



SECRETARÍA REGIONAL MINISTERIAL DE VIVIENDA Y URBANISMO
REGIÓN DEL MAULE

PLAN REGULADOR COMUNAL DE MAULE

ANEXO N° 1 ESTUDIO DE RIESGOS

El presente documento integra el PRC de
Maule promulgado:
Resolución (A) N° 14 de 05.02.2019
Gobierno Regional del Maule.
Fecha Toma Razón CGR: 05.07.2019

Consultor: *Infracon S.A.*

PLAN REGULADOR COMUNAL DE MAULE

ESTUDIO DE RIESGOS



RODRIGO RAULD P.
GEÓLOGO
UNIVERSIDAD DE CHILE

“ESTUDIO DE RIESGOS MAULE”

El presente documento corresponde a la ETAPA N°3: ANÁLISIS Y ZONIFICACIÓN DE PELIGROS GEOLÓGICOS, encargado por la Secretaría Regional Ministerial de Vivienda y Urbanismo Región del Maule a Infracon S.A.

EQUIPO CONSULTOR:

Rodrigo Rauld Plott, Geólogo
Andrés Fock Kunstmann, Geólogo, MSc en Ciencias, Mención Geología
Constanza Urresty Vargas, Geóloga
Marilyna Peñalva, Geóloga, MSc en Riesgo Geológico y Meteorológico

CONTRAPARTE TÉCNICA:

SEREMI de Vivienda y Urbanismo, Región del Maule

Consultor: **Infracon S.A.**

RESUMEN

En el marco de la actualización del Plan Regulador Comunal de Maule, se ha revisado una serie de antecedentes proporcionados por el mandante y otros estudios científicos, incorporando información posterior al sismo del 27/02/2010 y complementando con observaciones de terreno. Todo esto realizado en el área interior al límite urbano de la localidad de Maule y el sector Culenar-Chacarillas.

En este estudio se evaluó la ocurrencia de los procesos geológicos internos de la tierra (endógenos), que incluyen sismicidad y volcanismo, y los procesos geológicos externos (exógenos) que corresponden a inundaciones y remociones en masa. Para esto se realizó una línea base geológica y geomorfológica (a escala 1:5.000), una visita a terreno, un catastro de peligros histórico a partir de publicaciones científicas, y analizando los factores condicionantes y desencadenantes de los peligros analizados. A partir de esta información se generaron mapas de susceptibilidad para cada uno de los peligros zonificables a escala 1:5.000.

Debido a que la comuna de Maule está ubicada sobre el área de ruptura del sismo del 27 de febrero de 2010, no se espera que se produzca un terremoto de subducción de magnitud $M_w > 8$ con ruptura frente a la latitud de Maule en los próximos 100 años. Sin embargo, la zona puede encontrarse dentro del área de influencia de terremotos cuyas zonas de ruptura se ubiquen más al norte o más al sur, o verse afectada por sismos superficiales asociados a zonas de falla no mapeadas o reconocidas.

Por otro lado, el área de estudio está ubicada a más de 90 km de distancia del arco volcánico actual, por lo que no está influenciada directamente por el peligro volcánico de coladas de lava. Sin embargo, el peligro asociado a volcanismo que más probablemente puede afectar el área de estudio es la caída de tefra producto de la erupción de alguno de los volcanes activos ubicados entre los 33° y los 40°S, así como el encauzamiento de lahares producidos por la erupción volcánica.

Se reconocieron además, los peligros de deslizamientos y caída de bloques. Se determinó que la ocurrencia de estos peligros es en zonas de altas pendientes, y se encuentran asociados principalmente a los intensos procesos de meteorización que presentan los materiales geológicos del área. Esta situación puede verse intensificada producto de la acelerada intervención antrópica de las laderas.

Los peligros de inundación por desborde de cauces naturales se asocian a los esteros y quebradas que drenan hacia el río Claro y Maule. Peligros de Anegamiento se reconocen en sectores deprimidos, algunos de origen natural y otros de origen antrópico. Se consideró además, el peligro de inundación por desborde de canales artificiales. Pese a que este fenómeno no constituye un peligro geológico en sentido estricto, se recomienda que sea considerado al momento de establecer la zonificación urbana, ya que es un proceso que genera inundaciones de frecuencia anual, con daños a viviendas asociados. Además, la presencia de canales artificiales generan suelos saturados en agua en su cauce y los sectores aledaños, dando origen a suelos con un mal comportamiento geotécnico, tal como quedó demostrado para el terremoto del 27 de febrero del 2010, donde la mayor parte de los daños a viviendas se registraron en los sectores aledaños a canales artificiales.

Las principales recomendaciones de este estudio son: implementar un sistema de alerta temprana y planes de evacuación ante eventos de precipitaciones intensas que puedan generar inundaciones; controlar el escurrimiento de aguas superficiales, su interceptación, captación, conducción y descarga controlada hacia cauces establecidos, garantizando que tengan un diseño adecuado. Se recomienda, además, zonificar como no edificables los sectores ubicados sobre zonas de susceptibilidad muy alta y alta de generación de deslizamientos y caída de bloques y las zonas de susceptibilidad alta de alcance de estos fenómenos, además de capacitar a la población con respecto a los peligros geológicos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	6
1.1	Ubicación Área de Estudio	6
1.2	Objetivos	6
1.3	Alcance y limitaciones	8
1.4	Marco Jurídico	8
1.5	Aspectos Metodológicos	9
1.5.1	Elaboración de la línea de base geológica y geomorfológica	10
1.5.2	Visita técnica al área de estudio	10
1.5.3	Catastro de información relevante para los Peligros Geológicos en el área de estudio	13
2	MARCO CONCEPTUAL	15
2.1	Peligros Geológicos en Chile	15
2.2	Conceptos de Susceptibilidad, Peligros Geológicos y Riesgo	16
3	MARCO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO	18
3.1	Marco Geodinámico	18
3.2	Marco Geomorfológico	19
3.3	Marco Geológico	21
3.3.1	Unidades de Roca	21
3.3.2	Depósitos No Consolidados	27
4	DESCRIPCIÓN Y CATASTRO DE INFORMACIÓN HISTÓRICA Y PREHISTÓRICA DE LOS PELIGROS GEOLÓGICOS ANALIZADOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	29
4.1	Procesos Internos o Endógenos de la Tierra – SISMICIDAD	29
4.1.1	Descripción del Peligro Geológico	29
4.1.2	Resultados del Catastro de Información Histórica de Sismicidad	35
4.1.3	Antecedentes Actuales de Sismicidad en el área de estudio	42
4.1.4	Fallas inactivas, potencialmente activas y activas	44
4.2	Procesos Internos o Endógenos de la Tierra – VOLCANISMO	44
4.2.1	Descripción del Peligro Geológico	44
4.2.1	Resultados del Catastro de Información Histórica de Volcanismo	48
4.3	Procesos Exógenos o Externos de la Tierra - INUNDACIONES	51
4.3.1	Descripción del Peligro Geológico	51
4.3.2	Resultados del Catastro de Información Histórica de Inundaciones	55
4.4	Procesos Externos o Exógenos de la Tierra – REMOCIONES EN MASA	56
4.4.1	Descripción del Peligro Geológico	56

4.4.2	Resultados del Catastro de Información Histórica de Remociones en Masa	62
5	DIAGNÓSTICO Y ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS PELIGROS GEOLÓGICOS QUE PUEDEN AFECTAR EL ÁREA DE ESTUDIO	63
5.1	Peligros No Zonificables	63
5.1.1	Peligro Sísmico	63
5.1.2	Peligro Volcánico	63
5.2	Peligros Zonificables	66
5.2.1	Peligro de Inundaciones	66
5.2.2	Peligro de Remociones en Masa	70
6	SÍNTESIS DE LOS PELIGROS GEOLÓGICOS ANALIZADOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	74
7	RECOMENDACIONES	83
8	REFERENCIAS	86

INDICE DE FIGURAS

FIGURA N° 1-1	Ubicación del área de estudio	7
FIGURA N° 1-2	Puntos de control visita técnica del 30 de Marzo del 2011	12
FIGURA N° 2-1	Etapas de la evaluación de un evento geológico peligroso	17
FIGURA N° 3-1	Vista en 3D donde se representa el marco geodinámico, se aprecia la Dorsal de Juan Fernández y el lugar donde es subductada frente a los 33° S. La línea verde señala la fosa, lugar donde subducta la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, las flechas muestran las direcciones y velocidades de convergencia entre ambas placas.	19
FIGURA N° 3-2	Carta de elevaciones y principales unidades morfoestructurales en el área de estudio	20
FIGURA N° 3-3	Carta de elevaciones del área de estudio	22
FIGURA N° 3-4	Carta de pendientes para el área de estudio	23
FIGURA N° 3-5	Carta de exposición de ladera para el área de estudio	24
FIGURA N° 3-6	Mapa Geológico del área de Maule	25
FIGURA N° 3-7	Mapa Geológico del área de Culenar - Chacarillas	26
FIGURA N° 4-1	Sismicidad mundial entre los años 1980 y 1990, se representan en puntos rojos los epicentros con magnitud >5. Nótese como la sismicidad "ilumina" los límites de las placas tectónicas, dibujados en amarillo	29
FIGURA N° 4-2	Contexto geodinámico y margen de subducción de Chile	30
FIGURA N° 4-3	Tipos de sismos que ocurren en un margen de subducción. Explicación en el texto	31
FIGURA N° 4-4	Tipos de falla y esfuerzos asociados	32
FIGURA N° 4-5	Tipos de ondas sísmicas	33
FIGURA N° 4-6	Amplificación de la vibración generada por un terremoto	34
FIGURA N° 4-7	Terremotos de subducción históricos con magnitud estimada y calculada mayor a 7.2, y sus áreas de ruptura. En línea continua las zonas de ruptura bien identificadas, en línea discontinua las zonas de ruptura inferidas a partir de datos históricos	36

FIGURA N° 4-8 Mapa de intensidades reportadas producto del terremoto del 27 de febrero de 2010. La ubicación del epicentro está indicada en el mapa con una estrella. La comuna de Maule está indicada con un círculo rojo.....	42
FIGURA N° 4-9 Profundidad de todos los sismos ocurridos entre los 34° 30' y 36° 30' de latitud sur, desde el año 1973 a febrero de 2011	43
FIGURA N° 4-10 Sismos de magnitud > 5 ocurridos entre los 34° 30' y 36° 30' de latitud sur, desde el año 1973 a febrero de 2011	43
FIGURA N° 4-11 Peligros volcánicos asociados a la erupción de un volcán	46
FIGURA N° 4-12 Principales centros volcánicos y depósitos volcánicos entre los 33° S y 36° S	50
FIGURA N° 4-13 Mapa de Isopacas de erupción de 1.932 del Quizapu, donde se indica el espesor de ceniza acumulada asociado a la erupción en centímetros. BA Buenos Aires; BB Bahía Blanca; C Curicó; CN Concepción; GP General Pico; LP La Plata; MG Malargüe; MV Montevideo; MZ Mendoza; N Neuquén; Q Quintero; S Santiago; SR San Rafael; T Talca; V Valparaíso.....	51
FIGURA N° 4-14 Clasificación de los tipos de inundaciones	53
FIGURA N° 4-15 Áreas de Inundación y Período de Retorno (PR). Las líneas discontinuas azules muestran la cota de inundación, las flechas verdes y rojas son referenciales para indicar el ancho del área de inundación y los límites.....	54
FIGURA N° 4-16 Sectores donde comúnmente se registran inundaciones en el área urbana de la localidad de Maule	57
FIGURA N° 4-17 Clasificación de tipos de remoción en masa en relación al movimiento que lo origina y el material constituyente de la ladera	60
FIGURA N° 4-18 Ejemplos de deslizamientos. A. Deslizamiento Rotacional, B. Deslizamiento traslacional.....	61
FIGURA N° 5-1 Mapa de distribución de Peligros Volcánicos. Las líneas amarillas representan los límites comunales	65
FIGURA N° 5-2 Zonas de susceptibilidad de inundaciones para la localidad de Maule.....	68
FIGURA N° 5-3 Zonas de susceptibilidad de inundaciones para el sector Culenar-Chacarillas	69
FIGURA N° 5-4 Frecuencia de deslizamientos en función de la pendiente del terreno.	71
FIGURA N° 5-5 Zonas de susceptibilidad de deslizamientos y caída de bloques para la localidad de Maule	72
FIGURA N° 5-6 Zonas de susceptibilidad de deslizamientos y caída de bloques para el sector Culenar-Chacarillas.....	73
FIGURA N° 6-1 Zonas susceptibles a ser afectadas por los peligros geológicos reconocidos en el área urbana de Maule y zonificables a escala local	81
FIGURA N° 6-2 Zonas susceptibles a ser afectadas por los peligros geológicos reconocidos en el área urbana del sector Culenar-Chacarillas y zonificables a escala local.....	82

INDICE DE CUADROS

CUADRO N° 4-1 Peligros asociados al volcanismo	47
CUADRO N° 4-2 Principales volcanes en sectores cercanos al área de estudio.....	48
CUADRO N° 6-1 Síntesis de peligro sísmico para el área de estudio, descripción, catastro, metodología y zonificación.....	75
CUADRO N° 6-2 Síntesis de peligro volcánico para el área de estudio, descripción, catastro, metodología y zonificación.....	76

CUADRO N° 6-3 Síntesis de peligro de inundaciones para el área de estudio, descripción, catastro, metodología y zonificación	78
CUADRO N° 6-4 Síntesis de peligro de deslizamientos y caída de rocas para el área de estudio, descripción, catastro, metodología y zonificación	80
CUADRO N° 7-1 Resumen de Peligros Geológicos del área urbana de la Comuna de Maule y Criterios utilizados para definir la zonificación de susceptibilidad y la zonificación urbana propuesta para cada caso.....	85

INDICE DE MAPAS FUERA DE TEXTO

PLANO N° 1: Mapa Geológico del Área Urbana de la localidad de Maule, escala 1:5.000	
PLANO N° 2: Mapa Geológico del Área Urbana del sector Culenar-Chacarillas, escala 1:7.500	
PLANO N° 3: Mapa Síntesis de Peligros Geológicos del Área Urbana de la localidad de Maule, escala 1:5.000.	
PLANO N° 4: Mapa Síntesis de Peligros Geológicos del Área Urbana del sector Culenar-Chacarillas, escala 1:7.500.	

1 INTRODUCCIÓN

El Ministerio de Vivienda y Urbanismo, a través de la Secretaría Regional Ministerial de Vivienda y Urbanismo de la Región del Maule (SEREMI MINVU VII Región), solicitó la realización de un estudio de riesgos geológicos, con el objetivo de reunir información para la toma de decisión con respecto al uso del territorio en la comuna de Maule.

A raíz del sismo que afectó a nuestro país el 27 de Febrero de 2010, se decidió realizar nuevamente un estudio de riesgos geológicos para determinar cuáles son las áreas vulnerables a ser consideradas en la modificación del Plan Regulador Comunal de Maule. Como consecuencia, la SEREMI del Ministerio de Vivienda y Urbanismo solicitó la elaboración de un informe técnico que permita disponer de un Estudio fundado de Riesgos en las zonas urbanas de la comuna de Maule. Este estudio delimita las áreas de riesgos que han de ser incorporadas y/o adecuadas en la modificación del Plan Regulador Comunal de Maule, con el objetivo de enfrentar la reconstrucción y mitigar los eventuales riesgos naturales en la zona de estudio, de acuerdo a lo señalado por el artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones.

1.1 Ubicación Área de Estudio

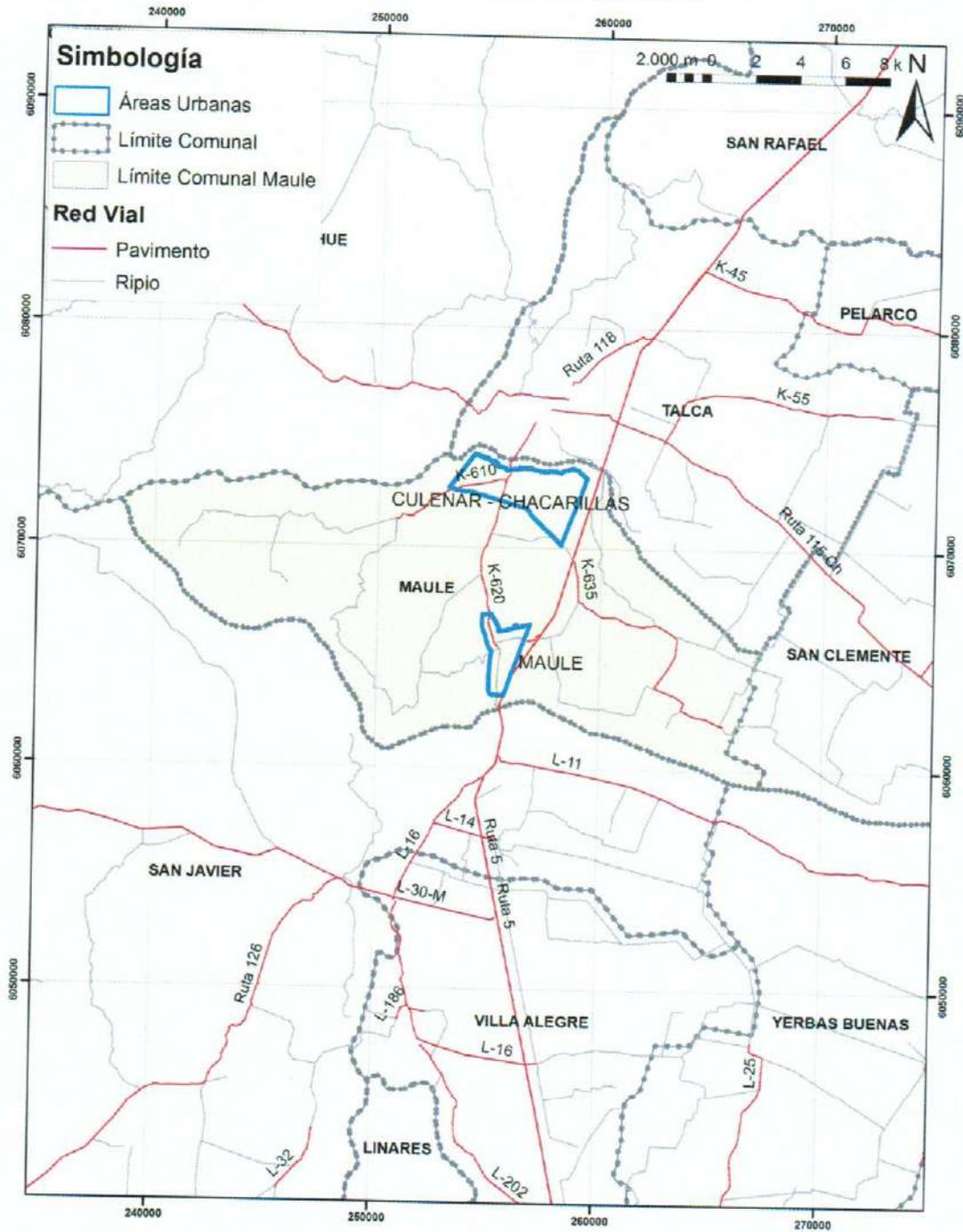
La comuna de Maule está ubicada en la provincia de Talca, entre los 35°26' y los 35°34' Latitud Sur y los 71°33' y 71°53' de Longitud Oeste en la VII Región del Maule. En su límite noroccidental colinda con la comuna de San Javier, mientras que por el norte limita con la comuna de Talca. En el sector oriental limita con las comunas de San Clemente, y la parte sur de la comuna bordea a la comuna de San Javier. El área de estudio del presente trabajo corresponde a los sectores urbanos de Maule, capital de la comuna, y el sector de Culenar - Chacarillas, ubicado en el límite norte de la comuna, próximo la ciudad de Talca. (FIGURA N° 1-1).

