	VI	Navidad	-----	-----	S/D	S/D	S/D	2	1	31,6996	[2]; [VI-01]
38	Zona Puente Rio Rapel	3	-71,734	-33,939	VI	Navidad	30-01-2010	04-10-2011	S/D	16	Oeste	2	1	35,4836	[VI-01]; [1]
39	NO de Bucalemu	1	-72,042	-34,624	VI	Paredones	28-04-2007	08-02-2010	806	15	Oeste	6	3	36,0317	[1]
40	Ladera NE Cerro Valdovinos	1	-71,330	-34,362	VI	Pichidegua	28-04-2007	13-08-2010	1263	37	Este	5	3	51,7928	[1]
41	Poblacion Pumanque-Cruce Ruta I-72	1	-71,656	-34,614	VI	Pumanque	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	3	1	46,9041	[2]
42	San Fernando- La Gloria	1	-71,159	-34,621	VI	Nancagua	-----	-----	S/D	S/D	Este	1	1	61,6358	[2]
43	San Fernando-La Gloria	1	-71,145	-34,616	VI	Placilla	-----	-----	S/D	S/D	Norte	1	1	62,0162	[2]
44	Tinguiririca	1	-70,879	-34,681	VI	Chimbarongo	-----	-----	S/D	S/D	Este	1	1	70,8783	[2]
45	Deslizamientos en Avda. Santa Maria [13177]	13	-72,420	-35,329	VII	Constitución	22-07-2009	02-03-2010	S/D	53	Este	4	1	37,6583	[VII-07]
46	Derrumbe cerro O'higgins [13177]	2	-72,416	-35,327	VII	Constitución	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	4	1	37,7473	[VII-07]
47	Arrieros zona Curico	3	-70,763	-35,093	VII	Romeral	01-10-2010	03-03-2010	S/D	55	Sur	1	1	83,0385	[1]

Sitio #	Localidad	COD_RM	Longitud	Latitud	Región	Comuna	Fecha_pre	Fecha_post	Área [m2]	Pendiente [°]	Orientación	LITO	cert	Dist_rup [km2]	Fuente
48	Cuesta Las Garzas, Curicó-Licantén-Iloca	2	-71,429	-34,989	VII	Rauco	-----	-----	S/D	S/D	Sur	72	1	61,0055	[2]
49	Sector Punta de Rosas	2	-71,596	-35,076	VII	Sagrada Familia	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	1	1	57,6701	[2]
50	Camino San Rafael-Villa Prat	2	-71,536	-35,195	VII	Sagrada Familia	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	1	1	61,9789	[2]
51	Camino variante Chupallar	2	-71,242	-35,858	VII	Colbún	-----	-----	S/D	S/D	Sur	72	1	74,7421	[2]
52	Camino Talca-Curepto, Sector Cuesta Batuco	2	-71,962	-35,301	VII	Penchahue	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	4	1	50,8682	[2]
53	Sector mirador del "Velo de la novia"	2	-71,016	-35,462	VII	Molina	-----	-----	S/D	S/D	Sur	1	1	77,6292	[2]
54	San Rafael - Villa Prat, sector Puente Los Perros	2	-71,542	-35,203	VII	Sagrada Familia	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	1	1	61,931	[2]
55	Camino Curico-Iloca-Lipimvida	2	-72,008	-34,983	VII	Licantén	-----	-----	S/D	S/D	Este	72	1	43,7914	[2]
56	Curanilahue Mundo Nuevo Bajo Los Rios	2	-73,216	-37,427	VIII	Curanilahue	14-11-2009	29-10-2011	1000	18	Norte	6	1	37,032	[2]
57	NO de Llico	3	-72,068	-34,737	VII	Vichuquén	04-08-2007	02-08-2010	954	33	Oeste	6	3	37,2203	[1]
58	O de Llico	3	-72,095	-34,762	VII	Vichuquén	01-09-2005	02-08-2010	460	25	Oeste	6	3	37,0689	[1]
59	N Rada Llico	3	-72,069	-34,728	VII	Vichuquén	28-04-2007	02-08-2020	S/D	30	Norte	6	3	37,1589	[1]
60	S Punta Cardonal	3	-72,143	-34,822	VII	Vichuquén	28-04-2007	02-08-2010	S/D	S/D	Oeste	6	3	36,8862	[1]
61	Cercano a Quebrada Concones	3	-71,968	-34,912	VII	Vichuquén	28-04-2007	09-03-2010	537	30	Este	6	3	43,27	[1]
62	Entre rio Purapel y estero los Rastrojos	3	-72,156	-35,568	VII	San Javier	28-04-2007	22-03-2011	175	16	Oeste	6	3	47,4083	[1]
63	Deslizamiento frente a super Las Brisas.	3	-72,158	-34,884	VII	Licantén	-----	-----	S/D	40	Oeste	6	1	37,6742	[VII-10]
64	Los Canelos c/ Roberto Urrutia Concha	3	-72,414	-35,344	VII	Constitución	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	4	1	37,9732	[VII-07]