Los principales accesos al área de estudio corresponden a la ruta 5 Sur, que conecta a los principales poblados ubicados en la Depresión Central, y la ruta K-620 que une las ciudades de Talca y Maule.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es reconocer y delimitar las áreas de riesgos que han de ser incorporadas y/o adecuadas en la modificación del Plan Regulador Comunal de Maule, con la finalidad de enfrentar la reconstrucción y mitigar los eventuales riesgos naturales en la zona de estudio, de acuerdo a lo señalado por el artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, generando un estudio fundado de Riesgos Geológicos en los sectores urbanos de la comuna de Maule.

FIGURA Nº 1-1 Ubicación del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

Dentro de este estudio, como productos, deberán elaborarse cartas de peligro por efectos de terremotos, inundaciones causadas por desbordes de ríos y activación de líneas de quebradas,

remoción en masa -en sus diferentes manifestaciones- (aluviones, derrumbes de rocas, deslizamiento de tierra, licuefacción de suelos u otros relevantes).

El objetivo específico de esta etapa del proyecto consiste en la elaboración de un catastro, descripción y reconocimiento de los principales peligros geológicos que pueden afectar al área de estudio, así como sus factores condicionantes y detonantes.

1.3 Alcance y limitaciones

Para esta etapa del trabajo se realizó una compilación de referencias bibliográficas, antecedentes históricos, revisión de fotografías aéreas, visitas a terreno y la evaluación de los distintos factores condicionantes para zonificar las áreas susceptibles a ser afectadas por un peligro geológico, a una escala 1:5.000 (considerando que la gran mayoría de la información geológica está a una escala mayor a 1:1.000.000). Se debe destacar que los resultados de este trabajo no deberían ser utilizados a una escala más detallada que la de referencia, ya que esto podría llevar a errores en la planificación territorial.

Por otro lado, no se llevo a cabo ningún análisis riguroso de períodos de retorno (peligrosidad) o de consideraciones socio-económicas (riesgo), por lo que los mapas entregados corresponden a mapas de susceptibilidad y de factores condicionantes.

El resultado de este estudio corresponde a mapas de factores condicionantes, principalmente morfológicos y geológicos y mapas inventarios. A partir del análisis de los anteriores, se generaron mapas de susceptibilidad para cada uno de los peligros geológicos reconocidos en la zona a escala 1:5.000.

1.4 Marco Jurídico

La Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (OGUC), en su apartado 2.1.17 "Disposiciones complementarias" indica que: "En los planes reguladores podrán definirse áreas restringidas al desarrollo urbano, por constituir un riesgo potencial para los asentamientos humanos. Dichas áreas, se denominarán "zonas no edificables" o bien, "áreas de riesgo", según sea el caso, como se indica a continuación:

Por "zonas no edificables", se entenderán aquéllas que por su especial naturaleza y ubicación no son susceptibles de edificación, en virtud de lo preceptuado en el inciso primero del artículo 60° de la Ley General de Urbanismo y Construcciones. En estas áreas sólo se aceptará la ubicación de actividades transitorias.

Por "áreas de riesgo", se entenderán aquellos territorios en los cuales, previo estudio fundado, se limite determinado tipo de construcciones por razones de seguridad contra desastres naturales u otros semejantes, que requieran para su utilización la incorporación de obras de ingeniería o de otra índole, suficientes para subsanar o mitigar tales efectos. En el marco de este informe, "áreas de riesgo" son definidas como las zonas susceptibles a ser afectadas por un peligro geológico.

De acuerdo a la OGUC, las "áreas de riesgo" se determinarán en base a las siguientes características:

1. Zonas inundables o potencialmente inundables, debido entre otras causas a maremotos o tsunamis, a la proximidad de lagos, ríos, esteros, quebradas, cursos de agua no canalizados, napas freáticas o pantanos.

De acuerdo a las definiciones utilizadas en este informe, corresponde a los peligros geológicos de inundación, ya sea continental o costera. Este tópico se explica conceptualmente en el capítulo 4.3 "Procesos Exógenos o Externos de la Tierra - INUNDACIONES" y el diagnóstico de estos peligros en el área de estudio es presentada en el capítulo 4.3.2 "Resultados del Catastro de Información Histórica de Inundaciones".

2. Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas.

Corresponde a los peligros geológicos de remociones en masa, caída de bloques y flujos de barro y detritos. Estos se explican conceptualmente en el capítulo 4.4 "Procesos Externos o Exógenos de la Tierra – REMOCIONES EN MASA". El diagnóstico de estos peligros en el área de estudio se presenta en el capítulo 4.4.2 "Resultados del Catastro de Información Histórica de Remociones en Masa".

3. Zonas con riesgo de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas.

Dentro de este apartado definido por la OGUC se analizan conceptualmente los procesos endógenos internos de la tierra, descritos en los capítulos 4.1 "Procesos Internos o Endógenos de la Tierra – SISMICIDAD" y 4.2 "Procesos Internos o Endógenos de la Tierra – VOLCANISMO". El diagnóstico y zonificación de estos peligros en el área de estudio se presenta en los capítulos 4.1.2 "Resultados del Catastro de Información Histórica de Sismicidad" y 4.2.1 "Resultados del Catastro de Información Histórica de Volcanismo".

Para autorizar proyectos a emplazarse en áreas de riesgo, se requerirá que se acompañe a la respectiva solicitud de permiso de edificación un estudio fundado, elaborado por profesional especialista y aprobado por el organismo competente, que determine las acciones que deberán ejecutarse para su utilización, incluida la Evaluación de Impacto Ambiental correspondiente conforme a la Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, cuando corresponda".

1.5 Aspectos Metodológicos

El objetivo del Estudio de Riesgos de Maule es generar mapas de susceptibilidad para las áreas urbanas de Maule, Culenar y Chacarillas.

Como parte del proceso para generar los mapas de susceptibilidad para un peligro geológico dado, se realizaron las siguientes tareas durante el desarrollo de la etapa de recopilación de información:

1. Elaboración de una línea de base geológica y geomorfológica: El objetivo de este punto es identificar los distintos depósitos sedimentarios producto de procesos de remoción en masa e inundaciones, esto es, depósitos aluviales activos e inactivos, depósitos fluviales activos e inactivos, depósitos coluviales y las zonas de generación de coluvio.

2. Visitas técnicas de terreno al área de estudio.

3. Catastro de Peligros Geológicos Históricos: En esta tarea se recopilaron los distintos peligros geológicos que han afectado los sectores urbanos de la comuna de Maule, con la finalidad de identificarlos y ordenarlos cronológicamente.
4. Catastro de Factores Condicionantes: se reunió información acerca de los factores intrínsecos (propios del medio físico) que condicionan la ocurrencia de un peligro geológico.
5. Estudio de Factores Desencadenantes: se reunió información histórica acerca de los factores gatillantes de un peligro geológico dado, con el objetivo de realizar una estimación preliminar de la recurrencia de un evento a través de métodos estadísticos.

A continuación se detalla la metodología utilizada para la elaboración de cada uno de los puntos nombrados previamente.

1.5.1 Elaboración de la línea de base geológica y geomorfológica

La caracterización geológica y geomorfológica se realizó simultáneamente. Para el área de estudio, no existen trabajos geológicos de detalle, siendo las únicas fuente de información geológica, el trabajo de Varela y Moreno (1982), la Hoja Hidrogeológica de Talca, a escala 1:100.000 (Hauser, 1995) y el mapa geológico de Chile a escala 1:1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2002). Esta información se aumentó a una escala adecuada a partir de visitas a terreno, interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales. Los mapas geológico y geomorfológico producidos para el área urbana son de 1:5.000. Para obtener estos mapas la escala de trabajo fue de 1:2.500.

La interpretación de fotografías aéreas e imágenes satélites permitió delimitar los principales contactos entre el basamento rocoso y depósitos no consolidados, tales como depósitos fluvio-aluviales activos, depósitos fluviales activos, depósitos depósitos coluviales. Además se identificaron las principales zonas de generación de material coluvial y las terrazas fluviales de los principales cauces ubicados en el área de estudio.

Simultáneamente, se construyó un Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés). El DEM corresponde a una matriz que contiene la información topográfica básica (elevación) que permite estimar los parámetros morfométricos utilizando Sistemas de Información Geográficos. Los parámetros morfométricos analizados son: cartas de pendiente, exposición de ladera, curvatura y relieve sombreado. Estos mapas fueron utilizados como apoyo para la identificación de los principales depósitos no consolidados y son considerados un factor condicionante para la elaboración de mapas de susceptibilidad.

Para las áreas urbanas de Maule y Culenar- Chacarillas no se contó con la restitución completa de la cartografía del Plan Regulador Comunal previo, por lo que, en las zonas sin información se utilizó el modelo de elevación ASTER GDEM que cubre todo el área de estudio.

1.5.2 Visita técnica al área de estudio

Durante esta etapa, se realizó una visita técnica en el área de estudio, con énfasis en los siguientes objetivos:

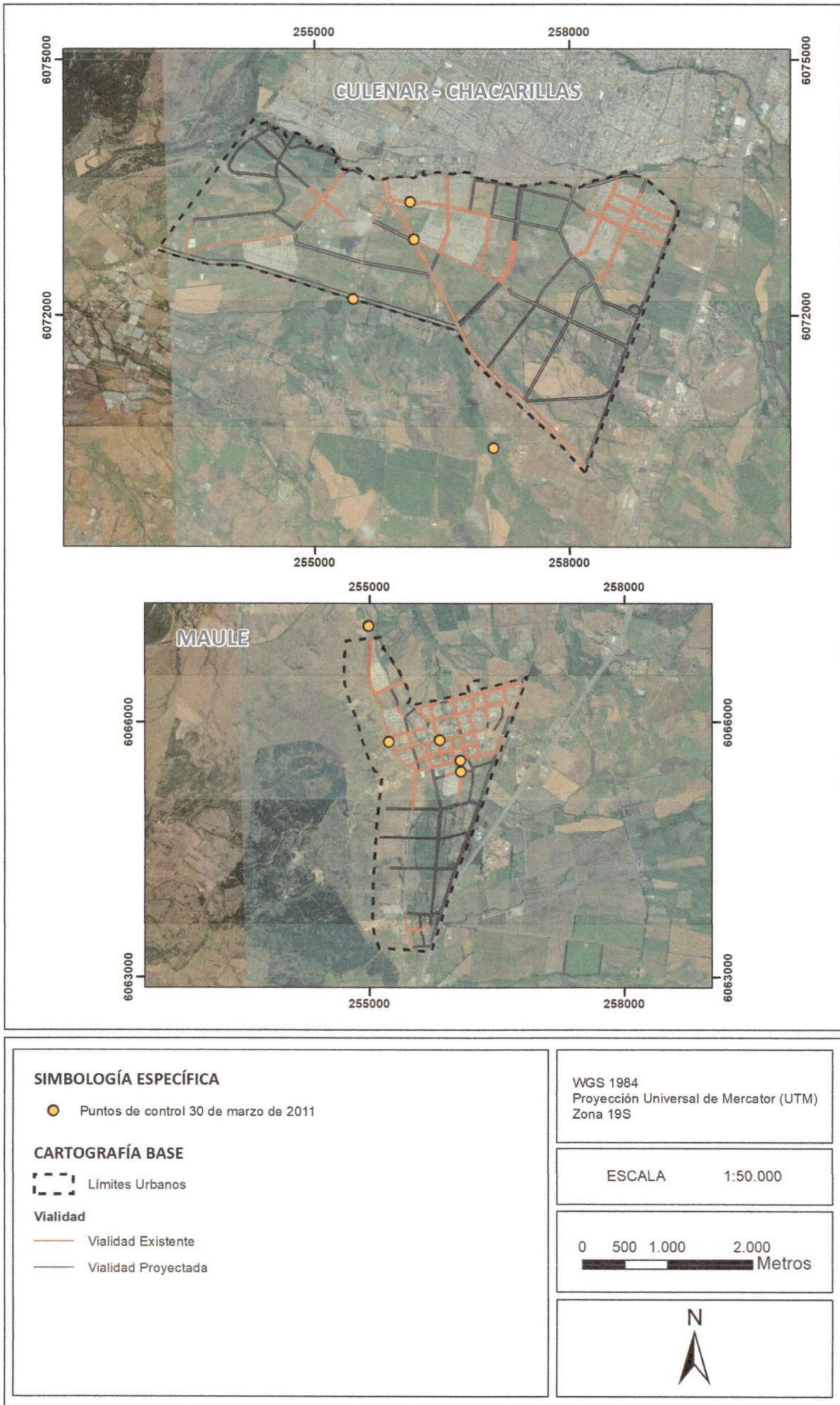
1. Complementar y afinar la cartografía geológica existente, con particular detalle de las unidades geológicas más recientes.
2. Identificar los peligros geológicos reconocidos en el área.
3. Complementar y validar la información obtenida en la recopilación bibliográfica
4. Revisar la interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales realizada.
5. Reconocer y caracterizar los depósitos de remociones en masa.

La salida a terreno se realizó el 30 de marzo de 2011, en compañía de personal de la SEREMI del Ministerio de Vivienda y Urbanismo de la VII Región, con el objetivo de identificar los principales problemas que afectan al área de estudio y presentar al equipo de trabajo del proyecto. Durante esta visita se sostuvo una reunión con personal de la Dirección de Obras de la Municipalidad de Maule y se recorrieron los sectores urbanos de la comuna, identificando sectores susceptibles de ser afectados por remociones en masa e inundaciones de cauces naturales y artificiales (canales), entre otros peligros geológicos.

Si bien los desbordes de canales artificiales no constituyen un peligro geológico en sentido estricto, si fueron considerados en este estudio. Esto debido a que personal de la Dirección de Obras de la Municipalidad informó que los desbordes de canales son uno de los problemas más frecuentes y que mayores daños causan en la comuna.

Los puntos controlados durante la visita técnica al área de estudio se encuentran ubicados en la FIGURA N° 1-2.

FIGURA Nº 1-2 Puntos de control visita técnica del 30 de Marzo del 2011



Fuente: Elaboración propia

1.5.3 Catastro de información relevante para los Peligros Geológicos en el área de estudio

A partir de una revisión bibliográfica y mapeo geológico se creó el catastro de peligros geológicos.

1.5.3.1 Revisión histórica y bibliográfica

Se realizó una revisión metódica de los eventos geológicos que eventualmente signifiquen un peligro para la zona de estudio, estos son:

1. Actividad volcánica
2. Actividad sísmica
3. Inundaciones
4. Remociones en masa.

Esto con el objetivo de cuantificar y calificar la distribución temporal y espacial de dichos sucesos y así, con el factor histórico, acotar mejor las probabilidades de la ocurrencia de un suceso en un intervalo de tiempo y espacio determinados.

Para dicho efecto se revisaron los antecedentes históricos de publicaciones científicas. El trabajo de Ortlieb (1994) muestra que hay cierta correlación entre los años más lluviosos en Chile Central y los eventos ENSO (El Niño Southern Oscillation) de intensidad fuerte (F) a muy fuerte (MF++). La información recolectada es complementada con los trabajos científicos de Urrutia et al. (1993), González-Ferrán (1995), Hildreth y Drake (1991) y Sruoga (2002).

Con respecto a los eventos de remoción en masa, se admite que estos ocurren con mayor frecuencia asociados a eventos sísmicos, volcánicos o producidos por altas intensidades de precipitaciones. Considerando lo anterior, se recopiló datos de los procesos de remoción en masa a partir de la revisión bibliográfica de los eventos generadores.

Para los eventos volcánicos se revisaron las fechas de registro de actividad (Urrutia y Lanza, 1993 y González-Ferrán, 1995). Los centros eruptivos que se abarcan en la revisión histórica son los volcanes Tupungatito, Maipo y San José ubicados en la Región Metropolitana, los volcanes El Palomo y Tinguiririca de la VI Región y los volcanes Quizapu, Peteroa y Descabezado en la VII Región. De estos, solo se cuenta con registro de actividad desde el siglo XVI en los volcanes Peteroa, San José, Quizapu, Planchón y Descabezado Grande (Urrutia y Lanza, 1993).

La generación del catastro de eventos sísmicos se realizó en base a recopilaciones históricas y de publicaciones científicas (Nishenko, 1985; Comte *et al.*, 1986; Comte y Pardo, 1991; Comte *et al.*, 2002; Lara y Rauld, 2003; Urrutia y Lanza, 1993). La base de datos de sismos utilizada para las representar los sismos históricos de la región es del National Earthquake Information Center (NEIC) del United States Geological Survey (USGS)*. Esta base de datos corresponde a los sismos

* Disponible en línea en: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/>

registrados en todo el mundo con los instrumentos de dicha institución, e instituciones asociadas, a partir del año 1973. El error asociado a dichos datos es del orden de 50 km, pero dada la cantidad de datos y la extensión temporal de su registro resulta útil para representar la sismicidad a escala regional.

1.5.3.2 Análisis e interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales

Con el fin de identificar evidencias de peligros geológicos declarados, es decir peligros geológicos que en el pasado ya se han manifestado en el área de estudio, se realizó un análisis de fotografías aéreas e imágenes satelitales. Para este análisis se revisaron las imágenes publicadas por Google Earth y Bing Maps.

Este análisis, además de apoyar el mapeo geológico y geomorfológico, permitió identificar una serie de rasgos, tales como depósitos de remociones en masa y de procesos fluviales, los cuales se encuentran detallados en el Capítulo 3.3.2 "Depósitos No Consolidados". Estos elementos evidencian que el área de estudio ha sido afectada por procesos de remoción en masa en el pasado, y además, permiten deducir algunas características y factores desencadenantes de estos fenómenos, información que fue utilizada para la estimación y modelado del alcance de estos procesos.

1.5.3.3 Catastro de Factores Condicionantes y Desencadenantes

Con el objetivo de determinar las áreas más susceptibles, se recopiló una serie de mapas de factores considerados condicionantes para la ocurrencia de un peligro geológico dado. Dentro de estos se encuentran:

1. Elevación, pendiente, curvatura y dirección de drenaje de la ladera (exposición) para la comuna de Maule: Generados a partir del modelo de elevación ASTER GDEM, con una resolución espacial de 30 metros por pixel.
2. Elevación, pendiente, curvatura y dirección de drenaje de la ladera (exposición): Fueron elaborados a partir del DEM de celdas de 1 metro creado con las curvas de nivel cada 2 metros.
3. Litología: Corresponden a la hoja hidrogeológica de Talca (Hauser, 1995) y al mapa geológico de Chile (SERNAGEOMIN, 2003) modificados en este trabajo.

Con respecto a los factores desencadenantes, se catastraron los registros sísmicos y erupciones volcánicas que se han reportado en el área de estudio.

2 MARCO CONCEPTUAL

2.1 Peligros Geológicos en Chile

Chile, a lo largo de su historia, ha sido afectado por las más diversas catástrofes naturales. Prueba de ello son los numerosos mitos y leyendas aborígenes, donde se describen fenómenos naturales violentos. Estos desastres han impactado negativamente en la economía del país causando severos trastornos durante su desarrollo (Urrutia y Lanza, 1993).

La diversa geografía de Chile es producto de procesos geodinámicos tanto internos (endógenos) como externos (exógenos) de la tierra. Los procesos **endógenos** están determinados por la subducción de las placas Nazca y Antártica por debajo de la Sudamericana a lo largo de toda la línea de costa, lo que produce una gran actividad sísmica y volcánica (Uyeda y Kanamori, 1979, Mpodozis y Ramos, 1989, González-Ferrán, 1995). El resultado directo de la subducción son áreas montañosas que componen un 80% del paisaje. Esto reviste especial importancia pues las características orográficas constituyen factores de base de la mayoría de las amenazas naturales de nuestro país.

Por otra parte, los procesos **exógenos** están determinados por la diferencia latitudinal, la exposición de las grandes vertientes estructurales de la cordillera de Los Andes y de La Costa, el Fenómeno del Niño, la corriente de Humboldt y el anticiclón del Pacífico los cuales se combinan originando una complejidad climática que tiene una incidencia significativa en la generación de las catástrofes naturales que ocurren en Chile.

Desde el punto de vista humano, la localización de centros poblados bajo una escasa o nula planificación territorial estratégica que considere los riesgos naturales es una problemática vigente. Desde el punto de vista del potencial de organización para enfrentar los riesgos naturales, son escasas las oportunidades en que por iniciativa propia se hayan constituido Comités de Emergencia de pobladores, más bien, es el gobierno local el que ha motivado su constitución. La población misma debiera ser la más importante gestora de su seguridad (Larraín y Simpson-Housley, 1994).

En Chile, año tras año se producen desastres naturales en todo el territorio nacional. Esta historia marcada por sucesivas catástrofes llevó a la creación en Marzo de 1974 de la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior, ONEMI, que corresponde a un organismo técnico del Estado a cargo de la protección civil. Desde su inicio, la ONEMI tuvo una labor más bien reactiva, accionando y coordinando mecanismos de emergencia y ayuda luego de la ocurrencia de algún desastre. Sin embargo, por la falta de directrices frente a las necesidades actuales, en Marzo del año 2002 se aprobó el nuevo Plan Nacional de Emergencia que, aunque avanza en materia de metodologías, conceptualización y manejo de las situaciones antes, durante y después de un evento, sigue delegando a las Intendencias, Gobernaciones y Municipalidades (a través de sus comités de emergencia) la elaboración de estudios sobre riesgo.

2.2 Conceptos de Susceptibilidad, Peligros Geológicos y Riesgo

Los procesos geodinámicos producen modificaciones de diversas magnitudes en la superficie terrestre que constituyen peligros geológicos que afectan de forma directa o indirecta las actividades humanas. La **previsión** de estos procesos que consiste en la identificación de áreas con mayor posibilidad de ser afectadas por eventos geológicos peligrosos, es imprescindible para adoptar medidas de **prevención** y reducir su impacto sobre las edificaciones y la población (Ogura y Soares Macedo, 2000). Asociados a los peligros geológicos se reconocen cuatro conceptos principales: susceptibilidad, vulnerabilidad, amenaza o peligrosidad (hazard) y riesgo (risk).

La **susceptibilidad** se define como la **posibilidad** de que una zona sea afectada por un determinado proceso, y se expresa a través de distintos grados cualitativos y relativos. Depende directamente de los factores que controlan o condicionan la ocurrencia de los procesos, que pueden ser intrínsecos de los materiales geológicos o controlados por un factor externo (precipitación, sismos, etc.). Para la construcción de mapas de susceptibilidad se utilizan los mapas de inventario, correspondientes a áreas que sufren o han sufrido determinados procesos, y mapas de factores condicionantes que favorecen o entorpecen el desarrollo de estos procesos. Además, los mapas de susceptibilidad apuntan a cubrir el peor escenario posible en el área de estudio.

Los distintos **elementos expuestos** (personas, infraestructura, actividades económicas) en zonas susceptibles son agrupados dentro del concepto de **vulnerabilidad**, que se define como el grado de daños o pérdidas potenciales como consecuencia de un fenómeno de una intensidad determinada.

El concepto de **amenaza o peligrosidad** (hazard*) corresponde a la **probabilidad de ocurrencia** de un proceso, con un nivel de intensidad determinado dentro de cierto período de tiempo y en un área específica. La estimación de la amenaza o peligrosidad implica necesariamente una consideración de la variable temporal, es decir, el período de recurrencia de un evento. Por otro lado, la amenaza para períodos de retorno infinitos tiende a ser similar que la susceptibilidad. Por lo anterior, y en consideración de que no se tienen datos suficientes para estimar períodos de retorno, se utilizarán mapas de susceptibilidad, que consideran solo las variables intrínsecas del material, para la zonificación de peligros geológicos.

Por otro lado, el concepto de **riesgo** (risk) se define como las potenciales pérdidas económicas (directas e indirectas) producto de la ocurrencia de un determinado fenómeno, en función de la amenaza determinada para una zona. En general el riesgo (R) se define como:

$$R = A \times C$$

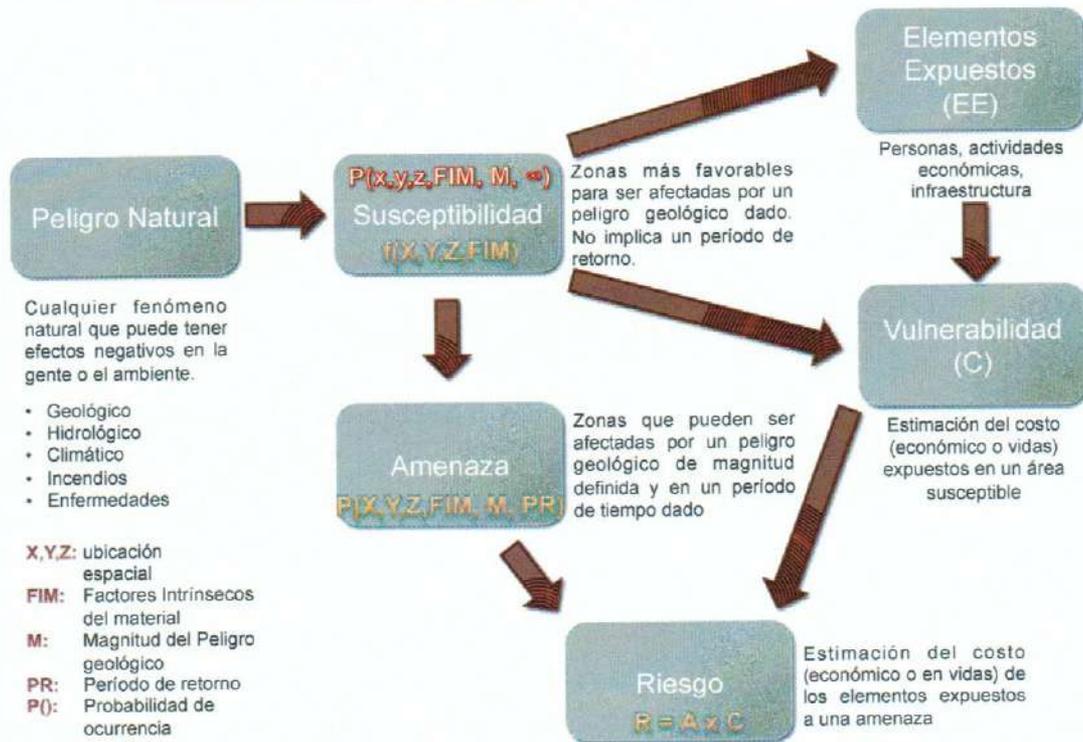
Donde A corresponde a la amenaza o peligrosidad (probabilidad de que ocurra un evento dado en un período de tiempo) y C corresponde al costo (ya sea en vidas, valoración económica, metros de caminos, etc). La FIGURA N° 2-1 muestra la relación entre el conocimiento y la estimación de la susceptibilidad, amenaza y riesgo.

* La traducción literal corresponde a peligro, pero de acuerdo a la ONEMI y al proyecto Multinacional de Geociencias Andino (MAP-GAC) para evitar confusiones se utiliza Amenaza o Peligrosidad

En resumen, los peligros geológicos pueden analizarse desde el punto de vista de las condiciones intrínsecas del material (estudios de susceptibilidad o determinísticos) y desde el punto de vista de los factores desencadenantes de un fenómeno (estudios de amenaza o probabilísticos). Considerando que para un estudio probabilístico es necesario contar con set de datos históricos de los procesos desencadenantes, los que normalmente no se encuentran registrados de manera adecuada, y que para períodos de retornos infinitos los mapas de amenaza tienden a ser similares a los mapas susceptibilidad, se considera que los mapas de susceptibilidad corresponden al escenario más conservador y a ser aplicado en la Planificación Territorial.

Finalmente, la **reducción y mitigación** de los riesgos vinculados a los diversos peligros geológicos presenta igual o mayor importancia que el manejo de las emergencias y la respuesta posterior al evento catastrófico. El desarrollo sustentable de la urbanización está directamente asociado a la reducción y mitigación de estos riesgos. La generación de conciencia a partir del conocimiento de los peligros y riesgos geológicos es fundamental para reducir y mitigar las consecuencias de estos eventos sobre la población (UN/ISDR, 2004).

FIGURA Nº 2-1 Etapas de la evaluación de un evento geológico peligroso



Fuente: Elaboración propia basado en Varnes (1984)

3 MARCO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO

3.1 Marco Geodinámico

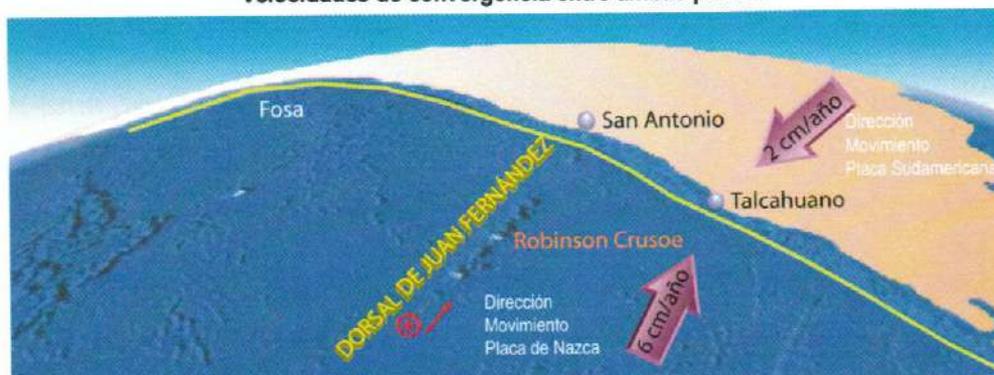
Chile se ubica en un margen convergente de placas tipo océano-continente (FIGURA N° 3-1), donde la Placa Oceánica de Nazca subducta a la Placa Continental Sudamericana bajo su margen occidental (Uyeda, 1979). Esta subducción, cuya tasa actual de convergencia se estima en 8 cm/año (Demets et al., 1994), se reconoce activa desde, al menos, el Jurásico (Mpodozis y Ramos, 1989) y ha tenido variaciones en la tasa de convergencia durante el Eoceno – Mioceno que van desde 5 a 15 cm/año (Somoza, 1998).

El segmento ubicado entre los 33° y los 46° S corresponde, dentro del esquema de segmentación andina de Mpodozis y Ramos (1989), a una zona de subducción tipo chilena que se caracteriza por un ángulo de subducción entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana de aproximadamente 30°. Este segmento se encuentra al sur del segmento ubicado entre los 27° S y los 33°, que se caracteriza por una subducción plana (~10°) y se encuentra aparentemente controlado por la subducción de la dorsal asísmica de Juan Fernández. Si se comparan ambos segmentos, se destacan las siguientes características:

4. La costa Oeste de la placa Sudamericana tiene un rumbo aproximado NS en el tramo de subducción plana, mientras que al sur de los 33° la costa posee un rumbo aproximado N20°E.
5. En el tramo norte, no se aprecia el desarrollo de una depresión central, en cambio se presentan valles transversales en el antearco. Por otro lado, en el segmento sur, se desarrolla claramente la Depresión Central, con una Cordillera de la Costa y Cordillera Principal bien definidas.
6. En el sector de subducción plana no hay registro de volcanismo Holoceno en la Cordillera Principal, mientras que en el área de estudio, el arco volcánico Holoceno se encuentra plenamente desarrollado.

La acumulación y posterior relajación de los esfuerzos producto del régimen de subducción es la causa de que todo Chile hasta la península de Taitao, sea afectado frecuentemente por terremotos. La gran mayoría de estos sismos y los eventos de magnitud, se originan en la zona del contacto entre placas y corresponden a la liberación súbita de la mayor parte de la energía acumulada durante el proceso de subducción (Ej. Sismos del 6 de abril de 1943 que afectó a la IV Región, 3 de Marzo de 1985 de la V región, sismos de Mayo de 1960 en Valdivia). Los esfuerzos causados por la subducción también se propagan hacia el interior de la placa continental, y se liberan mediante sismos superficiales, normalmente de menor magnitud pero más destructivos localmente. (Ej. Sismo de Las Melosas de 1958, Sismo de Chuzmisa de 2001). Otros sismos son provocados por la relajación de esfuerzos en la placa de Nazca una vez subductada, estos sismos pueden ser muy destructivos a pesar de no tener las mayores magnitudes (Ej. Sismo de Chillán de 1939, sismo de Punitaqui de 1997 y sismo de Tarapacá 2005).

FIGURA N° 3-1 Vista en 3D donde se representa el marco geodinámico, se aprecia la Dorsal de Juan Fernández y el lugar donde es subductada frente a los 33° S. La línea verde señala la fosa, lugar donde subducta la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, las flechas muestran las direcciones y velocidades de convergencia entre ambas placas.



FUENTE: Elaboración propia.

3.2 Marco Geomorfológico

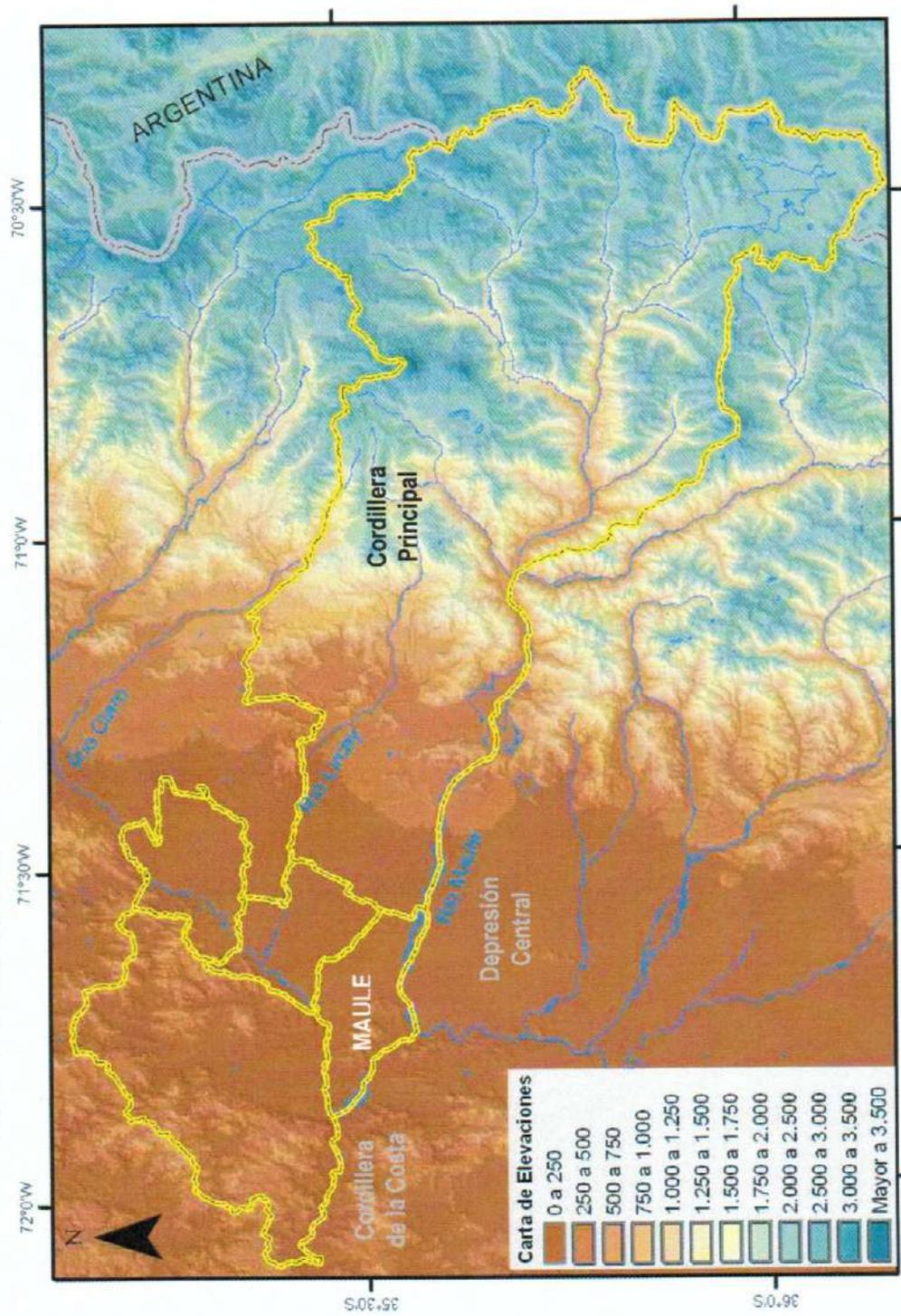
El segmento andino chileno al sur de los 33° S, muestra 4 unidades morfoestructurales principales (FIGURA N° 3-2), dispuestas en franjas orientadas norte – sur. De oeste a este estas son: Planicies Litorales, Cordillera de la Costa, Depresión Central, Cordillera Principal (que comparten Chile y Argentina). En el área de estudio las principales morfoestructuras corresponden a la Cordillera de la Costa y a la Depresión Central (FIGURA N° 3-2).

La Cordillera de la Costa se presenta como un cordón montañoso y accidentado ubicado en la parte occidental del área de estudio, y con una orientación general norte – sur. Está compuesta por cerros que en el área de estudio rara vez sobrepasan los 350 m s.n.m. (FIGURA N° 3-2) y cuyas pendientes se concentran entre los 10° y 20°, rara vez sobrepasando los 30°. Está formada principalmente por granitoides y metamorfitas del Paleozoico Superior en su flanco occidental y rocas mesozoicas en su flanco oriental, tal como indica la cartografía geológica disponible.

El sistema cordillerano configura una sucesión regular de quebradas y valles, las cuales son las vías naturales de evacuación de aguas hacia el mar. En general, en quebradas y valles tienden a formarse abanicos aluviales, de forma lobular y de baja pendiente.

La Depresión Central se presenta como una franja alargada en dirección norte-sur, la cual corresponde a una extensa llanura levemente inclinada hacia el oeste, la cual se ve ocasionalmente interrumpida por pequeños cerros islas, cuyas alturas no superan los 250 m. En el área de estudio la Depresión Central presenta elevaciones que fluctúan entre 0 y 150 m.

FIGURA Nº 3-2 Carta de elevaciones y principales unidades morfoestructurales en el área de estudio



FUENTE: Elaboración propia a partir de: Shuttle Radar Topography Mision (SRTM) para mayor detalle ver Farr et al. (2007)

Para el análisis de los rasgos morfométricos del área de estudio, se utilizó el modelo de elevación ASTER GDEM, que cuenta con una resolución de 30 metros por pixel. A partir de esta información, se generó una carta de elevaciones, de pendientes y de exposición de ladera para la comuna (FIGURA N° 3-3 a la FIGURA N° 3-5).