65	Sector Terrazas del Maule	3	-72,412	-35,343	VII	Constitución	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	4	1	38,0199	[VII-07]
66	Talud inestable acceso sur Iloca	3	-72,183	-34,973	VII	Licantén	-----	-----	S/D	55	Oeste	72	1	38,7149	[VII-10]
67	Ladera del cerro en el sector del lebrero Iloca	3	-72,184	-34,952	VII	Licantén	23-09-2004	03-09-2010	S/D	S/D	Oeste	6	1	38,2806	[VII-10]
68	Ladera al oriente de la pista de motocross.	3	-72,175	-34,932	VII	Licantén	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	6	1	38,1147	[VII-10]
69	deslizamiento en vichuquen	3	-72,100	-34,770	VII	Vichuquén	28-04-2007	02-08-2010	S/D	29	Oeste	6	2	37,0441	[1]
70	SO de Lico	1	-72,102	-34,774	VII	Vichuquén	04-08-2007	02-08-2010	S/D	23	Oeste	6	3	37,032	[1]
71	SO de Lico 2	1	-72,101	-34,771	VII	Vichuquén	04-08-2007	02-08-2010	S/D	27	Oeste	6	3	37,0089	[1]
72	SO de Constitución	1	-72,095	-34,762	VII	Constitución	-----	-----	S/D	<60	Oeste	4	3	37,0689	[1]
73	Ladera hacia río Maule	1	-72,404	-35,339	VII	Constitución	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	4	1	38,2178	[VII-07]
74	A lo largo Río Claro	1	-70,664	-35,195	VII	Romeral	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	5	1	91,3786	[VII-11]
75	Segmento Los Queñes-Los Maitenes	1	-70,520	-35,051	VII	Romeral	-----	-----	S/D	> 35	Norte	1	1	97,2612	[VII-11]
76	Costanera del mar	1	-72,427	-35,326	VII	Licantén	-----	-----	S/D	S/D	Norte	4	1	37,4371	[VII-07]
77	Punta Tumbes	4	-73,098	-36,660	VIII	Talcahuano	-----	-----	S/D	42	Este	6	1	34,5092	[3]
78	Sector los Sauces, Sn Fabian de Alico	1	-71,271	-36,657	VIII	San Fabián	-----	-----	S/D	23	Este	1	1	87,595	[VIII-28]
79	Sector Cuesta Caracol	13	-71,370	-36,653	VIII	San Fabián	-----	-----	S/D	s/d	S/D	4	1	82,324	[VIII-28]
80	Carretera Lebu- Arauco	3	-73,475	-37,536	VIII	Lebu	-----	-----	S/D	s/d	S/D	2	1	29,2359	[VIII-12]
81	Poblacion Nuevo Horizonte	13	-73,144	-37,008	VIII	Coronel	-----	-----	S/D	s/d	S/D	2	1	35,7148	[VIII-26]
82	Sector Villa Ensenada (Denavi Sur)	4	-73,102	-36,765	VIII	Talcahuano	18-10-2009	19-08-2011	S/D	28	Sur	2	1	35,1214	[VIII-16]; [3]
83	deslizamientos y luego flujo de detritos	4	-73,187	-37,604	VIII	Los Alamos	12-09-2009	29-10-2011	687	15-25	Norte	4	2	36,9962	[1]
84	Cerca Estero Cabrería (cluster RM)	3	-73,181	-37,818	VIII	Cañete	19-01-2010	29-10-2011	1151	23	Sur	6	2	38,0353	[1]
85	Cerca Estero Cabrería 2	3	-73,181	-37,818	VIII	Cañete	19-01-2010	29-10-2011	882	23	Sur	6	2	38,0353	[1]
86	Estero Hullinco 1	3	-73,491	-37,391	VIII	Arauco	14-11-2009	19-08-2011	S/D	23	Este	2	3	28,0565	[1]
87	Ladera O Estero Hullinco	3	-73,498	-37,410	VIII	Curanilahue	14-11-2009	19-08-2011	13234	S/D	Norte	2	2	28,1725	[1]
88	Palihue - Colico Alto	2	-72,850	-37,326	VIII	Santa Juana	-----	-----	S/D	S/D	S/D	4	1	46,3033	[2]
89	Balsero Laja	2	-72,735	-37,270	VIII	Santa Juana	-----	-----	S/D	S/D	S/D	4	1	49,7818	[2]
90	Río Claro Turquía San Rosendo	2	-72,709	-37,251	VIII	San Rosendo	-----	-----	S/D	18	Este	4	1	50,4702	[2]
91	Frente al Cristo, Bulnes - Concepción	2	-72,895	-36,824	VIII	Concepción	03-07-2009	15-02-2010	30	S/D	Este	4	1	41,637	[2]
92	Agua de la Gloria Palomares	2	-72,963	-36,801	VIII	Concepción	-----	-----	S/D	S/D	S/D	4	1	39,3499	[2]
93	Confluencia-Llahuecuy-Cruce N-60-O	2	-72,434	-36,634	VIII	Portezuelo	-----	-----	S/D	S/D	Sur	72	1	54,3898	[2]
94	Caleta Las Peñas	2	-73,436	-37,257	VIII	Arauco	18-10-2009	19-08-2011	1769	33	Oeste	3	1	29,1803	[VIII-07]