3.3 Marco Geológico

Para el área de estudio, no existen trabajos geológicos de detalle, siendo la única fuente de información geológica, la Hoja Hidrogeológica de Talca, a escala 1:100.000 (Hauser, 1995), el mapa geológico de Chile a escala 1:1.000.000, publicado por el Servicio Nacional de Geología y Minería durante el año 2003 y trabajos científicos a escala local (por ejemplo, Varela y Moreno, 1982). La geología de la comuna de Maule (FIGURA N° 3-6, FIGURA N° 3-7 y Planos N°1 y N°2 fuera de texto) está constituida por rocas y sedimentos cuyo rango de edades van desde el Jurásico hasta depósitos no consolidados producto de los procesos erosivos actuales (Hauser, 2005; SERNAGEOMIN, 2003). De manera general, el área se caracteriza por la existencia del batolito de la Cordillera de la Costa, el que se encuentra cubierto en discordancia por rocas volcánicas y sedimentarias, marinas y continentales, que van desde el Cretácico Superior hasta el Neógeno en el área de estudio.

3.3.1 Unidades de Roca

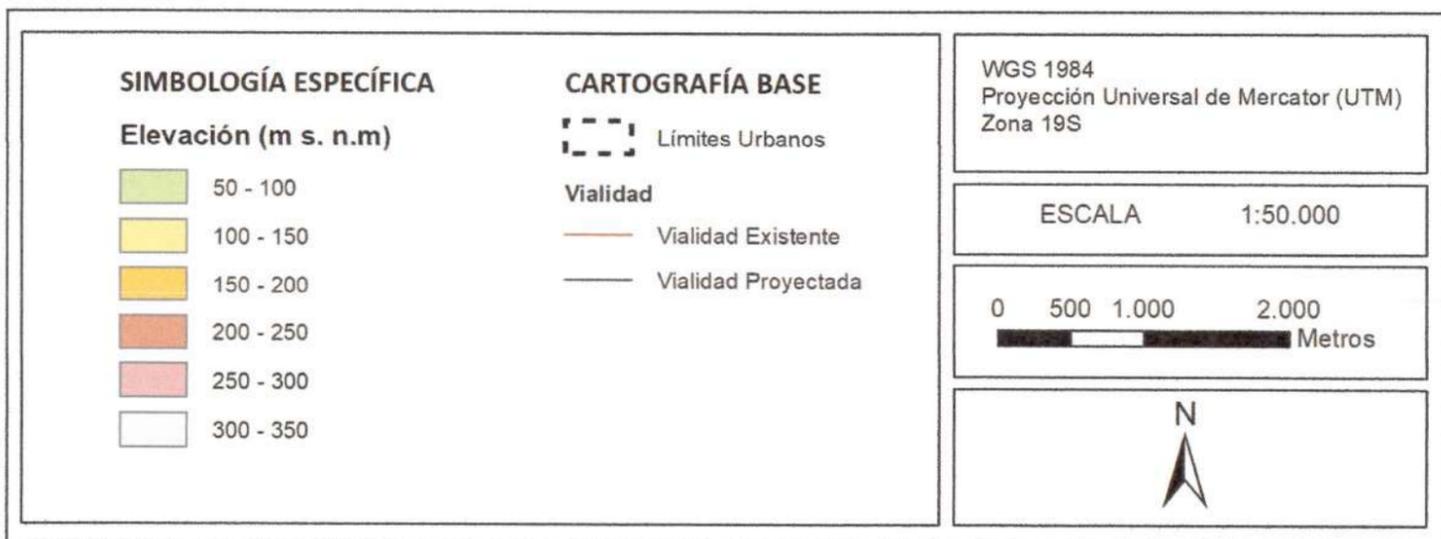
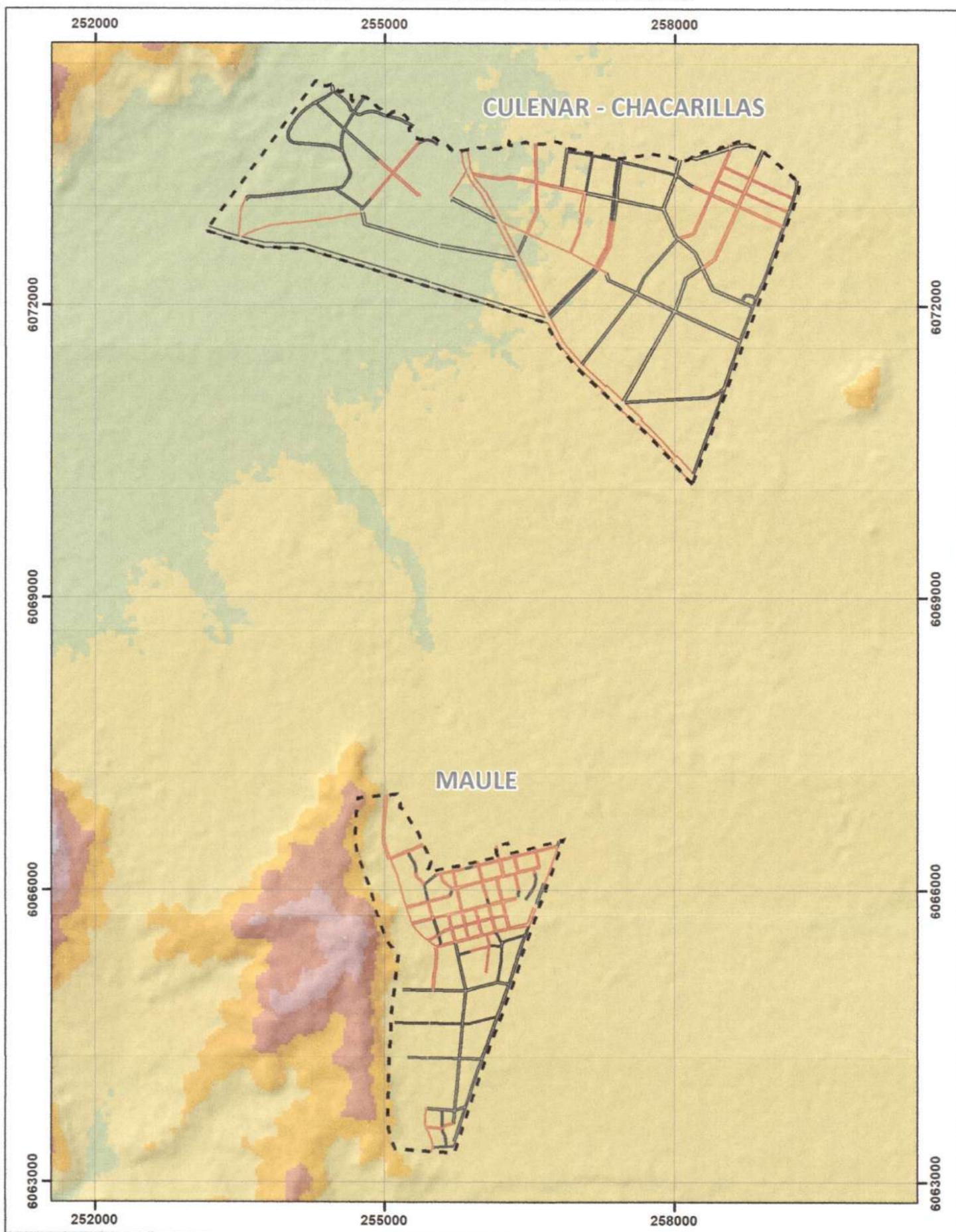
3.3.1.1 Intrusivos Graníticos (Jurásico) (Hauser, 1995)

Corresponden a granitos, granodioritas y dioritas de colores claros, que presentan un aspecto fresco, escasa alteración y poco fracturamiento. Hauser (1995), le asigna a esta unidad una edad Jurásica en base a correlaciones con unidades similares que han sido datadas fuera del área de estudio.

3.3.1.2 Formación Lo Valle (Cretácico Superior - Paleógeno) (Thomas, 1958)

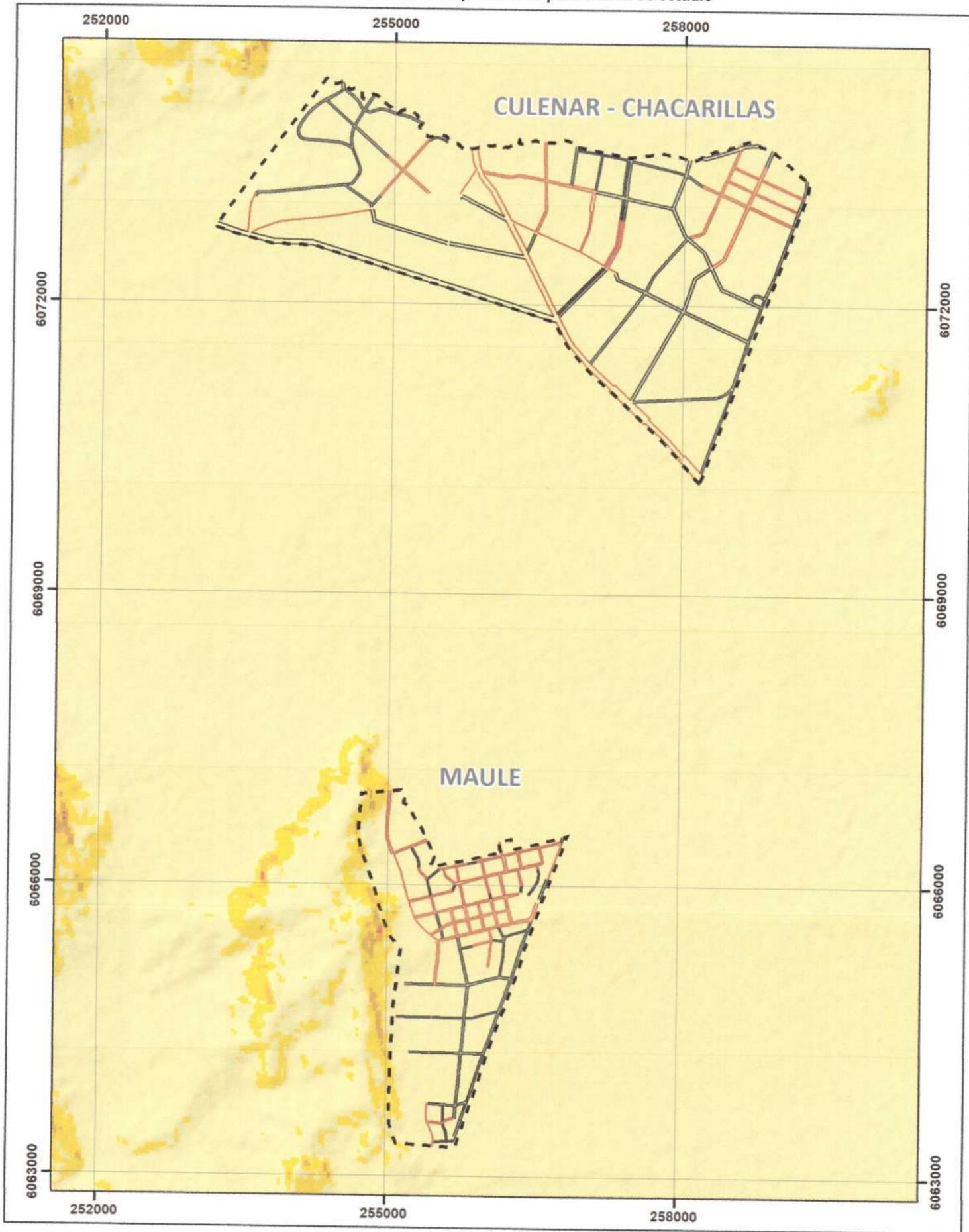
Corresponde a una secuencia de rocas volcanoclásticas que afloran en el flanco oriental de la Cordillera de la Costa. De norte a sur presenta variaciones laterales de facies y está constituida principalmente por lavas andesíticas y riolíticas, ignimbritas y brechas con intercalaciones locales de tufitas y areniscas. A esta unidad se le asigna una edad Cretácico Superior – Paleógeno (Hauser, 1995).

FIGURA N° 3-3 Carta de elevaciones del área de estudio



FUENTE: Elaboración propia a partir de modelo de elevación ASTER GDEM

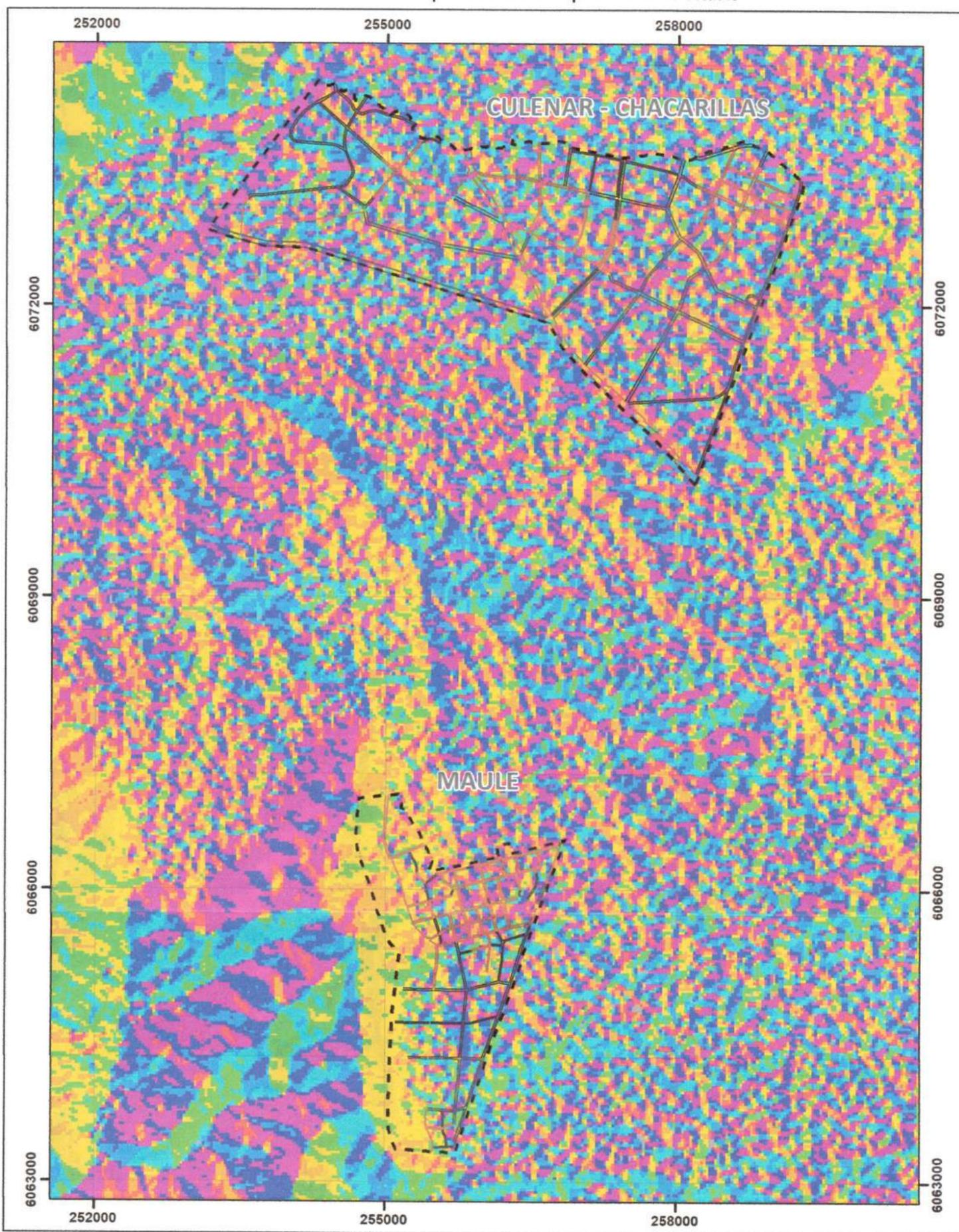
FIGURA Nº 3-4 Carta de pendientes para el área de estudio



<p>SIMBOLOGÍA ESPECÍFICA</p> <p>Pendiente (°)</p> <ul style="list-style-type: none"> 0 - 15 15 - 25 25 - 35 > 35 	<p>CARTOGRAFÍA BASE</p> <ul style="list-style-type: none"> Límites Urbanos Vialidad Vialidad Existente Vialidad Proyectada 	<p>WGS 1984 Proyección Universal de Mercator (UTM) Zona 19S</p> <hr/> <p>ESCALA 1:50.000</p> <hr/> <p>0 500 1.000 2.000 Metros</p> <hr/> <p style="text-align: center;">N ↑</p>
---	--	---

FUENTE: Elaboración propia a partir de modelo de elevación ASTERGDEM

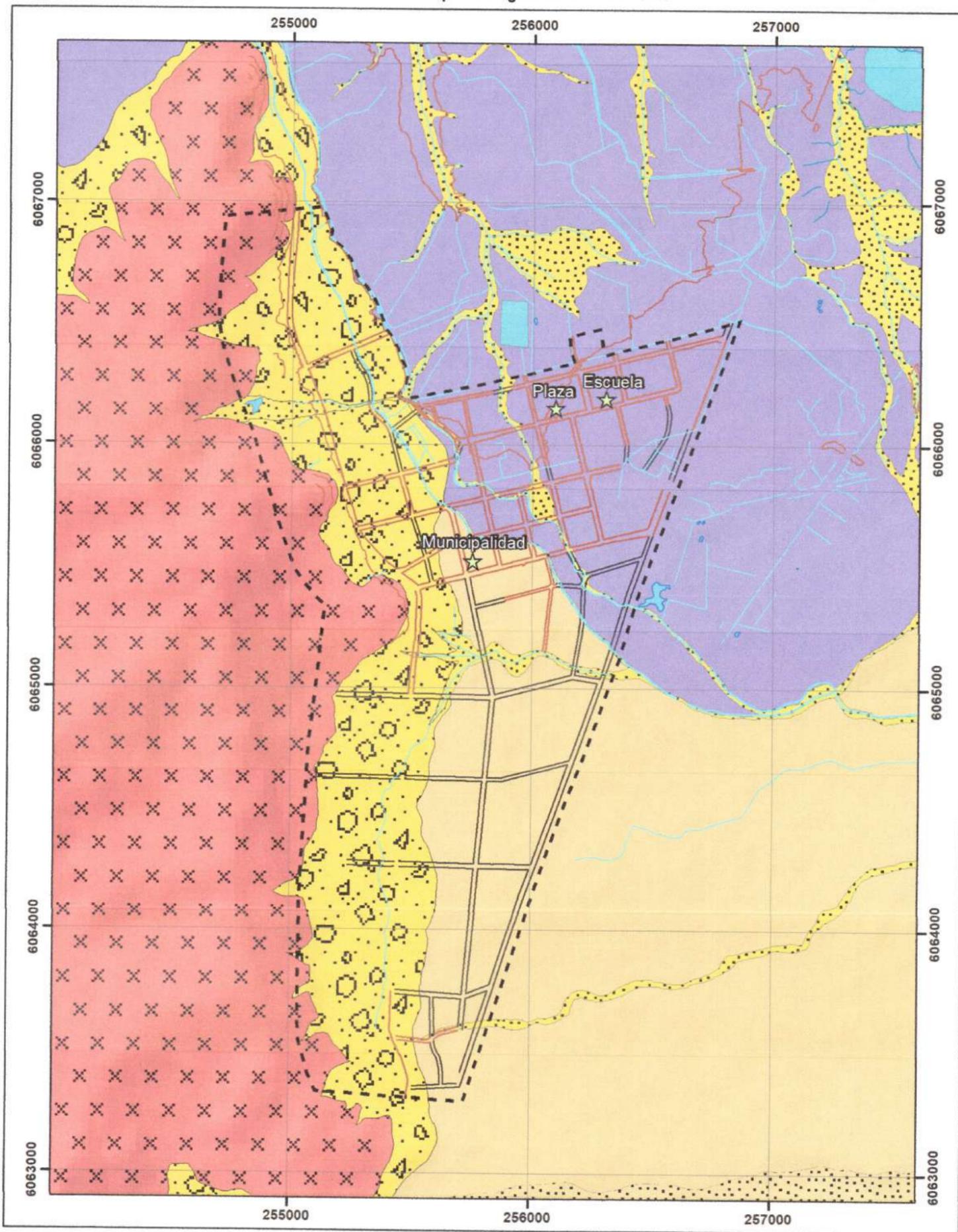
FIGURA N° 3-5 Carta de exposición de ladera para el área de estudio



<p>SIMBOLOGÍA ESPECÍFICA</p> <p>Exposición de ladera</p> <ul style="list-style-type: none"> Plano Norte Noreste Este Sureste Sur Suroeste Oeste Noroeste 	<p>CARTOGRAFÍA BASE</p> <ul style="list-style-type: none"> Límites Urbanos Vialidad Vialidad Existente Vialidad Proyectada 	<p>WGS 1984 Proyección Universal de Mercator (UTM) Zona 19S</p> <hr/> <p>ESCALA 1:50.000</p> <hr/> <p>0 500 1.000 2.000 Metros</p> <hr/> <p style="text-align: center;">N ↑</p>
--	--	---

FUENTE: Elaboración propia en base a modelo de elevación ASTER GDEM

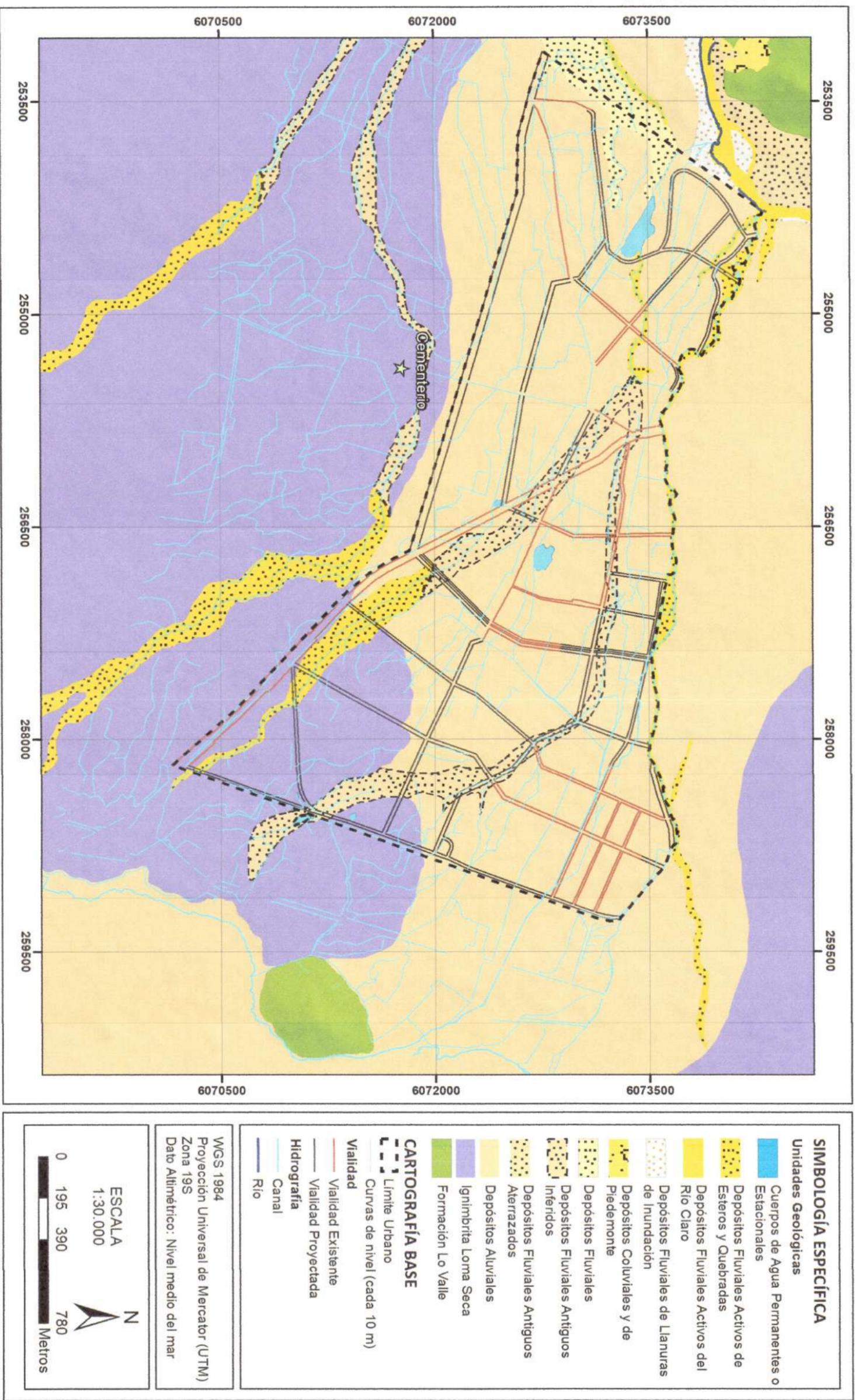
FIGURA Nº 3-6 Mapa Geológico del área de Maule



<p>SIMBOLOGÍA ESPECÍFICA</p> <p>Unidades Geológicas</p> <ul style="list-style-type: none"> Cuerpos de Agua Permanentes o Estacionales Depósitos Fluviales Activos de Esteros y Quebradas Depósitos Coluviales y de Piedemonte Depósitos Fluviales Antiguos Aterrazados Depósitos Ignimbrita Loma Seca Granitoides 		<p>CARTOGRAFÍA BASE</p> <ul style="list-style-type: none"> Límite Urbano Curvas de nivel (cada 10 m) <p>Vialidad</p> <ul style="list-style-type: none"> Vialidad Existente Vialidad Proyectada <p>Hidrografía</p> <ul style="list-style-type: none"> Cuerpo de agua Canal Quebrada 	
<p>WGS 1984 Proyección Universal de Mercator (UTM) Zona 19S Dato Altimétrico: Nivel medio del mar</p>		<p>ESCALA 1:20.000</p>	
<p>0 205 410 820 Metros</p>		<p>N</p>	

FUENTE: Elaboración propia a partir de: Hauser, 1995 y SERNAGEOMIN (2003)

FIGURA Nº 3-7 Mapa Geológico del área de Culenar - Chacarillas



FUENTE: Elaboración propia a partir de: Hauser, 1995 y SERNAMECOMIN (2003)

3.3.1.3 Ceniza Loma Seca

En el área de estudio afloran una serie de depósitos de ceniza volcánica, denominados "Ceniza de Loma Seca", extensos depósitos laháricos y de flujos piroclásticos de carácter ácido, de edad pleistocena (800.000 a 150.000 años), generadas por la Caldera Calabozos, ubicada donde actualmente se ubican los volcanes Descabezados y Quizapu.

Estos materiales alcanzan una amplia distribución en el valle Central, constituyendo un extenso llano interfluvial entre los ríos Claro, Lircay y Maule, así como en los terrenos en que se emplaza la ciudad de Talca, entre el Río Lircay y el Estero Piduco, y entre el Estero Calicanto y el cordón de cerros de Ovejera Negra. Corresponden a depósitos cineríticos que se presentan en afloramientos de gran continuidad. Poseen una escasa permeabilidad superficial debido a lo cual se ha desarrollado sobre ellos una densa red de drenes menores alimentados por acumulación de lluvias invernales. Su trazado tiene una estructura semi paralela en función de la pendiente dominante dentro de este llano monoclinal, la que varía de WSW en su sección norte a WNW en la sur. Todo ello conduce el drenaje superficial en forma convergente hacia el Río Claro. Los flujos que transportaron estos sedimentos cineríticos penetraron en las partes bajas de los relieves orientales de la Cordillera de La Costa ahogando el fondo de valles menores y rinconadas, generando topografías llanas de mínima pendiente a horizontales, y una marcada reducción de la permeabilidad.

3.3.2 Depósitos No Consolidados

3.3.2.1 Depósitos Aluviales de Valle

En la Depresión Central se reconocen principalmente secuencias de relleno asociadas a los ríos Maule y Claro, los que conforman abanicos aluviales de valle asociados a cada uno de estos ríos. Estos depósitos se caracterizan por estar conformados por sedimentos de tamaño grueso (principalmente bloques y gravas), con lentes de arenas, limos y arcillas, los que en ocasiones se encuentran dispuestos en una estratificación cruzada. Estos depósitos se asocian a una topografía plana, que se ve interrumpida por terrazas de erosión en las cercanías de los cauces de los ríos principales debido a la disección que por ellos fueron objeto a causa de cambios en el nivel de base.

La petrografía de los materiales clásticos se relaciona con las unidades litológicas encontradas aguas arriba, es decir, principalmente de origen volcánico. La mayoría de estos depósitos conforma una secuencia vertical homogénea y una reducción de la granulometría hacia el sector distal (occidental de la Depresión Intermedia), lo cual implica una mayor predominancia de las fracciones más finas, resultando en un sedimento bien seleccionado, pero débilmente compactado, lo cual determina una alta porosidad y buena permeabilidad, lo que permite un adecuado drenaje de las aguas superficiales.

3.3.2.2 Depósitos Fluviales Antiguos

Corresponden a gravas redondeadas y arenas finas a gruesas, con escasa matriz de limos y arcillas, que formaron parte del lecho de escurrimiento de las aguas, definiendo paleo-cauces por donde el

agua solía escurrir en eventos de precipitación intensa. En algunos casos, estos paleo-cauces han sido utilizados para encauzar cursos de agua, por lo que en la actualidad coinciden espacialmente con canales de regadío. En la comuna del Maule, se reconocen principalmente disectando a los abanicos aluviales de valle.

3.3.2.3 Depósitos Fluviales Activos

Conformados por gravas, redondeadas y de alta esfericidad, arenas, con escaso contenido de limos y arcillas. Dentro del área de estudio se pueden reconocer distintos tipos de depósitos fluviales activos:

- Depósitos Fluviales Activos: Se distribuyen en forma de bancos y barras dispuestos irregularmente en el lecho principal del río, con escaso nivel de aterrazamiento.
- Depósitos Fluviales de Llanura de Inundación: Se ubican en las riberas del río Claro y Maule, áreas que normalmente se inundan durante precipitaciones intensas. Normalmente presentan un nivel de aterrazamiento parcial.
- Depósitos Fluviales Activos de Esteros y Quebradas: Estos depósitos se distribuyen a lo largo de los cauces activos de esteros y quebradas que drenan hacia el río Claro y Maule. Normalmente se asocian a cauces angostos y no presentan terrazas asociadas.

3.3.2.4 Depósitos Coluviales y de Piedemonte.

Los depósitos coluviales corresponden a brechas heterogeneas, subangulosas a subredondeadas, gravas, arenas y limos. Son sedimentos carentes de estratificación, ubicados al pie de los relieves montañosos en la zona. Estos depósitos están asociados principalmente a procesos gravitacionales, presentando una morfología de tipo abanico.

4 DESCRIPCIÓN Y CATASTRO DE INFORMACIÓN HISTÓRICA Y PREHISTÓRICA DE LOS PELIGROS GEOLÓGICOS ANALIZADOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

En este capítulo se detallan los peligros geológicos que potencialmente podrían afectar el área de estudio, constituyendo un riesgo de catástrofe permanente o potencial, amenazando el emplazamiento de población.

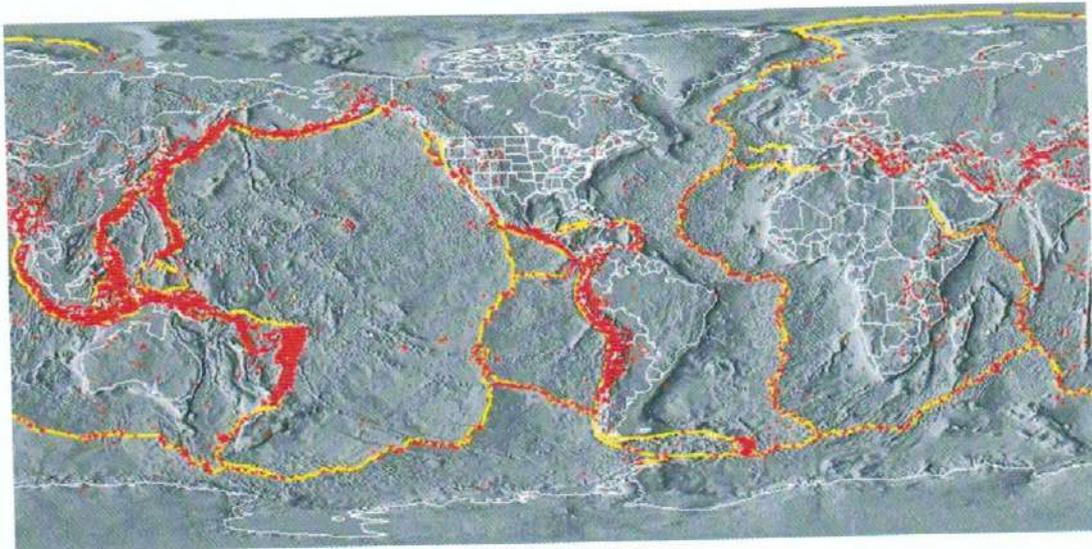
Para cada peligro, se describe en qué consiste, cuáles son sus factores condicionantes, y los principales efectos para la población y sus actividades. El análisis se realiza dividiendo los peligros geológicos en dos grupos, procesos internos o endógenos de la tierra (peligro sísmico y volcánico), y los procesos externos o exógenos (remociones en masa e inundaciones).

4.1 Procesos Internos o Endógenos de la Tierra – SISMICIDAD

4.1.1 Descripción del Peligro Geológico

La costa Oeste de Sudamérica está delineada por el borde occidental de la placa Sudamericana y se caracteriza por una intensa sismicidad debido a su convergencia con la placa de Nazca. En planta se aprecia una banda sísmica activa muy angosta (100-150 km) y de profundidad variable (~5-200 km) entre el cordón montañoso de los Andes y la fosa Perú-Chile. La FIGURA N° 4-1 ilustra la sismicidad mundial que resalta los márgenes de las placas tectónicas y muestra además, cómo Chile se encuentra en un ambiente de gran producción sísmica.

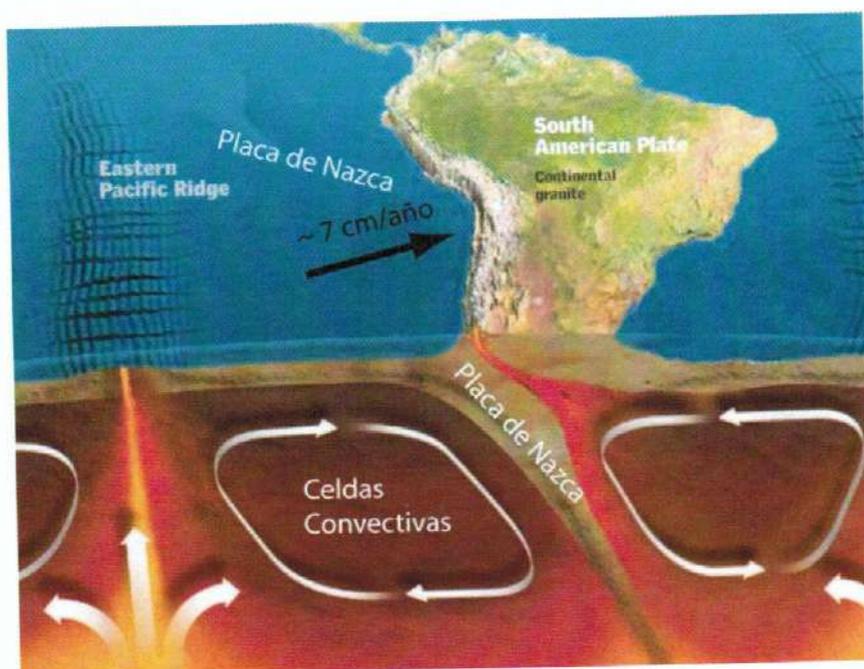
FIGURA N° 4-1 Sismicidad mundial entre los años 1980 y 1990, se representan en puntos rojos los epicentros con magnitud >5. Nótese como la sismicidad “ilumina” los límites de las placas tectónicas, dibujados en amarillo



Fuente: Washington University.

El margen de subducción donde se ubica Chile está caracterizado por una convergencia del orden de 8 cm/año (De Mets *et al.*, 1994). Una serie de fuerzas actúan sobre la Placa de Nazca, como por ejemplo el flujo convectivo de material del manto, que "mueve" a la placa en dirección al este generando la convergencia, o el mismo peso de la placa oceánica que "tira hacia abajo" esta placa, favoreciendo la subducción (FIGURA N° 4-2). Debido a sus distintas composiciones, la placa oceánica que es comparativamente más densa (de composición basáltica) tiende a introducirse bajo la corteza continental menos densa (de composición granítica). Las fuerzas que actúan sobre la interface entre ambas placas así como las de interacción entre las placas y el manto generan el llamado acoplamiento sísmico interplaca, el que puede entenderse como la resistencia al deslizamiento en la zona de contacto entre ambas. A mayor acoplamiento interplaca la capacidad de generar terremotos de gran magnitud aumenta (Scholz, 1990).

FIGURA N° 4-2 Contexto geodinámico y margen de subducción de Chile



Fuente: Modificado de Enciclopedia Britannica (2008)

El sistema de subducción, además de acumular energía que se libera por sismos de interplaca, genera campos de esfuerzos en la placa continental, en la oceánica y en la zona de acople entre ambas. El método para descargar la energía acumulada es a través de diferentes tipos de sismos, ejemplificados en la FIGURA N° 4-3, los que corresponden a:

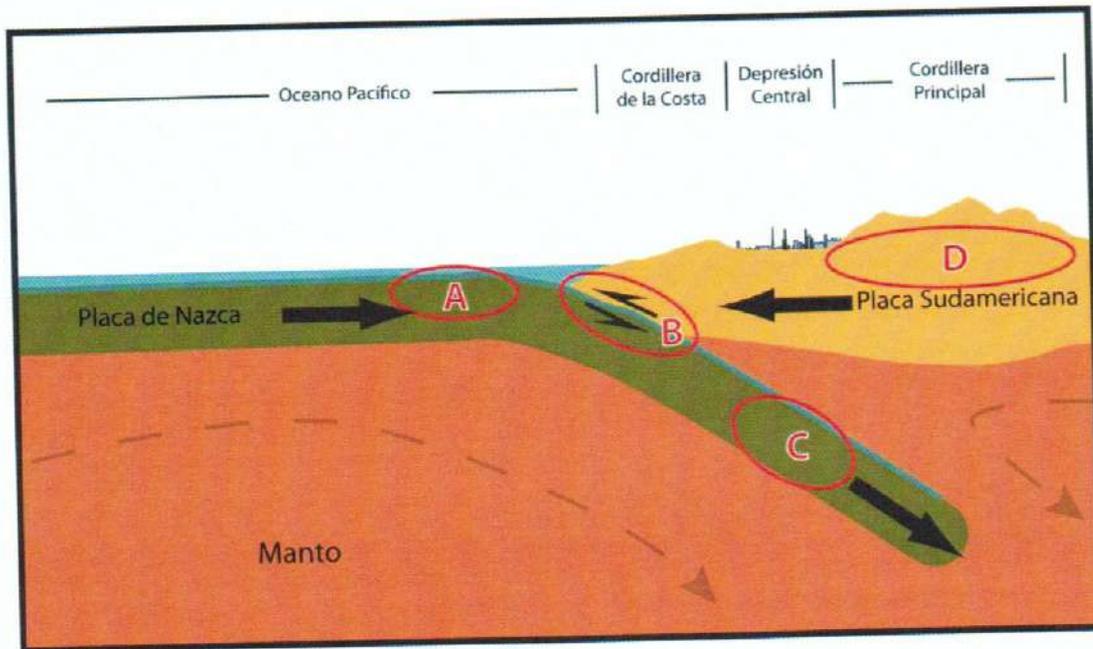
ZONA A) Sismos "Costa afuera", que se producen por los esfuerzos extensivos por abombamiento en la placa subductante antes de la zona de contacto. A pesar de llegar a tener magnitudes cercanas a $M_w = 6$, prácticamente no causan efectos significativos en áreas pobladas debido a su ocurrencia en zonas mar adentro.