Sitio #	Localidad	COD_RM	Longitud	Latitud	Región	Comuna	Fecha_pre	Fecha_post	Área [m2]	Pendiente [°]	Orientación	LITO	cert	Dist_rup [km2]	Fuente
95	Sector Bellavista - Benjamin Esquella	2	-73,155	-37,087	VIII	Lota	-----	-----	S/D	S/D	S/D	2	1	35,9596	[VIII-19]
96	P03-informe 13195	2	-73,115	-36,710	VIII	Talcahuano	-----	-----	S/D	S/D	Este	72	1	34,3605	[VIII-10]
97	P04-informe 1395	2	-73,115	-36,708	VIII	Talcahuano	-----	-----	S/D	S/D	Este	72	1	34,3428	[VIII-10]
98	Derrumbe de suelo y roca?	2	-73,258	-37,554	VIII	Curanilahue	12-02-2009	29-10-2011	339	26	Norte	6	2	34,8851	[1]
99	Camino entre Las Vegas del Itata y Coelemu	2	-72,738	-36,409	VIII	Coelemu	-----	-----	S/D	18	S/D	4	2	40,8411	[VIII-22]
100	Sector Caracol. San Fabian de Alico	3	-71,390	-36,650	VIII	San Fabián	-----	-----	S/D	S/D	Sur	72	1	81,2683	[VIII-28]
101	Punta Lavapie	3	-73,575	-37,153	VIII	Arauco	-----	-----	S/D	S/D	S/D	2	1	25,313	[VIII-04]
102	Villa Los Arrayanes, Arauco	3	-73,325	-37,251	VIII	Arauco	-----	-----	S/D	17	Oeste	3	1	32,0478	[VIII-03]
103	deslizamiento activo	3	-73,326	-37,251	VIII	Arauco	18-10-2009	23-12-2011	S/D	16	Sur	3	1	32,12	[VIII-03]; [1]
104	Sector Calero Sur Bajo*	3	-73,154	-37,081	VIII	Lota	-----	-----	S/D	S/D	S/D	2	1	35,9292	[VIII-19]
105	Calle Manuel Montt con Onofre Rojas	3	-73,153	-37,022	VIII	Coronel	-----	-----	S/D	S/D	S/D	9	1	35,5594	[VIII-26]
106	Sector Villa Hermosa	3	-73,094	-36,776	VIII	Talcahuano	-----	-----	S/D	S/D	S/D	9	1	35,4365	[VIII-16]
107	Sector Poblacion Los Lobos Viejos, Talcahuano	3	-73,143	-36,723	VIII	Talcahuano	-----	-----	S/D	S/D	S/D	9	1	33,6019	[VIII-15]
108	Sector Población Los Copihues	3	-73,147	-36,721	VIII	Talcahuano	-----	-----	S/D	> 60	Sur	6	1	33,4851	[VIII-15]
109	Sector Caleta Tumbes (P09)	3	-73,094	-36,641	VIII	Talcahuano	-----	-----	S/D	S/D	Este	6	1	34,4411	[VIII-15]
110	Ribera E rio Biobio	3	-73,320	-38,480	VIII	Tirua	13-02-2010	25-11-2011	214	39	Oeste	6	2	37,2872	[1]
111	Ribera N Rio Los Pinos	3	-73,285	-37,550	VIII	Curanilahue	12-09-2009	29-10-2011	217	32	Este	6	2	34,2233	[1]
112		3	-73,128	-37,376	VIII	Curanilahue	14-11-2009	29-10-2011	2302	31	Este	6	2	37,7847	[1]
113	Cerca Rio Nicudahue 3	3	-72,772	-37,489	VIII	Nacimiento	28-04-2007	13-08-2010	89	23	Oeste	4	2	49,462	[1]
114	Deslizamiento reactivado	3	-73,269	-37,551	VIII	Curanilahue	19-01-2010	29-10-2011	1548	22	Este	6	2	34,6637	[1]
115		3	-73,265	-37,647	VIII	Los Alamos	12-09-2009	29-10-2011	512	40	Oeste	6	3	35,0606	[1]
116	Rio Carampague	3	-73,135	-37,558	VIII	Curanilahue	12-09-2009	29-10-2011	636	22	Oeste	4	2	38,4828	[1]
117	Cerca Estero Cabreira	3	-73,174	-37,823	VIII	Cañete	19-01-2010	29-10-2011	452	22	Sur	4	2	38,4483	[1]
118	Cerca Estero El Molino	3	-73,096	-37,284	VIII	Arauco	18-10-2009	23-12-2011	443	20	Oeste	6	2	38,2186	[1]
119	Riebera E Rio Negro	3	-73,221	-37,509	VIII	Curanilahue	12-09-2009	29-10-2011	1532	18	Oeste	4	2	35,6948	[1]
120	Ladera cae Quebrada Esperanza	3	-73,198	-37,770	VIII	Cañete	29-01-2010	29-10-2011	608	30	Este	6	2	37,6199	[1]
121	A 800 m E rio Lia	3	-73,128	-37,260	VIII	Arauco	18-10-2009	29-10-2011	571	20	Oeste	6	2	37,5167	[1]
122	Estero Huillinco 2	3	-73,493	-37,394	VIII	Arauco	14-11-2009	19-08-2011	2988	27	Este	2	3	28,1088	[1]
123	Cerca Rio Nicudahue	3	-72,829	-37,580	VIII	Nacimiento	28-04-2007	13-08-2010	771	20	Oeste	4	3	47,996	[1]
124	Cerca Rio Nicahue 2	3	-72,829	-37,580	VIII	Nacimiento	28-04-2007	13-08-2010	379	20	Oeste	4	3	47,996	[1]
125	Estero Ranquilco lado E	3	-73,475	-37,694	VIII	Los Alamos	12-09-2009	19-08-2011	401	17	Oeste	2	2	29,7982	[1]
126	Lado S rio Trongol	3	-73,201	-37,600	VIII	Los Alamos	12-09-2009	29-10-2011	2459	32	Norte	4	2	37,0365	[1]
127	Lado S rio Trongol (cluster) 1	3	-73,184	-37,607	VIII	Los Alamos	12-09-2009	29-10-2011	2265	S/D	Oeste	4	2	37,1116	[1]
128	Lado S rio Trongol (cluster) 2	3	-73,185	-37,610	VIII	Los Alamos	12-09-2009	29-10-2011	1671	22	Norte	4	2	37,0083	[1]
129		3	-73,162	-37,533	VIII	Curanilahue	12-09-2009	29-10-2011	381	26	Norte	4	2	37,6168	[1]
130	Ladera cae hacia rio Pichilo	3	-73,155	-37,335	VIII	Arauco	18-10-2009	29-10-2011	750	29	Este	6	2	36,8376	[1]
131	Ladera Sur Estero Provoque	3	-73,197	-37,890	VIII	Contulmo	19-01-2010	29-10-2011	248	17	Norte	6	2	38,0377	[1]
132	Ladera al Oeste Estero Provoque	3	-73,210	-37,890	VIII	Contulmo	19-01-2010	29-10-2011	768	27	Oeste	6	2	37,3998	[1]
133		3	-73,200	-37,768	VIII	Cañete	19-01-2010	29-10-2011	601	24	Sur	6	2	37,3623	[1]
134		3	-73,268	-37,665	VIII	Los Alamos	09-12-2009	29-10-2011	1191	34	Oeste	6	2	35,1445	[1]
135	Los Alamos	3	-73,266	-37,661	VIII	Los Alamos	09-12-2009	29-10-2011	1237	27	Sur	6	2	35,0794	[1]
136	Ladera W Estero Ranquilco	8	-73,478	-37,691	VIII	Los Alamos	09-12-2009	19-08-2011	2179	25-30 dem	Este	2	3	29,7241	[1]
137	Estero Cardal ladera O	3	-73,489	-37,626	VIII	Los Alamos	09-12-2009	19-08-2011	1094	14	Norte	2	2	29,3463	[1]
138	Ladera E Rio Curanilahue	3	-73,449	-37,560	VIII	Los Alamos	09-12-2009	19-08-2011	1303	18	Norte	2	2	30,1589	[1]
139	Cluster cerca rio Carampangue 1	3	-73,163	-37,533	VIII	Curanilahue	09-12-2009	29-10-2011	1490	18	Norte	4	2	37,5867	[1]
140	Cluster cerca rio Carampangue 2	3	-73,160	-37,532	VIII	Curanilahue	09-12-2009	29-10-2011	130	29	Norte	4	2	37,7685	[1]
141	Cluster cerca rio Carampangue 3	3	-73,156	-37,525	VIII	Curanilahue	09-12-2009	29-10-2011	154	28	Oeste	4	2	37,8809	[1]