ZONA B) Sismos asociados al contacto interplaca, como los ocurridos en Antofagasta 1995, Chile Central 1985, Mejillones 2005 y Constitución-Concepción en el 2010. Estos son producto de la liberación de energía acumulada por la convergencia de placas.

ZONA C) Sismos intraplaca de profundidad intermedia, como los sismos de Punitaqui 1997, Copiapó 2002, Calama 1950, Tarapacá 2005 y Chillán 1939. Se producen por el fracturamiento tensional de la placa de Nazca (la placa se quiebra por su propio peso).

ZONA D) Sismos superficiales intraplaca, como los sismos de Las Melosas en 1958, Aroma en 2001 y Curicó en 2004. Son producto del esfuerzo intraplaca inducido por la subducción, que a la vez contribuye a la generación de relieve. En general, los sismos superficiales intraplaca se encuentran asociados a fallas superficiales que pueden tener movimientos normales, inversos y de rumbo, que responden a campos de esfuerzos compresivos o extensivos.

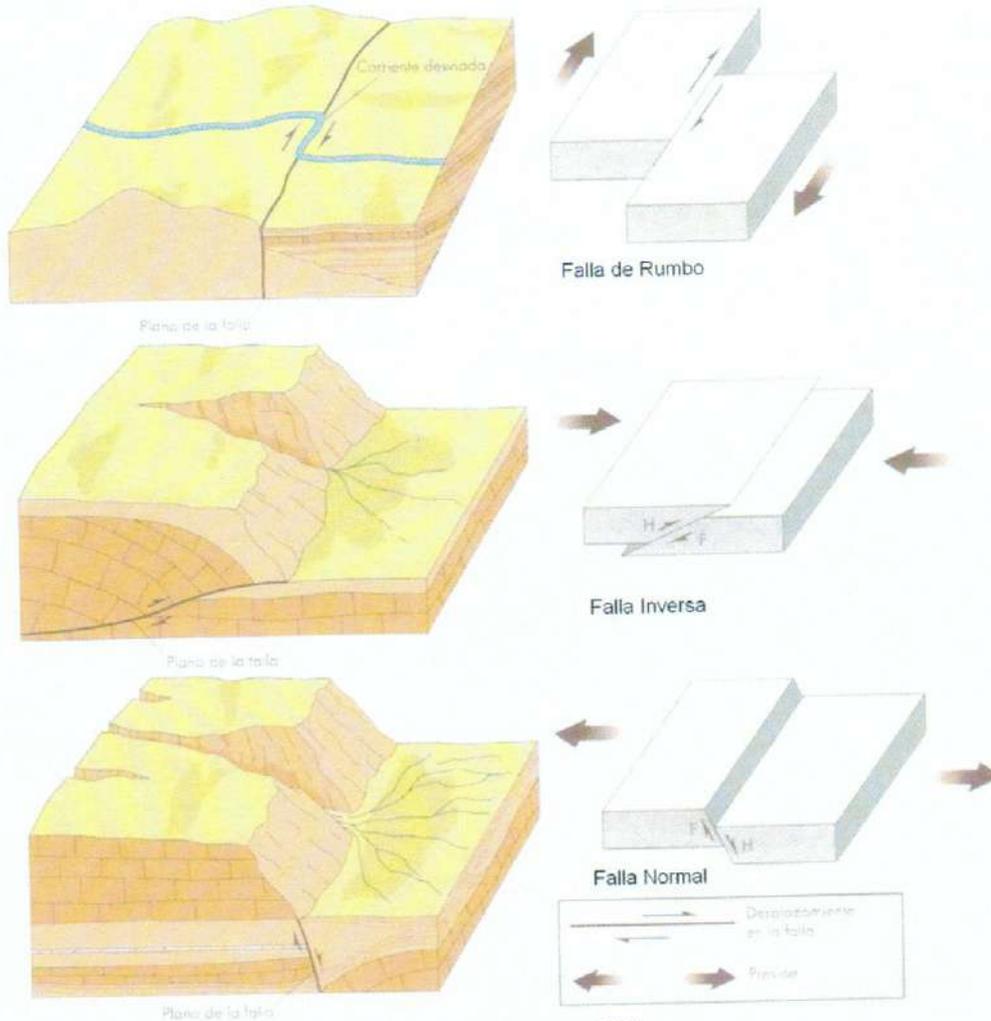
FIGURA N° 4-3 Tipos de sismos que ocurren en un margen de subducción. Explicación en el texto



FUENTE: Elaboración propia

Independientemente de la ubicación particular de uno u otro sismo, todos ellos corresponden a un desplazamiento violento paralelo al plano de falla que libera la energía acumulada en la interfaz. La energía que se acumula producto de la convergencia de placas, tanto en el contacto interplaca como en la corteza, en algún momento supera la resistencia de las rocas. En dicho instante se produce una ruptura que se propaga a través de un plano de falla, el que, de acuerdo a su geometría, generará diferentes tipos de movimientos (FIGURA N° 4-4). A su vez, esta ruptura conlleva una liberación de energía que se propaga por medio de ondas sísmicas.

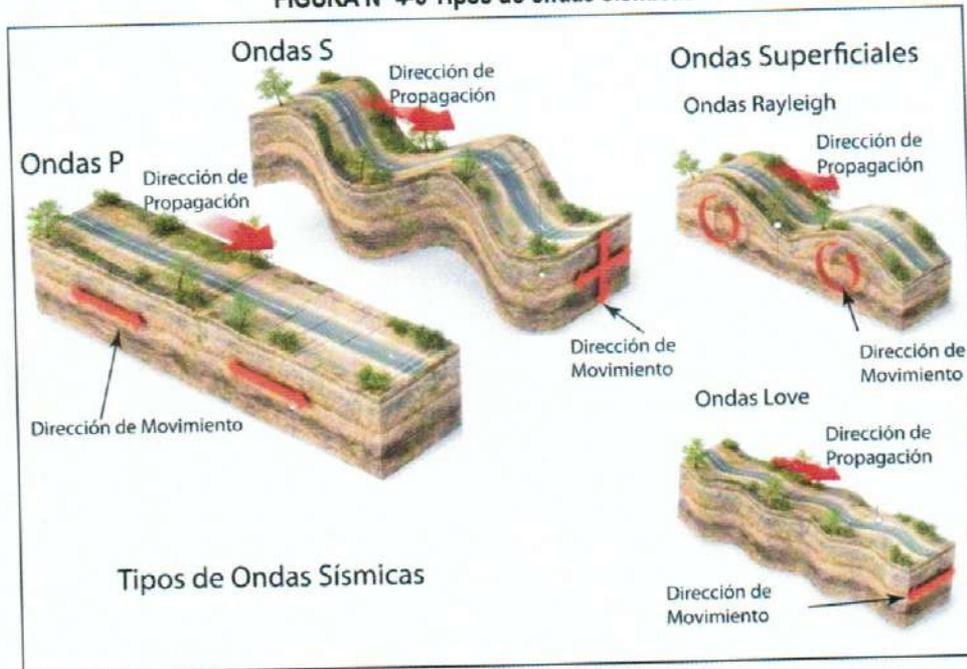
FIGURA N° 4-4 Tipos de falla y esfuerzos asociados



Fuente: Keller y Blodgett (2004)

Las ondas que transmiten la energía sísmica se agrupan en dos tipos principales: ondas de cuerpo y ondas de superficie. Las primeras se dividen en ondas **P** (compresivas) y ondas **S** (ondas de corte o de cizalle), mientras que las segundas se dividen en ondas Rayleigh y Love (FIGURA N° 4-5). En las ondas **P** el movimiento de partículas se produce en forma paralela al de la propagación de la onda y en las ondas **S** es en dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Las ondas Rayleigh tienen un movimiento oscilatorio elíptico y las ondas Love tienen un movimiento oscilatorio horizontal. Con respecto a su impacto en superficie, debido a que las ondas **S** transportan la mayor cantidad de energía y a que las ondas superficiales más destructivo del movimiento sísmico. Aún así, a medida que las ondas se alejan de la fuente van perdiendo o disipando energía, siendo cada vez menos destructivas, fenómeno que se conoce como atenuación.

FIGURA Nº 4-5 Tipos de ondas sísmicas



Fuente: Modificado de Enciclopedia Britannica (2008)

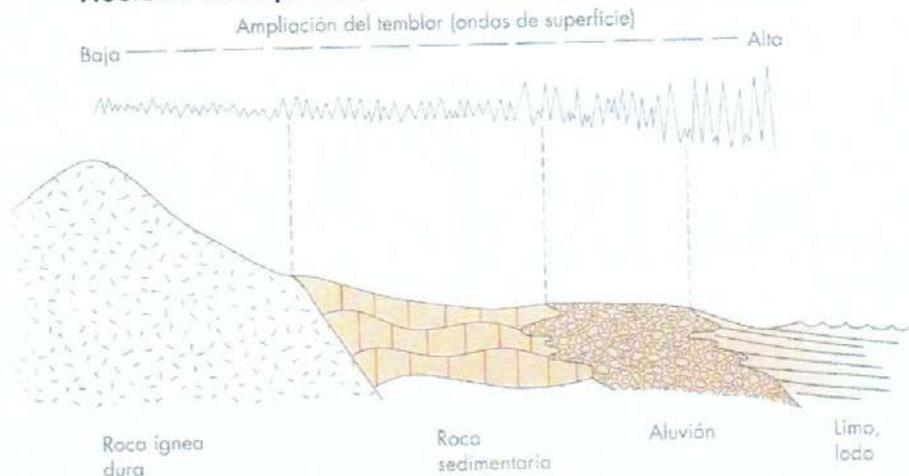
Para medir los sismos se utilizan, principalmente, dos escalas: *magnitud* e *intensidad*. La *magnitud* es una medida única y objetiva, que normalmente se relaciona con la escala de RICHTER (M_S). Actualmente para grandes sismos se utiliza la escala de magnitud de momento (M_W) que se calcula a partir del tamaño de la zona de ruptura y el desplazamiento medido para un sismo ocurrido, y da cuenta de la energía total liberada por el evento. La *intensidad* es una medida subjetiva del impacto de un sismo sobre la población, en términos de percepción humana del evento y sus efectos en la infraestructura. Este parámetro se mide en la escala de MERCALLI-CANCANI, denominada también como Modificada de Mercalli (M.M.).

Finalmente, debe destacarse el llamado "efecto sitio", que indica un condicionamiento de carácter local bajo el cual para un mismo terremoto y dependiendo del tipo de terreno donde uno se encuentra ubicado, las ondas sísmicas pueden amplificarse durante el desarrollo del terremoto (FIGURA Nº 4-6).

El principal efecto asociado a la ocurrencia de sismos son fuertes movimientos del terreno, que originan un peligro directo sobre las estructuras y sobre las personas, debido a las fuertes aceleraciones generadas por las ondas sísmicas. Sumado a lo anterior, la ocurrencia de estos fenómenos es generalmente sin previo aviso, por lo que la única manera de mitigar el riesgo es con campañas de educación y estrictas normas de construcción. Muchos de estos fenómenos son acompañados por asentamientos en las superficies, normalmente irregulares, dañando construcciones, infraestructura y cañerías. Esto implica en una alta vulnerabilidad estructural, económica y social. Particularmente con respecto a esta última se deben mencionar las potenciales pérdidas de vidas humanas y heridos por el derrumbe de estructuras, además de la vulnerabilidad a enfermedades gastrointestinales y epidemias por el colapso de los sistemas sanitarios y de

conectividad, entre los innumerables efectos adversos para la sociedad que provocan este tipo de fenómenos.

FIGURA N° 4-6 Amplificación de la vibración generada por un terremoto



Fuente: Keller y Blodgett (2004)

Más allá de los efectos directos mencionados anteriormente, los sismos pueden también inducir la ocurrencia de otros fenómenos, como es el caso de procesos de remoción en masa (caídas de bloques y deslizamientos), maremotos y licuefacción.

Los deslizamientos y derrumbes se dan en diversos tipos de suelos y bajo variadas condiciones sismotectónicas, incluso se han detectado en sismos de grado $M_w = 4.0$. La cantidad y severidad de estos están en directa relación con la cercanía al epicentro y la magnitud del evento causante (Keefer, 1984, Sepúlveda et al., 2006, 2010). Sea cual sea su origen, los deslizamientos y derrumbes están asociados principalmente a tres factores: las pendientes del terreno, la resistencia mecánica de los materiales involucrados y antecedentes de eventos anteriores (Centeno et al., 1994; Sancho, 1997). Para más detalle acerca de estos procesos ver la sección 4.4 "Procesos Externos o Exógenos de la Tierra – REMOCIONES EN MASA".

Los maremotos corresponden a una ola o un grupo de olas de gran energía y tamaño que se producen cuando algún fenómeno extraordinario desplaza verticalmente una gran masa de agua y en aproximadamente un 90% de los casos, estos fenómenos son provocados por terremotos. La energía de un maremoto depende de su altura (amplitud de la onda) y de su velocidad, y estará asociada a la magnitud del evento que lo generó.

Otro proceso que se asocia comúnmente a la actividad sísmica es la licuefacción del terreno, que corresponde al fenómeno donde un material sólido saturado en agua se comporta como líquido a causa de la intensa vibración. Las ondas sísmicas hacen aumentar la presión de agua presente en el sedimento, de forma que los granos de arena o limo pierden el contacto entre ellos causando una pérdida de resistencia del sólido y permitiendo que el depósito pueda fluir. Bajo estas condiciones, el suelo puede perder su capacidad de soporte de estructuras, producir deslizamientos (incluso en superficies con muy bajas pendientes) y formar volcanes de arena. Muchos de estos fenómenos son

acompañados por asentamientos en las superficies, normalmente irregulares, dañando construcciones, infraestructura y cañerías.

Para la ocurrencia de licuefacción se requiere de tres factores:

1. Depósitos o suelos, granulares poco consolidados (suelos y no cementados) de tamaño fino a medio (limo a arena, aunque en algunos casos se ha presentado en arcillas y en gravas). Típicamente pueden ser rellenos artificiales, especialmente aquellos creados por relleno hidráulico (ej. puertos y tranques de relaves), depósitos eólicos (dunas), depósitos de playas o de cursos de agua lo suficientemente jóvenes para estar sueltos. Los suelos con partículas de diferentes tamaños son menos propensos a sufrir licuefacción, debido a que las partículas menores tienden a rellenar los espacios entre las mayores, reduciendo así la tendencia a densificación del suelo y evitando los efectos del aumento de presión de agua. También influye la forma de las partículas que conforman el suelo, siendo un depósito de partículas redondeadas más susceptible de sufrir licuefacción.
2. Saturación de los depósitos por aguas subterráneas, el agua debe rellenar los espacios entre los granos de limo o arena. Puede producirse en zonas donde el nivel de agua subterránea es somero como en desembocadura de cursos de agua, humedales, pantanos, vegas y zonas costeras.
3. Fuertes movimientos sísmicos, durante los cuales las ondas sísmicas aumentan la presión del agua contenida en los depósitos. Cabe destacar, que todo Chile, en especial desde la península de Taitao al Norte, tiene el potencial de ser afectado por grandes terremotos.

4.1.2 Resultados del Catastro de Información Histórica de Sismicidad

Para el caso de la sismicidad se analizaron los terremotos asociados a subducción, profundidades intermedias y corticales. Se describen los mayores eventos reportados, así como su ubicación espacial, alcance y daños reportados. En base a la recopilación realizada, se diagnosticó y describió la susceptibilidad para el peligro geológico reconocido en el subcapítulo 5.1.1 "Peligro Sísmico".

4.1.2.1 Antecedentes Históricos de Terremotos en Chile entre los 33° y 40°S.

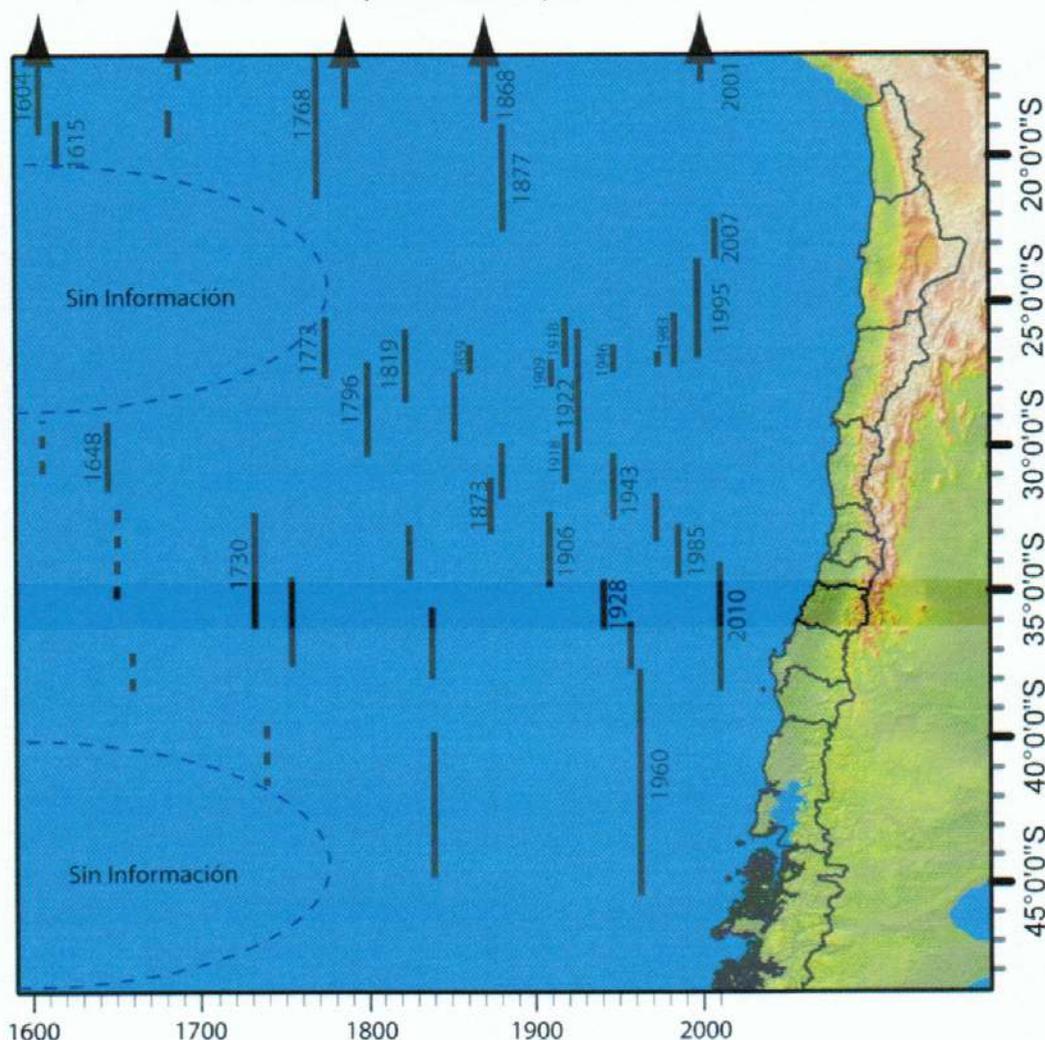
La costa oeste de Sudamérica está delineada por el borde oriental de la placa tectónica Sudamericana y se caracteriza por su sismicidad debido a su encuentro con la placa tectónica de Nazca. Existe una banda sísmica activa muy angosta (100-150 kilómetros de ancho) y profundidad variable (entre 5 y 150 Km. de profundidad) entre el cordón montañoso de los Andes y la fosa Perú-Chile.