Sitio #	Localidad	COD_RM	Longitud	Latitud	Región	Comuna	Fecha_pre	Fecha_post	Área [m2]	Pendiente [°]	Orientación	LITO	cert	Dist_rup [km2]	Fuente
142	Ladera N rio Cabrera	3	-73,190	-37,381	VIII	Curanilahue	14-11-2009	29-10-2011	175	30	Este	6	2	36,2076	[1]
143	Sur Rio Trongol (cluster) 1	3	-73,188	-37,604	VIII	Los Alamos	09-12-2009	29-10-2011	316	27	Norte	4	2	37,0597	[1]
144	Sur Rio Trongol (cluster) 2	3	-73,188	-37,604	VIII	Los Alamos	09-12-2009	29-10-2011	591	33	Norte	4	2	37,0597	[1]
145	Sur Rio Trongol (cluster) 3	3	-73,184	-37,608	VIII	Los Alamos	18-10-2009	29-10-2011	354	33	Oeste	4	2	37,1202	[1]
146	Cerro frente Rada Buchupureo	3	-72,775	-36,069	VIII	Cobquecura	28-04-2007	13-02-2011	898	17	Oeste	6	2	25,7222	[1]
147		3	-72,737	-36,329	VIII	Cobquecura	-----	-----	772	22	Norte	6	2	34,7169	[1]
148	Ladera Sur rio Taucu	3	-72,725	-36,231	VIII	Cobquecura	-----	-----	32	33	Norte	6	2	29,6796	[1]
149	Ladera Sur Estero Careo	3	-72,703	-36,066	VIII	Cobquecura	-----	-----	324	26	Norte	6	2	28,278	[1]
150	Costado ruta N-40	3	-72,610	-36,224	VIII	Quirihue	-----	-----	90	27	Norte	6	2	34,9339	[1]
151	Quebrada sin nombre	3	-72,682	-36,224	VIII	Cobquecura	-----	-----	566	36	Norte	6	2	31,4647	[1]
152	Isla Mocha, sector centro	1	-73,913	-38,355	VIII	Lebu	-----	-----	S/D	30	S/D	2	1	21,903	[3]
153	Isla Mocha, sector NE	1	-73,915	-38,355	VIII	Lebu	-----	-----	S/D	34	S/D	2	1	21,7599	[3]
154	SW de Lebu	1	-73,674	-37,600	VIII	Lebu	-----	-----	S/D	35	S/D	2	1	24,6251	[3]
155	W de Arauco	1	-73,413	-37,244	VIII	Arauco	-----	-----	S/D	85	S/D	2	1	29,8078	[3]
156	Camino Sta. Juana-Nacimiento	1	-72,960	-37,256	VIII	Santa Juana	-----	29-10-2001	S/D	45	Este	4	1	42,6725	[3]
157	Camino Santa Juana-Concepcion	1	-72,988	-37,111	VIII	Santa Juana	-----	-----	S/D	85	Norte	3	1	41,0223	[3]
158	Camino a Chiguayante	1	-73,038	-36,883	VIII	Chiguayante	-----	-----	S/D	63	Oeste	4	1	37,8053	[3]
159	Pedro de Valdivia	1	-73,054	-36,841	VIII	Concepción	-----	-----	100	63	Oeste	4	1	36,9997	[3]
160	Cerro Caracol	1	-73,042	-36,831	VIII	Concepción	-----	06-05-2011	S/D	61	Norte	4	1	37,2962	[3]
161	Cerro Lo Pequen	1	-73,035	-36,825	VIII	Concepción	-----	-----	S/D	47	S/D	4	1	37,4765	[3]
162	Cerro Lo Galindo	1	-73,054	-36,804	VIII	Concepción	-----	-----	S/D	55	S/D	2	1	36,7434	[3]
163	Cerro Zaror	1	-73,119	-36,716	VIII	Talcahuano	-----	-----	S/D	55	S/D	6	1	34,3234	[3]
164	Isla Quiriquina (pto. cae en el mar)	1	-73,050	-36,627	VIII	Talcahuano	-----	-----	S/D	37	S/D	2	1	35,5307	[3]
165	Ruta N-31, Sector Puente La Escalera	1	-71,356	-36,653	VIII	San Fabián	-----	-----	S/D	S/D	S/D	4	1	83,0319	[VIII-28]
166	Poblacion gendarme aguilera, caída roca	1	-73,148	-37,015	VIII	Coronel	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	2	1	35,6639	[VIII-26]
167	Sector Villa Huachicoop (Cerro San Martin)	1	-73,099	-36,753	VIII	Talcahuano	09-09-2009	06-03-2010	S/D	31	Norte	3	1	35,1056	[VIII-16]; [3]; [1]
168	Caleta Lo Bagres (deslizamientos inf 13206)	3	-72,970	-36,611	VIII	Tomé	-----	-----	S/D	56	Oeste	2	3	37,6462	[3]; [VIII-21]
169		1	-72,760	-37,521	VIII	Nacimiento	-----	13-08-2010	S/D	S/D	Oeste	4	3	49,9721	[1]
170	A 800 m Caleta Lengua	1	-73,176	-36,758	VIII	Talcahuano	-----	-----	S/D	> 60	Sur	4	2	33,0154	[1]
171	A 1000 m Caleta Matanza Punta	1	-72,977	-36,663	VIII	Tomé	03-07-2009	02-10-2010	S/D	31	Oeste	2	2	37,8433	[1]
172	Cerca Estero Cabrera (cluster RM)	1	-73,176	-37,820	VIII	Cañete	19-01-2010	29-10-2011	632	S/D	Sur	4	2	38,1832	[1]
173	Cerca Estero Cabrera 3	1	-73,179	-37,820	VIII	Cañete	19-01-2010	29-10-2011	257	22	Sur	6	3	38,1961	[1]
174		1	-73,483	-37,673	VIII	Los Alamos	09-12-2009	19-08-2011	121	S/D	Este	2	2	29,5309	[1]
175		1	-73,483	-37,672	VIII	Los Alamos	09-12-2009	19-08-2011	868	39	Este	2	2	29,5287	[1]
176	A unos 2 km al N Punta Carnero	1	-73,668	-37,344	VIII	Arauco	18-10-2009	23-12-2011	S/D	31	Oeste	2	2	23,5364	[1]
177	Unos 2.3 km al norte pta. Carnero	1	-73,669	-37,342	VIII	Arauco	18-10-2009	23-12-2011	S/D	31	Oeste	2	2	23,5926	[1]
178	Terminal Internacional San Vicente	1	-73,136	-36,726	VIII	Talcahuano	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	4	2	33,8944	[VIII-01]
179	Sector Pasaje Alessandri, Cañete	6	-73,402	-37,801	VIII	Cañete	-----	-----	S/D	0-15	Oeste	2	1	32,12	[VIII-18]
180	p12. Orilla rio Lebu	9	-73,610	-37,629	VIII	Lebu	-----	-----	S/D	0-15	Este	72	1	26,2858	[VIII-20]
181	Sector Puente Arc nº2	9	-73,585	-37,611	VIII	Lebu	-----	-----	S/D	0-15	Sur	72	1	26,8265	[VIII-12]
182	p11. Orilla rio Lebu	9	-73,585	-37,601	VIII	Lebu	-----	-----	S/D	0-15	Sur	2	1	26,7814	[VIII-20]
183	p2_a. Orilla rio Lebu	9	-73,581	-37,599	VIII	Lebu	-----	-----	S/D	0-15	Sur	72	1	26,8851	[VIII-12]
184	Punto 2 de informe sernageomin 13197	9	-73,580	-37,600	VIII	Lebu	-----	-----	S/D	0-15	Sur	72	1	26,9141	[VIII-12]
185	p3. Orilla rio Lebu	9	-73,578	-37,602	VIII	Lebu	-----	-----	S/D	0-15	Oeste	2	1	26,9742	[VIII-12]
186	p10. Orilla rio Lebu	9	-73,570	-37,601	VIII	Lebu	-----	-----	S/D	0-15	Este	2	1	27,2048	[VIII-20]
187	Sector curico, ribera rio lebu	9	-73,539	-37,617	VIII	Lebu	-----	-----	S/D	0-15	Oeste	2	1	28,0349	[VIII-12]
188	p9. Orilla rio Lebu	9	-73,538	-37,614	VIII	Lebu	-----	-----	S/D	0-15	Norte	2	1	28,0645	[VIII-20]