La costa de Chile históricamente ha sido afectada por grandes terremotos, varios acompañados de maremotos destructivos. En la FIGURA N° 4-7 se grafican los más importantes sismos de subducción que han ocurrido en el periodo histórico.

La zona del Centro – Sur de Chile (33° - 46° S), se caracteriza por una sismicidad intensa, como los sucesivos terremotos que han afectado a la ciudad de Valparaíso, Concepción y Valdivia desde los tiempos de la conquista. A continuación se detalla el catastro realizado de sismos reportados entre

los 33° y 40° S. Los mayores sismos son destacados en la FIGURA N° 4-7, donde se muestran las zonas de ruptura asociadas a estos terremotos. Las magnitudes asociadas a cada sismo son aproximadas, puesto que no existía instrumental sismológico de precisión hasta la década de 1950.

FIGURA N° 4-7 Terremotos de subducción históricos con magnitud estimada y calculada mayor a 7.2, y sus áreas de ruptura. En línea continua las zonas de ruptura bien identificadas, en línea discontinua las zonas de ruptura inferidas a partir de datos históricos



FUENTE: Elaboración Propia (Nishenko, 1985; COMTE et al., 1986; Comte y Pardo, 1991; Comte et al., 2002; Lara y Rauld, 2003).

SIGLO XVI

Terremoto de Lebu, 28 de Octubre de 1562, Un sismo de intensidad X en la escala de Mercalli produjo daños significativos en la ciudad de Lebu. El epicentro parece estar ubicado en el sur de la península de Arauco. El sismo provocó la destrucción completa de Ciudad Imperial y un tsunami que siguió al terremoto afectó la costa por una distancia de 1.200 kilómetros y causó numerosas víctimas entre los aborígenes.

Epicentro del terremoto: latitud 38,0° S; longitud 73,5° W
Magnitud estimada: 8,0 Richter

Terremoto de Concepción (actualmente Penco), 8 de Febrero de 1570, de acuerdo a registros el mar retrocedió alrededor de diez kilómetros para posteriormente inundar completamente la ciudad, dejando algunas embarcaciones encalladas y terminando de destruir lo poco que se había salvado del terremoto.

Epicentro del terremoto: latitud 36,5° S; longitud 74° W
Magnitud estimada: 8 – 8,5 Richter
Variación máxima del nivel del mar: 4 metros en La Concepción

Terremoto de Valdivia, 16 de Diciembre de 1575, con tsunami asociado que destruyó las ciudades de Valdivia y Toltén.

Epicentro del terremoto: latitud 38,5° S; longitud 74,5° W
Magnitud estimada: 8,5 Richter
Variación máxima del nivel del mar: 4 metros en Corral

SIGLO XVII

Temblor de Santiago, 13 de Mayo de 1647. Terremoto en Santiago y sus alrededores. Hay informes de fuertes movimientos del mar a lo largo de toda la costa, cuyas ondas fueron lo suficientemente altas para sumergir los cerros costeros.

Epicentro del terremoto: latitud 33,0° S; longitud 71,5° W
Magnitud estimada: 8,5 Richter

Terremoto de Concepción, 15 de Marzo de 1657, fuerte terremoto ocurrió entre las provincias de Maule y Cautín, aproximadamente entre las latitudes 36° S y 39° S, alrededor de las 20:00 horas. El terremoto, en la ciudad de Concepción, destruyó completamente la mayoría de las casas, permaneciendo de pie solo una iglesia. Dos horas más tarde arribó el maremoto cubriendo la parte baja de la ciudad y alcanzó hasta el centro de la plaza. Más personas murieron ahogadas que por el efecto mismo del terremoto.

Epicentro del terremoto: latitud 37° S; longitud 72,8° W
Magnitud estimada: 8,0 Richter
Variación máxima del nivel del mar: 4 metros en Concepción (Penco)

SIGLO XVIII

Terremoto de Valparaíso, 8 de julio de 1730. Sismo que afectó a toda el área central, causando daños en Valparaíso, La Serena, Coquimbo, Illapel, Petorca y Tiltil. El maremoto resultante fue muy grande y afectó alrededor de 1.000 kilómetros de costa, desde Callao a Valdivia, dañando las ciudades de Concepción y se reportaron efectos en la ciudad de Honshu, Japón. Al llegar a la Bahía de Concepción desde el norte el fenómeno se manifestó de manera similar a los anteriores, el mar

se retiró aproximadamente un kilómetro de la playa y cuatro olas gigantes seguidas destruyeron los 2/3 de Concepción, arrastrando los objetos al mar. La ciudad de Concepción fue una de las más afectadas por el maremoto. En Valparaíso, el maremoto sólo inundó las partes bajas y arrasó las bodegas más inmediatas a la playa.

Epicentro del terremoto: latitud 32,5° S; longitud 71,5° W
Magnitud estimada: 8,7 Richter
Variación máxima del nivel del mar: 16 metros en La Concepción

Terremoto de Concepción, 25 de mayo de 1751. Tercer terremoto y maremoto destructores en La Concepción. La mayor parte de los daños causados por el sismo ocurrieron desde Curicó a La Concepción, e incluso se reportaron daños en Santiago, destruyéndose además Chillán, Cauquenes y Talca. El maremoto arribó a La Concepción alrededor de media hora después del terremoto, con un retiro inicial del mar seguido por tres grandes ondas de maremoto. Las oscilaciones del mar continuaron con menores amplitudes hasta por lo menos el mediodía. El maremoto fue el más grande experimentado en la ciudad y al poco tiempo se planteó su traslado tierra adentro hasta su ubicación actual. El maremoto también fue destructor en Juan Fernández, donde perecieron 35 personas incluyendo el Gobernador.

Epicentro del terremoto: latitud 36,5° S; longitud 74,0° W
Magnitud estimada: 8,5 Richter
Variación máxima del nivel del mar: 3,5 metros en Concepción

Terremoto de Valdivia, 24 de Diciembre de 1737. Desde Valdivia hasta Chiloe se sintió el terremoto del 24 de diciembre, el cual según fuentes de la época sobrepasó los 8,5 grados en la escala de Mercalli. El sismo en Valdivia produjo el derrumbe de casas, hundimiento de terreno y el desborde de ríos. El movimiento telúrico fue acompañado de tres grandes réplicas y por la erupción del volcán Osorno.

SIGLO XIX

Terremoto de Concepción, 20 de Enero de 1816, Un sismo produce significativos daños en Concepción provocando muchas trizaduras en edificios. Es el primero que afecta a la ciudad en su nueva ubicación. Tuvo una intensidad de VIII en la escala de Mercalli en esa ciudad.

Terremoto de Valparaíso, 19 de noviembre de 1822. Terremoto en Valparaíso precedido por varios sismos que ocurrieron desde el día 14 al 17 y con numerosas réplicas durante los tres días posteriores al terremoto. En Valparaíso se destruyeron la mayor parte de los edificios públicos y alrededor de 700 casas particulares. También hubo gran destrucción en Casablanca y Quillota. El maremoto arribó a la costa de Valparaíso 15 minutos después de ocurrido el terremoto con un retiro de las aguas y un posterior alzamiento del nivel del mar que arrojó algunas embarcaciones menores a las puertas de la Aduana, localizada 3,5 metros sobre el nivel de las altas mareas. Se registraron un total de 3 ondas de maremoto.

Epicentro del terremoto: latitud 33,0° S; longitud 72,5° W
Magnitud estimada: 8,3 Richter
Variación máxima del nivel del mar: 3,5 metros en Valparaíso

Terremotos de Concepción, 1831 y 1832. El 24 de Diciembre de 1831 se reporto un sismo con una intensidad de VIII en la escala de Mercalli. Un mes más tarde, el 21 de Enero de 1832, se produjo un remezón similar.

Terremoto de Concepción, 20 de febrero de 1835. Por cuarta vez en su historia, la zona de Concepción fue impactada por un fuerte terremoto y posterior maremoto. Hubo 50 muertos y 30 desaparecidos en la ciudad de Concepción, pero también hubo víctimas en Talcahuano, Chillán, Constitución, Cauquenes y Talca. Todas las ciudades al sur de Rancagua sufrieron daños. No hubo estragos en los edificios de Santiago, pero se observaron ondulaciones periódicas del agua en numerosas zanjas de irrigación. La ciudad de Chillán fue destruida en su totalidad. Se decidió reconstruirla en un lugar más seguro unos 3 km del sitio anterior. No todos los vecinos se cambiaron al nuevo lugar, por lo que la ciudad quedó dividida en Chillán Viejo y Chillán Nuevo.

El maremoto comenzó con una gran retirada del mar que, media hora después de ocurrido el terremoto, dejó casi seca la bahía de Talcahuano dejando varadas a numerosas embarcaciones. La primera onda llegó en la bahía a alturas de 9 metros sobre el nivel de la marea alta, seguidas en un corto lapso por dos ondas más de alturas superiores. Las casas ubicadas en isla Quiriquina a alturas de 13 metros sobre el nivel del mar fueron destruidas por el maremoto que inundó completamente a Talcahuano y también a las instalaciones portuarias ubicadas en Juan Fernández. En Valparaíso las amplitudes fueron bajas y en Castro produjo estragos.

Se estima una magnitud de 8 para este terremoto cuyo epicentro estaría a menos de 30 km de la ciudad de Concepción. Se generó además un maremoto de proporciones que agregó más destrucción. Dentro de la historia de Chile, el terremoto del 20 de Febrero de 1835 se conoce como "La Ruina"

Epicentro del terremoto: latitud 36,8° S; longitud 73,0° W
Magnitud estimada: 8-8,2 Richter
Largo estimado de la dislocación: 210 kilómetros
Variación máxima del nivel del mar: 13 metros en isla Quiriquina

Terremoto de Valdivia, 7 de Noviembre de 1837. De acuerdo a los escritos dejados por Claudio Gay, el terremoto de Valdivia afecto a las ciudades de Talca, Concepción, Valdivia y Osorno, y reporta un gran daño a los edificios fiscales. De acuerdo a las crónicas, este terremoto no produjo un maremoto con grandes efectos en Chile, si se propagó por el océano Pacífico, siendo registrado en Samoa, Archipiélago Tuamotu, islas Tonga, Hilo, Hawaii, donde murieron alrededor de 50 personas y en Honshu, Japón.

Epicentro del terremoto: latitud 42,5° S; longitud 74,0° W
Magnitud estimada: >8,0 Richter
Largo estimado de la dislocación:
Variación máxima del nivel del mar: 2 metros en Ancud

SIGLO XX

Terremoto de Valparaíso del 16 de Agosto de 1906, Gran terremoto en la zona de Valparaíso con intensidades IX en la escala Mercalli desde Papudo a la desembocadura del río Rapel. El maremoto generado fue relativamente menor con alturas máximas de poco más de 1 metro sobre el nivel de la marea alta. No hubo daños en la bahía de Valparaíso causados por este maremoto. El maremoto fue registrado en Hawái, Japón, Estados Unidos e islas Marquesas donde produjo daños a una iglesia.

Epicentro del terremoto: latitud 33,0° S; longitud 72,0° W
Magnitud calculada: 8,3 Richter
Largo estimado de la dislocación: 340 kilómetros
Variación máxima del nivel del mar: 1,5 metros en Valparaíso

Terremoto de Talca y Constitución, 1 de Diciembre de 1928, Terremoto que provoca destrucción desde Valparaíso a Concepción, ocurrido a las 00:07 horas. Hubo 108 muertos en Talca, 67 en Constitución y alrededor de 50 en los pueblos aledaños y 500 heridos. Durante toda la mañana del 1 de diciembre se observaron inundaciones inusuales a lo largo de la costa de Chile central. En Constitución el agua se elevó 1,5 metros sobre el nivel de la alta marea.

Epicentro del terremoto: latitud 35,0° S; longitud 72,0° W
Magnitud calculada: 7,9 Richter
Variación máxima del nivel del mar: 1,5 metros en Constitución

Terremoto de Chillán, 24 de Enero de 1939. Sismo que sacudió a Chillán y a todas las ciudades colindantes, con una intensidad registrada de 7,8° en la Escala Richter. Ostenta el record de la mayor cantidad de muertos en un sismo en la historia de Chile, con alrededor de 30.000 víctimas fatales. A diferencia de los otros sismos nombrados, corresponde a un terremoto de intraplaca, asociado al quiebre de la placa de Nazca en profundidad. En la escala de Mercalli Modificada, el terremoto tuvo las siguientes intensidades: Arica III, Iquique y Antofagasta IV, La Serena VI, Valparaíso, Santiago y Rancagua VII, Talca VIII, Parral IX, Cauquenes, Quirihue, Bulnes y Concepción, X; Chillán XI, Arauco IX, Los Ángeles y Angol VIII, Temuco VIII, Valdivia VI, Puerto Montt V y Aysén IV.

Terremoto de Lebu e Isla Mocha, 20 de Abril de 1949. Diez años después del Terremoto de Chillán, un terremoto de magnitud 7.2, destruye el 80% de la ciudad de Angol provocando un ambiente de pánico y confusión en la población. Tuvo una intensidad de IX en la escala de Mercalli Modificada, VIII en Concepción, Temuco y Los Ángeles y VII en Chillán, Valdivia y Talca. En Lebu también produjo algunos daños a los que se sumó un maremoto. En Concepción se sintió el sismo sin provocar daños materiales ni personales. El epicentro parece estar ubicado cerca de la Isla Mocha a 70 km de profundidad. Un sismo de magnitud 7.2 se produjo a las 11:32 hrs. El epicentro se localizó 25 km al sur de Lebu. Se generó un maremoto que inundó parte de la ciudad hasta la plaza de armas. La resaca siguiente fue brusca y rápida, arrastrando numerosos objetos al mar.

Terremoto de Tomé, 6 de Mayo de 1953. Terremoto frente a las costas de Tomé, alcanzando una magnitud de 7,6 en la escala de Richter y provocando 12 muertes. La zona más afectada, fue la misma del terremoto de 1939, es decir, Concepción y Chillán. En Concepción el 15% de las edificaciones resultaron dañadas y en Chillán, el daño fue mayor aún, donde tuvo una intensidad de X (MM). En la ciudad de Tomé, la violencia del movimiento hizo que las casas habitación de la gente

modesta, sufrieran considerables daños, quedando muchas familias a la intemperie. Los daños se remitieron al agrietamiento de murallas, techos hundidos, etc. Las industrias textiles de la localidad y Bellavista no sufrieron daños materiales de consideración. Hubo quebrazón de vidrios y pedazos de murallas desprendidas. La gente se aglutinó en la Plaza de Armas y lanzaban gritos histéricos lo que hizo más confusa la situación. En Cauquenes se cayeron murallas de casas viejas. En Coronel la mayoría de los edificios resultaron con grietas en muros y techos y se cortó la luz y agua. En Bulnes el sismo provocó grietas en las murallas y destrozos totales o parciales en las techumbres. Dos heridos graves y 25 casas derrumbadas y semidestruidas, fue el balance en la localidad de Florida.

Terremotos del 21 y 22 de Mayo de 1960 en Valdivia y en otras ciudades del sur de Chile, Terremotos que causaron gravísimos daños en las provincias comprendidas entre Concepción y Chiloé, siendo las ciudades más afectadas las de Valdivia, Puerto Montt, Ancud, Castro y Corral. Este terremoto originó un maremoto de tales proporciones que asoló todos los puertos de esa zona produciendo enormes daños y alrededor de 1.000 víctimas. El maremoto se propagó por toda la cuenca del océano Pacífico causando daños y víctimas en Hawaii, Oceanía y Japón.

Epicentro del terremoto: latitud 38,5° S; longitud 74,5° W
Magnitud calculada: 9,5 Richter
Variación máxima del nivel del mar: 15 metros en Ancud

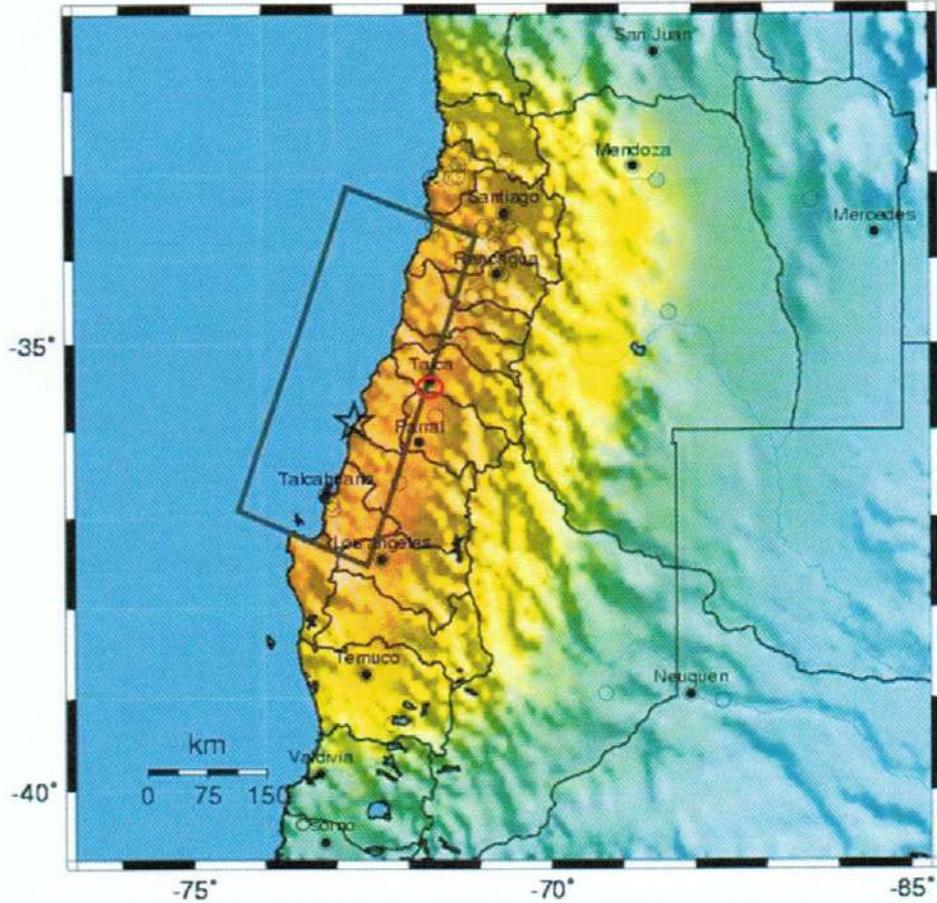
Terremoto del 3 de Marzo de 1985. Terremoto en Valparaíso. Extenso daño en Valparaíso y pueblos aledaños. Hubo 177 muertos y miles de heridos. Se produjo un pequeño maremoto que no produjo daños, pero fue registrado a lo largo de la costa de Chile.