Sitio #	Localidad	COD_RM	Longitud	Latitud	Región	Comuna	Fecha_pre	Fecha_post	Área [m2]	Pendiente [°]	Orientación	LITO	cert	Dist_rup [km2]	Fuente
189	p8. Orilla rio Lebu	9	-73,533	-37,605	VIII	Los Alamos	-----	-----	S/D	0-15	Oeste	2	1	28,1488	[VIII-20]
190	p7. Orilla rio Lebu	9	-73,535	-37,602	VIII	Lebu	-----	-----	S/D	0-15	Sur	2	1	28,0755	[VIII-20]
191	p6. Orilla rio Lebu	9	-73,538	-37,600	VIII	Lebu	-----	-----	S/D	0-15	Este	2	1	27,9826	[VIII-20]
192	p5. Orilla rio Lebu	9	-73,540	-37,597	VIII	Lebu	-----	-----	S/D	0-15	Norte	2	1	27,9183	[VIII-12]
193	pto 5 inform 13197	9	-73,525	-37,595	VIII	Lebu	-----	-----	S/D	0-15	Sur	2	1	28,3377	[VIII-20]
194	p4 13205	9	-73,541	-37,583	VIII	Lebu	-----	-----	S/D	0-15	Este	2	1	27,8668	[VIII-20]
195	p3 13205	9	-73,534	-37,583	VIII	Lebu	-----	-----	S/D	0-15	Oeste	2	1	28,0763	[VIII-20]
196	Ribera Este Rio Carampangue	9	-73,159	-37,525	VIII	Curanilahue	12-09-2009	29-10-2011	160	15-25	Oeste	72	2	37,6006	[1]
197	Calles Videla con Septimo de Linea	6	-73,399	-37,800	VIII	Cañete	-----	-----	S/D	50-60	S/D	2	1	32,1966	[VIII-18]
198	Cerro Los Filtros	3	-73,659	-37,618	VIII	Lebu	-----	-----	S/D	S/D	S/D	2	1	24,9317	[VIII-12]
199	Cerro La Cruz	3	-73,651	-37,614	VIII	Lebu	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	72	1	25,1426	[VIII-12]
200	Caleta Tumbes - Vertiente Sur	6	-73,093	-36,638	VIII	Talcahuano	-----	-----	S/D	S/D	S/D	6	1	34,4516	[VIII-15]
201	Ladera E Estero Huillinco	6	-73,497	-37,411	VIII	Curanilahue	14-11-2009	19-08-2011	858	23	Oeste	2	2	28,106	[1]
202	Pta. Carneros, SW de Arauco	3	-73,267	-37,326	VIII	Arauco	-----	-----	S/D	90	S/D	2	1	33,9213	[3]
203	Caleta Cocholgüe ?	3	-72,973	-36,592	VIII	Tome	-----	-----	5000	80	Sur	2	1	37,3947	[3]; [5]
204	Laguna Lo Galindo	9	-73,040	-36,799	VIII	Concepción	-----	-----	S/D	90	S/D	2	1	37,1284	[3]
205	Caleta Las Peñas 2	4	-73,436	-37,256	VIII	Arauco	18-10-2009	19-08-2011	30	55	Oeste	2	1	29,1768	[5]
206	Insp.Fernandez-Tolhuaca	2	-71,728	-38,232	IX	Curacautín	-----	-----	S/D	S/D	Este	1	1	92,5271	[2]
207	Angol - Collipulli 1	2	-72,569	-37,876	IX	Angol	-----	-----	S/D	S/D	Sur	8	1	57,7587	[2]
208	Angol - Collipulli 2	2	-72,598	-37,867	IX	Angol	-----	-----	S/D	S/D	Sur	8	1	56,884	[2]
209	Miraflores Vegas Blancas	2	-72,967	-37,866	IX	Los Sauces	-----	-----	S/D	S/D	Este	4	1	44,4522	[2]
210	Lumaco, RM	3	-72,907	-38,168	IX	Lumaco	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	6	1	48,0337	[IX-10]
211	Ladera E Estero Chanquin	3	-73,230	-38,446	IX	Carahue	13-02-2010	25-11-2011	2384	27	Norte	6	2	39,4745	[1]
212	R-60-P	3	-73,140	-38,028	IX	Puren	19-01-2010	07-03-2011	936	13	Oeste	6	2	40,2073	[1]
213		3	-72,985	-37,886	IX	Los Sauces	19-01-2010	01-10-2010	127	30	Este	4	2	44,1336	[1]
214	Camino Forestal - Renaico	3	-72,677	-37,711	IX	Renaico	28-04-2007	29-10-2011	551	20	Norte	6	2	53,2607	[1]
215	Ladera E Estero el Molino	3	-72,656	-37,689	IX	Renaico	28-04-2007	29-10-2011	333	15	Oeste	4	2	54,1429	[1]
216	Ladera S Estero El Molino	3	-72,654	-37,688	IX	Renaico	28-04-2007	29-10-2011	298	15	Oeste	4	2	54,2934	[1]
217	Atravesa camino - Renaico	3	-72,661	-37,681	IX	Renaico	28-04-2007	29-10-2011	1083	27	Este	4	2	53,8562	[1]
218	Al lado camino - Renaico	3	-72,770	-37,651	IX	Angol	28-04-2007	29-10-2011	S/D	15	Este	4	2	49,9283	[1]
219	Rio Picoiquen	3	-72,784	-37,807	IX	Angol	28-04-2007	29-10-2011	1923	36	Norte	4	2	50,5752	[1]
220	Camino Forestal - Angol	3	-72,984	-37,707	IX	Angol	12-09-2009	29-10-2011	287	30	Oeste	4	2	43,4357	[1]
221	Ladera W Rio Puren	3	-73,073	-37,937	IX	Puren	19-01-2010	24-01-2012	616	27	Este	4	2	41,7208	[1]
222	Cordillera Nahuelbuta - Los Sauces	3	-72,825	-37,869	IX	Los Sauces	28-04-2007	29-10-2011	107	21	Sur	4	2	49,283	[1]
223	Cae quebrada cerca ruta R-60-P	3	-73,149	-38,025	IX	Puren	19-01-2010	07-03-2011	1409	28	Este	6	2	39,7539	[1]
224	Puangue - Cuncumun	2	-71,395	-33,715	XIII	Melipilla	-----	-----	S/D	S/D	Sur	3	1	45,3249	[2]
225	Peralillo - Abrantes	2	-70,854	-33,830	XIII	Paine	-----	-----	S/D	S/D	Este	72	1	64,3133	[2]
226	Sector Cerrro Chocalin, Chocalin - Cholqui	2	-71,210	-33,718	XIII	Melipilla	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	1	1	51,7537	[2]
227	El Manzano	2	-70,395	-33,585	XIII	San José de Maipo	-----	-----	S/D	S/D	Sur	72	1	90,0624	[2]
228	Lagunillas	2	-70,348	-33,649	XIII	San José de Maipo	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	1	1	91,5981	[2]
229	Camino Santa Rita de Pirque	2	-70,534	-33,649	XIII	Pirque	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	72	1	79,8698	[2]
230	San Vicente de Macul	2	-70,628	-33,661	XIII	Pirque	-----	-----	S/D	S/D	Este	72	1	74,8107	[2]
231	Acceso a Pirque	2	-70,654	-33,654	XIII	Buin	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	72	1	73,7692	[2]
232	Cuesta Lo Prado	2	-70,931	-33,467	XIII	Pudahuel	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	1	1	69,164	[2]
233	San Pedro	3	-71,664	-33,996	XIII	San Pedro	17-05-2009	23-03-2010	483	29	Sur	4	2	37,7885	[1]
234	Informe Vn San Jose	1	-70,015	-33,787	XIII	Sn. José de Maipo	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	3	1	112,8862	[XIII-01]
235	San José de Maipo	1	-70,347	-33,642	XIII	Sn. José de Maipo	-----	-----	S/D	S/D	Oeste	1	1	91,6728	[XIII-01]

Sitio #	Localidad	COD_RM	Longitud	Latitud	Región	Comuna	Fecha_pre	Fecha_post	Área [m2]	Pendiente [°]	Orientación	LITO	cert	Dist_rup [km2]	Fuente
236	Laguna_Aculeo	9	-70,920	-33,860	RM	Paine	-----	-----	S/D	0-15	Norte	72	1	62,0464	[4]
237	Rapel	9	-71,450	-34,150	VI	LasCabras	-----	-----	S/D	0-15	Este	72	1	45,8276	[4]
238	Punta_de_Lobos	9	-72,030	-34,430	VI	Pichilemu	-----	-----	S/D	0-15	Oeste	72	1	32,9077	[4]
239	Cahuil	9	-72,020	-34,480	VI	Pichilemu	-----	-----	S/D	0-15	Oeste	72	1	34,046	[4]
240	Estero_Nilahue	9	-71,970	-34,540	VI	Pichilemu	-----	-----	S/D	0-15	Norte	72	1	36,5118	[4]
241	Iglesia_de_Yáguil	9	-71,180	-34,620	VI	Nancagua	-----	-----	S/D	0-15	Sur	72	1	60,9311	[4]
242	Casas_de_Yáguil	9	-71,180	-34,620	VI	Nancagua	-----	-----	S/D	0-15	Sur	72	1	60,9311	[4]
243	Centro_recreacional_Yáguil	9	-71,170	-34,620	VI	Nancagua	-----	-----	S/D	0-15	Sur	72	1	61,25	[4]
244	Apalta	9	-71,300	-34,610	VI	SantaCruz	-----	-----	S/D	0-15	Sur	72	1	57,1435	[4]
245	Lago_Vichuquén	9	-72,080	-34,790	VI	Vichuquén	-----	-----	S/D	0-15	Este	72	1	37,998	[4]
246	Rio_Mataquito	9	-72,000	-34,980	VI	Licantén	-----	-----	S/D	0-15	Sur	72	1	43,9736	[4]
247	Curepto	9	-72,020	-35,090	VII	Talca	-----	-----	S/D	0-15	Sur	72	1	45,6195	[4]
248	San_Javier	9	-72,110	-35,560	VII	Linares	-----	-----	S/D	0-15	Sur	72	1	49,0704	[4]
249	Camino El Ajial	9	-71,800	-36,140	VII	Retiro	-----	-----	S/D	0-15	Sur	72	1	65,4511	[4]
250	Camino a Catillo	9	-71,810	-36,170	VII	Parral	-----	-----	S/D	0-15	Sur	72	1	65,4923	[4]
251	Ríotata	9	-72,810	-36,380	VIII	Treguaco	-----	-----	S/D	0-15	Este	72	1	36,9597	[4]
252	LagunaLoMendez	9	-73,050	-36,800	VIII	Concepción	-----	-----	S/D	0-15	Oeste	72	1	36,8517	[4]
253	LagunaLoGalindo	9	-73,040	-36,800	VIII	Concepción	-----	-----	S/D	0-15	Oeste	2	1	37,1327	[4]
254	LagunaLoCustodio	9	-73,040	-36,810	VIII	Concepción	-----	-----	S/D	0-15	Oeste	72	1	37,1948	[4]
255	LagunaRedonda	9	-73,070	-36,810	VIII	Concepción	-----	-----	S/D	0-15	Este	2	1	36,3146	[4]
256	LagunaTresPascualas	9	-73,050	-36,820	VIII	Concepción	-----	-----	S/D	0-15	Este	72	1	36,9776	[4]
257	HumedalenSanPedro	9	-73,050	-36,840	VIII	Concepción	-----	-----	S/D	0-15	Oeste	72	1	37,1079	[4]
258	RestauranteCaminoSantaJuana	9	-73,070	-36,890	VIII	Concepción	-----	-----	S/D	0-15	Este	72	1	36,9375	[4]
259	CaminoSantaJuana	9	-73,070	-36,860	VIII	Concepción	-----	-----	S/D	0-15	Norte	2	1	36,7459	[4]
260	AltosdeChiguayante	9	-73,040	-36,920	VIII	Concepción	-----	-----	S/D	0-15	Norte	2	1	38,034	[4]
261	PoblaciónVillaFuturo	9	-73,020	-36,960	VIII	Concepción	-----	-----	S/D	0-15	Norte	2	1	38,9301	[4]
262	Hualqui	9	-72,960	-36,960	VIII	Concepción	-----	-----	S/D	0-15	Sur	72	1	40,7263	[4]
263	Talcamávida	9	-72,910	-37,160	VIII	Concepción	-----	-----	S/D	0-15	Sur	2	1	43,7799	[4]
264	RíoBiobío	9	-72,880	-37,180	VIII	Concepción	-----	-----	S/D	0-15	Sur	72	1	44,7887	[4]
265	LagunaSeñoraza	9	-72,710	-37,280	VIII	Laja	-----	-----	S/D	0-15	Este	72	1	50,5833	[4]
266	RioCarampangue	9	-73,260	-37,250	VIII	Arauco	-----	-----	S/D	0-15	Este	72	1	33,9157	[4]
267	PaseoElQuilque	9	-72,350	-37,470	VIII	Los Ángeles	-----	-----	S/D	0-15	Norte	72	1	63,3589	[4]
268	RíoLebu	9	-73,570	-37,600	VIII	Lebu	-----	-----	S/D	0-15	Sur	2	1	27,2028	[4]
269	Tierra Blanca (2 DS)	3	-70,641	-34,194	VI	Machali	-----	-----	S/D	0-15	Norte	8	1	73,8833	[6]
270	Melosas	1	-70,020	-33,830	XIII	San José de Maipo	-----	-----	S/D	45	N	3	1	113,4288	[6]
271	Melosas 2	1	-70,030	-33,760	XIII	San José de Maipo	-----	-----	S/D	50	E	3	1	113,5	[6]
272	Estación sismológica	1	-70,200	-33,850	XIII	San José de Maipo	-----	-----	S/D	35	N	5	1	113,42	[6]
273	S Pullay	1	-72,776137	-36,037611	VIII	Cobquecura	-----	-----	S/D	80	N	S/D	2	35,7376	[8]
274	S Buchupureo	3	-72,78342	-36,079862	VIII	Cobquecura	-----	-----	S/D	80	N	6	2	36,2625	[8]
275	Mela	3	-72,838368	-36,354794	VIII	Cobquecura	-----	-----	S/D	40	N	6	2	38,7906	[8]
276	Boca ltata	3	-72,850547	-36,376105	VIII	Treguaco	-----	-----	S/D	20	O	6	2	38,6669	[8]
277	Caleta Lenga	3	-73,15107	-36,766042	VIII	Hualpén	-----	-----	S/D	22	E	72	2	33,8721	[8]
278	Ruta H-25	6	-70,581136	-34,196682	VI	Machali	-----	-----	S/D	20	E	5	1	77,5692	[7]
279	Ruta H-25 ladera sur	1	-70,580791	-34,197372	VI	Machali	-----	-----	S/D	32	O	5	1	77,6235	[7]
280	Las Lomas-Tierras Blancas	3	-70,635979	-34,194223	VI	Machali	-----	-----	S/D	28	S	8	1	74,6909	[7]
281	Las Lomas-Tierras Blancas 2	1	-70,637808	-34,1951	VI	Machali	-----	-----	S/D	S/D	N	8	1	74,5919	[7]
282	Las Lomas-Tierras Blancas 3	3	-70,640042	-34,195043	VI	Machali	-----	-----	S/D	S/D	E	8	1	74,492	[7]

Sitio #	Localidad	COD_RM	Longitud	Latitud	Región	Comuna	Fecha_pre	Fecha_post	Área [m2]	Pendiente [°]	Orientación	LITO	cert	Dist_rup [km2]	Fuente
283	Las Lomas Tierras Blancas 4	6	-70,640396	-34,195354	VI	Machali	-----	-----	S/D	21	N	8	1	74,4934	[7]
284	Las Lomas-Tierras Blancas 5	1	-70,641618	-34,194562	VI	Machali	-----	-----	S/D	S/D	S?	8	1	74,3924	[7]
285	E Lago Rapel	1	-71,379932	-34,145385	VI	Las Cabras	-----	-----	S/D	S/D	O	8	1	48,1568	[7]
286	N Dichato	3	-72,93887	-36,539722	VIII	Tomé	-----	-----	S/D			6	2	37,9225	[8]

Simbología Litología	
1	Rocas volcanoclásticas
2	Rocas sed. paleógenas-neógenas
3	Rocas sed. permicas-mesozoica
4	Rocas intrusivas
5	Rocas volcánicas
6	Basamento metamórfico
72	Depósitos pleistocenos
8	Depósitos no consolidados

Simbología Fuente	
[1]	Este Estudio
[2]	Vialidad
[3]	Mardones y Rojas, 2012
[4]	Verdugo y otros, 2012
[5]	Aguilera, comunicación personal
[6]	Sepúlveda, comunicación personal
[7]	Romero, comunicación personal
[8]	LEU, 2013
[9]	Silva, 2010
[V-01]	Naranjo y Contreras, 2010c
[V-03]	Gajardo y otros, 2010
[XIII-01]	Arenas y otros, 2010a
[VI-01]	Contreras y otros, 2010
[VI-03]	Naranjo y Contreras, 2010a
[VII-07]	Arenas y otros, 2010b
[VII-10]	Fernández y Venegas, 2010
[VII-11]	Naranjo y Contreras, 2010b
[VIII-01]	Vázquez y otros, 2010
[VIII-03]	Falcón y Vázquez, 2010b
[VIII-04]	Ramírez y Derch, 2010d
[VIII-07]	Ramírez y Derch, 2010c
[VIII-10]	Blanco y otros, 2010a
[VIII-12]	Duhart y otros, 2010a
[VIII-15]	Blanco y otros, 2010b
[VIII-16]	Blanco y Creixell, 2010b
[VIII-18]	Paéz y otros, 2010
[VIII-19]	Ramírez y Derch, 2010b
[VIII-20]	Espinoza y otros, 2010
[VIII-21]	Sepúlveda y Espinoza, 2010b
[VIII-22]	Sepúlveda y Espinoza, 2010a
[VIII-28]	Falcón y otros, 2010b
[IX-10]	Duhart y otros, 2010b

Simbología Tipo de remoción en masa	
1	Caída de rocas
2	RM indiferenciadas
3	Deslizamientos superficiales
4	Procesos de RM mixto
6	Deslizamientos rotacionales
8	Flujo de barro
9	Extensiones laterales

Anexo B

Factores condicionantes relevantes para cada tipo de remociones en masa

Tabla B.1: Fuente: (Lara, 2007).

Factores condicionantes	Caídas	Deslizamientos	Flujos	Extensiones laterales
Geología y Geotecnia	X	X	X	X
Geomorfología	X	X	X	X
Hidrología e Hidrogeología	X	X	X	X
Vegetación y Clima		X	X	X
Actividad antrópica	X	X	X	

Anexo C

Valores de propiedades geotécnicas para
rocas y suelos según literatura

Resistencia Matriz de Roca Sana

Figura C.1: Resistencia a la compresión simple y tracción de matriz de roca sana. Fuente: [González y otros \(2004\)](#) en [Muñoz \(2013\)](#)

Roca Sana	Resistencia a la compresión simple (kp/cm ²)		Resistencia a la tracción (kp/cm ²)
	Valores medios	Rangos de valores	
Andesita	2100-3200	1000-5000	70
Anfibolita	2800	2100-5300	230
Anhidrita	900	800-1300	60-120
Arenisca	550-1400	300-2350	50-200
Basalto	800-2000	600-3500	50-250
Caliza	600-1400	500-2000	40-300
Cuarcita	2000-3200	1000-5000	100-300
Diabasa	2400-3500	1300-3650	550
Diorita	1800-2450	1200-3350	80-300
Dolerita	2000-3000	1000-3500	150-350
Dolomita	600-2000	500-3500	50-250
Esquisto	300-600	200-1600	20-55
Gabro	2100-2800	1800-3000	140-300
Gneiss	600-2000	500-2500	50-200
Granito	700-2000	500-3000	70-250
Grauvaca	1000-1500	800-2200	55-150
Limolita		350-2500	27
Lutita	200-400	100-900	
Marga	300 - 700	200-900	
Mármol	1200 - 2000	600 - 2500	65-200
Pizarra	400-1500	300 - 2000	70-200
Sal	120	50-300	
Toba		100-460	10-40
Yeso	250	100-400	10-25

Figura C.2: Valores típicos de ángulo de fricción y coeficiente de cohesión. Fuente: [González y otros \(2004\)](#) en [Muñoz \(2013\)](#)

Roca	Cohesión c (kp/cm ²)	Ángulo de fricción básico (°)
Andesita	280	45
Arenisca	80 - 350	30 - 50
Basalto	200 - 600	48 - 55
Caliza	50-400	35 - 50
Caliza Margosa	22190	30
Cuarcita	250 - 700	40-55
Diabasa	900 - 1200	40-50
Diorita	150	50-55
Dolomita	220 - 600	25-35
Esquisto	250	25-30
Gabro	300	35
Gneiss	150 - 400	30-40
Granito	150 - 500	45-58
Grauvaca	60 - 100	45-50
Mármol	150 - 350	35-45
Lutita	30 - 350	40-60
Pizarra	100 - 500	40-55
Toba	7	
Yeso		30

Anexo D

Rutinas Matlab.

```

function [x y z]=cartesianas(r,lat,lon)
%Función que transforma un vector en coordenadas geográficas a uno
%en coordenadas cartesianas
x=r.*cos(lat*pi/180).*cos(lon*pi/180);
y=r.*cos(lat*pi/180).*sin(lon*pi/180);4
z=r.*sin(lat*pi/180);

function [d]=dist(E,H)
%Función que entrega la distancia entre dos puntos que se encuentran
%en el plano cartesiano
d=sqrt((E(1)-H(1))^2 + (E(2)-H(2))^2 +(E(3)-H(3))^2);

function R=radio(lat)
%R=radio(lat);
%Función que entrega el radio terrestre de la Tierra correspondiente a una
%determinada latitud.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%lat es un vector con latitudes (°)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Se retorna el vector R con el radio correspondiente a cada latitud en km.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
RM=6378.137;
Rm=6356.752;
%semieje mayor y menor del elipsoide WGS-84
%Se calcula el radio terrestre correspondiente a cada latitud
n=length(lat);
for i=1:n
R(i)=sqrt((RM*cos(lat(i)*pi/180))^2+(Rm*sin(lat(i)*pi/180))^2);
end

function [xx yy zz]=rotacion(x,y,z,ang)
%[xx yy zz]=rotacion(x,y,z,ang)
%Función que realiza una rotación de los ejes cartesianos x-y-z con
%respecto al eje x, en un ángulo definido.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%x,y,z son vectores con las coordenadas cartesianas de una serie de puntos.
%ang (°) es el ángulo de rotación
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Se retornan los vectores xx,yy,zz que corresponden a la rotación de x,y,z.
%Rotación de las coordenadas de los puntos a través de la matriz de
%transformación A.
ang=ang*pi/180;
v=[x';y';z'];
A=[1,0,0;0,sin(ang),cos(ang);0,-cos(ang),sin(ang)];
vv=A*v;
%Asignación de variables de salida
xx=vv(1,:);

```

```

yy=vv(2,:)';
zz=vv(3,:)';

%[d]=ruptura3D(superficie, RMubicacion);
%Función que grafica el área de ruptura asociada a las ubicaciones geográficas de
%matriz datos. Además entrega la menor distancia desde cada estación de registro,
%la contenida en la matriz est, hasta el área de ruptura calculada.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%superficiefalla debe ser una matriz con las siguientes columnas:
%col1 lat (°)
%col2 long(°)
%col3 Profundidad (km)
%La primera fila de la matriz datos debe corresponder a la ubicación del
%hipocentro del evento estudiado.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%RMubicacion debe ser una matriz con las siguientes columnas:
% col1 latitud RM (°)
% col2 longitud RM (°)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Se retorna la menor distancia a la ruptura d.
%Cargar los archivos
load superficiefalla
load RMubicacion
%Traspaso de los puntos a coordenadas cartesianas(matriz datos)
lat1=superficiefalla(:,1)/1000;
long1=superficiefalla(:,2)/1000;
prof1=superficiefalla(:,3)/1000;
r1=radio(lat1)'+prof1;
[x1 y1 z1]=cartesianas(r1,lat1,long1);
%Rotación de los ejes cartesianos matriz datos
ang=lat1(1);
[x1 y1 z1]=rotacion(x1,y1,z1,ang);
%Cálculo de la grilla de la superficie de ruptura(XI,YI)
paso=2;
xmin=min(x1);
ymin=min(y1);
xmax=max(x1);
ymax=max(y1);
tx1=xmin:paso:xmax;
ty1=ymin:paso:ymax;
[XI,YI] = meshgrid(tx1,ty1);
%Modelo del área de ruptura usando interpolacion cubica
ZI2=griddata(x1,y1,z1,XI,YI,'cubic');
metodo2=' Método 2: Interpolación Cúbica';
%Traspaso a coordenadas cartesianas de estaciones
lat3=RMubicacion(:,1)/1000;
long3=RMubicacion(:,2)/1000;

```

```

prof3=RMubicacion(:,3)/1000;
r3=radio(lat3)';
[x3 y3 z3]=cartesianas(r3,lat3,long3);
%Rotación de los ejes cartesianos estaciones
[x3 y3 z3]=rotacion(x3,y3,z3,ang);
%Cálculo de la menor distancia desde cada estación hasta la superficie de ruptura
d2=[];
ne=length(lat3);
for e=1:ne
P1=[x3(e),y3(e),z3(e)];
[n,m]=size(XI);
de2=[];
for i=1:n
for j=1:m
P22=[XI(i,j);YI(i,j);ZI2(i,j)];
de2=[de2;dist(P1,P22)];
end
end
d2=[d2;min(de2)];
d=[d2];
save d2
end

```