Epicentro del terremoto: latitud 33,11° S; longitud 71,61° W
Magnitud calculada: 8,0 Richter
Variación máxima del nivel del mar: 1,2 metros en Valparaíso

Terremoto del 27 de febrero de 2010. Terremoto Constitución - Concepción. Extensos daños en Araucanía, Biobío, Maule, O'Higgins, Región Metropolitana y Valparaíso. Hubo 521 muertos, 12.000 heridos y un total de 1,8 millón de personas afectadas. En la escala de Mercalli Modificada, el terremoto tuvo las siguientes intensidades: Concepción IX, Chiguayante, Coronel, Lebu, Nacimiento, Penco, Rancagua, Santiago, San Vicente, Talca, Temuco y Tome VIII, desde La Ligua hasta Villarrica VII, Ovalle y Valdivia VI. Se sintió hasta Iquique y Punta Arenas. En Argentina se sintió en Cutral-Có y San Juan V, Córdoba y Mendoza IV y en Buenos Aires III. En Sao Paulo, Brasil II. La FIGURA N° 4-8 muestra las intensidades reportadas por el USGS para este terremoto. El maremoto posterior causó daños y destruyó edificios en Concepción, Constitución, Dichato y Pichilemu. Se observaron hasta 2 metros de alzamiento en la costa cerca de Arauco. En el período entre el 27 de febrero y el 26 de abril de 2010, el USGS localizó 304 réplicas de magnitud 5 o mayor de las cuales 21 fueron de magnitud 6 o mayor (FIGURA N° 4-8).

Epicentro del terremoto: latitud 36,29° S; longitud 73,24° W
Magnitud calculada: 8,8 Richter
Variación máxima del nivel del mar: 2,6 metros en Valparaíso

FIGURA N° 4-8 Mapa de intensidades reportadas producto del terremoto del 27 de febrero de 2010. La ubicación del epicentro está indicada en el mapa con una estrella. La comuna de Maule está indicada con un círculo rojo.



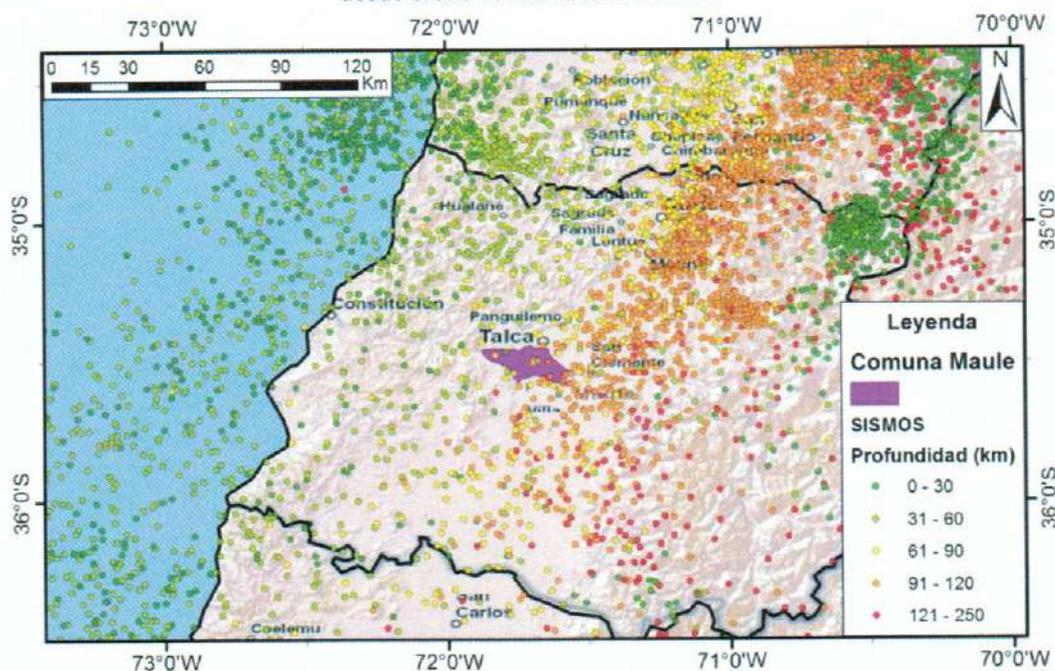
PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC.(%g)	<.17	.17-1.4	1.4-3.9	3.9-9.2	9.2-18	18-34	34-85	85-124	>124
PEAK VEL.(cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-18	18-31	31-80	80-118	>118
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X

Fuente: USGS, 2010. Disponible en: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/global/shake/2010/fan/>

4.1.3 Antecedentes Actuales de Sismicidad en el área de estudio

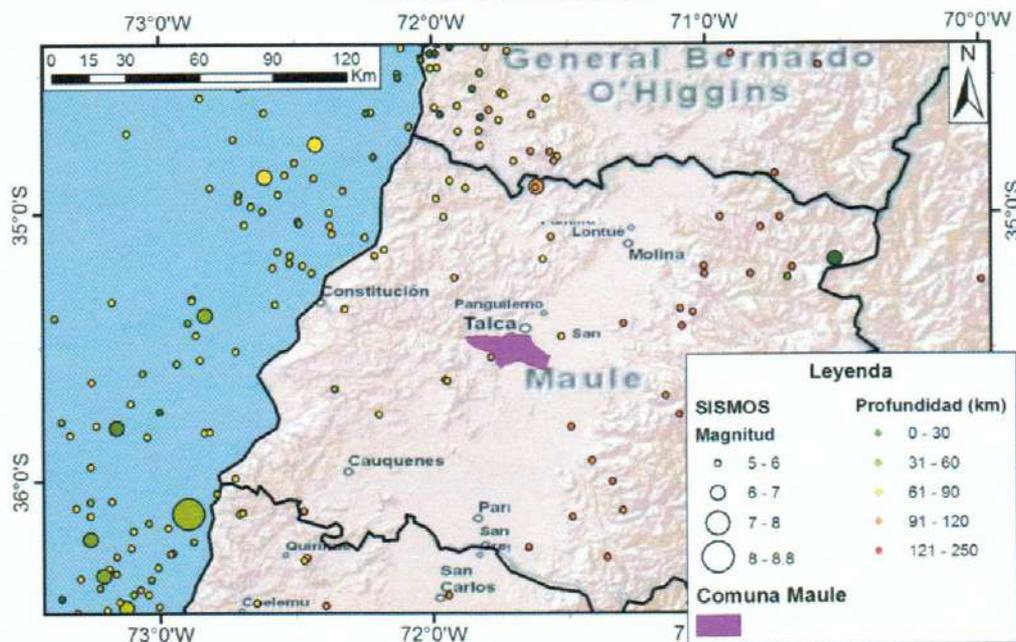
En la FIGURA N° 4-9 se muestran los todos sismos ocurridos entre 1973 y febrero de 2011 en el área de estudio y sectores cercanos, recopilados a partir del Catálogo NEIC del Servicio Geológico Estadounidense (USGS) y en la FIGURA N° 4-10 se detallan sólo los sismos de magnitud mayor a 5.

FIGURA N° 4-9 Profundidad de todos los sismos ocurridos entre los 34° 30' y 36° 30' de latitud sur, desde el año 1973 a febrero de 2011



Fuente: Elaboración propia en base al Catálogo NEIC 1973-2011 del USGS (disponible en <http://earthquake.usgs.gov/regional/ncic>)

FIGURA N° 4-10 Sismos de magnitud > 5 ocurridos entre los 34° 30' y 36° 30' de latitud sur, desde el año 1973 a febrero de 2011



Fuente: Elaboración propia en base al Catálogo NEIC 1973-2011 del USGS (disponible en <http://earthquake.usgs.gov/regional/ncic>)

4.1.4 Fallas inactivas, potencialmente activas y activas

El margen continental donde se encuentra ubicado Chile es un margen activo, caracterizado por la convergencia entre las placas de Nazca y Sudamericana donde los registros geológicos evidencian una larga historia de deformación de la corteza continental. Diversas estructuras geológicas como fallas, pliegues y fracturas afectan a prácticamente todas las unidades de roca presentes en la zona y son responsables en gran parte de la creación y evolución del relieve.

Las fallas en la corteza continental son producto de los campos de esfuerzos predominantes en ésta, estos campos de esfuerzos están principalmente modulados por la subducción activa. Cuando los esfuerzos acumulados superan la resistencia de la roca estos se liberan como deformación frágil por medio de propagación de una ruptura con desplazamiento en el plano de falla generando así ondas sísmicas. Cuando una falla está orientada de forma favorable a los esfuerzos predominantes la resistencia que opone es menor que la que presenta la roca sin fracturar, por esta razón se concentra la deformación frágil en las fallas, lo que se traduce en sismos generados en las mismas con una cierta recurrencia en el tiempo. Como resultado se puede considerar a estas estructuras como fuentes sísmicas, la identificación de fuentes sísmicas en cierta área es el primer paso en la evaluación del peligro sísmico.

La actividad de una falla es una categorización relacionada a su potencial de generar un sismo. Las fallas activas son aquellas que presentan evidencias de desplazamiento durante el Holoceno (los últimos 12.000 años); las fallas potencialmente activas son aquellas que tienen evidencia de desplazamiento durante el Pleistoceno (2.5 Ma[†] a 12 ka[‡]); y las fallas se consideran inactivas si no caen dentro de alguna de estas categorías (movimiento más antiguo que 2.5 Ma, lo que incluye el Plioceno 2.5 Ma a 5 Ma, Mioceno a partir de 5 Ma y periodos más antiguos).

Se ha estudiado la información geológica disponible en la que no se describen fallas en la zona abarcada por este trabajo (SERNAGEOMIN, 2002; PMA, 2008) y no se han reconocido fallas activas o evidencias de fallas a partir del trabajo en terreno.

4.2 Procesos Internos o Endógenos de la Tierra – VOLCANISMO

4.2.1 Descripción del Peligro Geológico

El peligro volcánico deriva de los procesos asociados a la erupción de un volcán. En Chile el volcanismo activo se distribuye a lo largo de la Cordillera de los Andes, pero de forma discontinua. En la zona entre los 18° y 27°S y aquella al Sur de los 33°S se ubica el volcanismo activo, mientras que entre los 27°-33°S está ausente. Los principales peligros asociados a una erupción volcánica se resumen en el CUADRO N° 4-1 y en la FIGURA N° 4-11.

La lluvia de ceniza y tefra se produce durante erupciones explosivas en las que una gran cantidad de material volcánico se inyecta en la atmósfera a gran altura, generando columnas de tefra, compuestas por piroclastos y gases. Estas columnas, ascienden velozmente alcanzando en pocos minutos alturas estratosféricas, siendo dispersadas por el viento y esparcidas las cenizas y

† Millones de años

‡ Miles de años

piroclastos alrededor de una gran área. En caso de colapso de esta columna se producen flujos y oleadas piroclásticas que pueden alcanzar centenares de kilómetros, en función de la altura de la columna de tefra (energía potencial transformada en energía cinética) y la dirección del viento, generando grandes depósitos de ceniza y piroclastos incandescentes. Adicionalmente, es común que se produzca contaminación de aguas superficiales en todo el sector afectado por la caída de cenizas, así como también de los acuíferos en los alrededores del volcán por la inyección de aguas hidrotermales, además del envenenamiento por dispersión de gases tóxicos hacia la atmósfera.

Los flujos de lava se producen cuando material magmático se desplaza aguas abajo del centro de emisión. El alcance que tendrán estos flujos está determinado por la tasa de efusión (emisión del centro volcánico), la pendiente del terreno sobre el cual la lava escurre y la viscosidad de la lava. Además, en las cercanías del centro de emisión se producen comúnmente temblores de magnitud inferior a 6 en la escala de Richter (Mw), pero a poca profundidad (entre 1 y 20 km), los que están asociados a intensidades mayores a VI en las cercanías del epicentro. Estos sismos provienen de diversos procesos, tales como ascenso del magma y fracturamiento de la corteza, explosiones volcánicas y esfuerzos tectónicos compresivos y expansivos asociados al ciclo eruptivo (González-Ferrán, 1995).

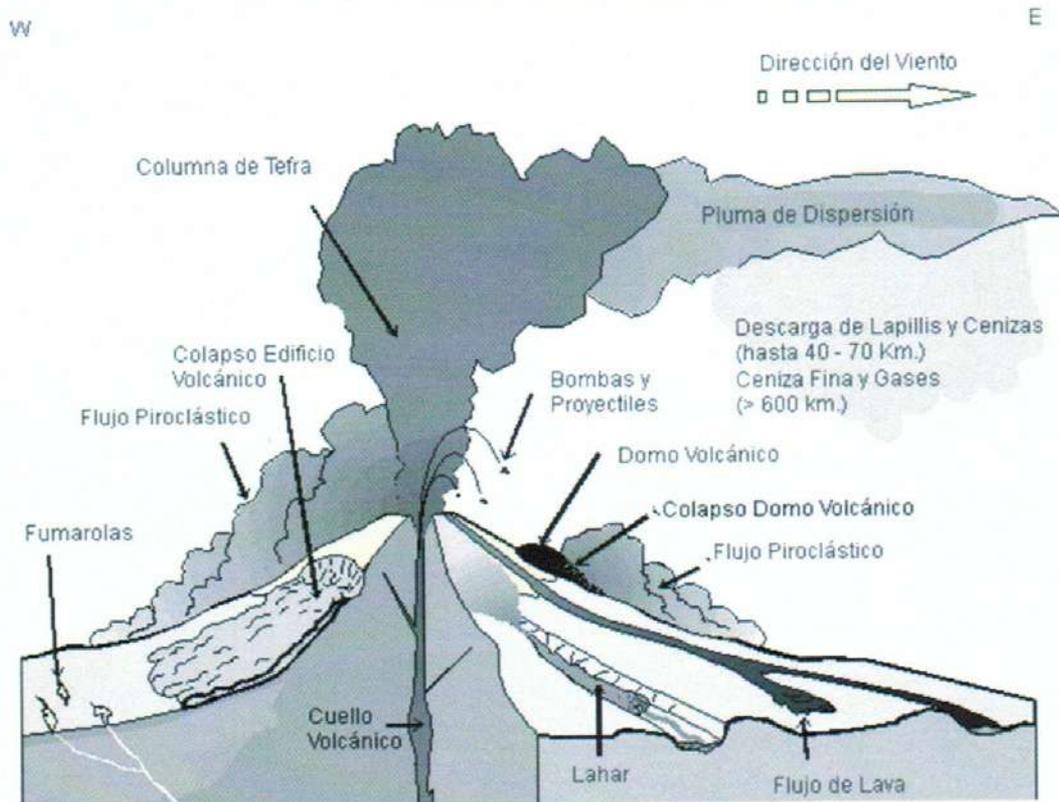
Los procesos de remoción en masa asociados a una erupción volcánica se pueden clasificar en tres grandes grupos: lahares, colapso parcial o total del edificio volcánico y deslizamientos de laderas (González-Ferrán, 1995). Los lahares se producen por el brusco derretimiento de hielos y nieve durante una erupción volcánica. Corresponden a una mezcla de rocas fragmentadas preexistentes en las laderas de un volcán con materiales efusivos frescos y una gran cantidad de agua. Esta mezcla desciende aguas abajo a altas velocidades y de manera turbulenta, arrasando e incorporando a su flujo todo lo que encuentra en su trayecto (árboles, casas, etc.). Reportes históricos describen que las velocidades que alcanzan estos flujos van desde los 1,3 m/s hasta los 40 m/s, recorriendo decenas de kilómetros aguas abajo del valle, y en casos que la velocidad sea mayor a 150 Km/h pueden remontar barreras topográficas.

El colapso, total o parcial, del edificio volcánico puede producirse como consecuencia de una gran cantidad de energía liberada durante la erupción. Este proceso puede provocar maremotos si ocurre en la cercanía de lagos o embalses, ya que puede producir el desplazamiento de volúmenes importantes de agua en pocos minutos generando olas destructivas de gran energía. Finalmente, asociado a la sismicidad producida por la erupción, pueden generarse deslizamientos de terreno en la cercanía del centro eruptivo, lo que puede dar paso a flujos de barro y/o detritos aguas abajo.

El impacto en la población y sus actividades es muy alto en las cercanías de los centros volcánicos, ya que los procesos asociados a una erupción (caída de ceniza, flujos piroclásticos, contaminación de aguas superficiales), pueden generar grandes catástrofes en la vida diaria e infraestructura de las comunidades. Los efectos más directos para la población, aunque la erupción se encuentre a distancia, son:

1. Pérdida de tierras cultivables
2. Colapso de techos y obras civiles
3. Pérdidas de vidas humanas y forraje
4. Contaminación de aguas y problemas sanitarios derivados.

FIGURA N° 4-11 Peligros volcánicos asociados a la erupción de un volcán



Fuente: Myers y Brantley (1995)

Se debe destacar que, la duración de una catástrofe por actividad volcánica puede ser considerable dado que un ciclo eruptivo puede extenderse por meses o años (por ejemplo, el ciclo eruptivo del volcán Chaitén aún activo desde el 2008), y pueden afectar grandes áreas de terreno, como por ejemplo la erupción del volcán Quizapu en el año 1932, cuya pluma de ceniza alcanzó la ciudad de Johannesburgo, Sudáfrica.

CUADRO N° 4-1 Peligros asociados al volcanismo

Peligro	Factores de Peligro	Tipo de Daño	Alcance	Condicionantes
Lluvia de Tefra y Proyectiles Balísticos	Proyección de Bombas y Escorias Incandescentes Caída de Piroclastos y Dispersión de Cenizas	Daños por impacto, incendios. Recubrimiento de cenizas, colapso de estructuras, daños a la agricultura, daños a instalaciones industriales y viviendas, problemas de tráfico aéreo, falta de visibilidad, contaminación de aguas.	Alrededores del volcán (<10 km) Centenares de kilómetros	Tamaño de proyectiles. Mayor tamaño, menor alcance; menor tamaño, mayor alcance Dirección del viento
	Fujos y Oleadas Piroclásticas Gases	Daños a estructuras, incendios, recubrimiento por cenizas. Envenenamiento, contaminación aire y agua.	Decenas a centenares de kilómetros Decenas a centenares de kilómetros	Dirección del viento y hacia donde colapsa la columna de tefra Dirección del viento y hacia donde colapsa la columna de tefra Dirección del viento
Lavas y Edificio Volcánico	Inyección de Aerosoles a la Estratósfera Lavas y Dornos Deformación del Terreno	Impacto en el clima, efecto a largo plazo y/o a distancia. Daño a estructuras, incendios, recubrimiento por lavas. Fallas, daños a estructuras.	Alrededores del volcán (<10 km) Alrededores del volcán (<10 km), puede ser de cientos de kilómetros Alrededores del volcán (<10 km), puede ser de cientos de kilómetros	
	Terremotos y Temblores Volcánicos	Colapso del edificio volcánico, remociones en masa, daños a estructuras.		Geomorfología
Remociones en masa	Lahares Colapso Parcial o Total del Edificio volcánico Deslizamiento de Laderas	Daños a estructuras, arrastres de materiales, recubrimiento por barros. Daños estructuras, recubrimiento por detritos, avalanchas, tsunami inducido. Arrastre de materiales, recubrimiento por detritos, daños a estructuras.	Decenas a centenares de kilómetros Alrededores del volcán (<10 km), puede ser de cientos de kilómetros Alrededores del volcán (<10 km), puede ser de cientos de kilómetros	Red de drenaje Geomorfología y cuerpos de agua cercanos Geomorfología y cuerpos de agua cercanos
Otros	Ondas de Choque Variaciones en el Sistema Geotérmico de Acuíferos	Rotura de cristales y paneles. Cambios de temperatura y calidad del agua.	Decenas de kilómetros Alrededores del volcán (<10 km), puede ser de cientos de kilómetros	Dirección del viento y geomorfología Red de drenaje

Fuente: Elaboración propia a partir de González-Ferrán (1995), Myers y Brantley (1995) y Sruoga (2002)

4.2.1 Resultados del Catastro de Información Histórica de Volcanismo

Para el caso del volcanismo, se analizaron las erupciones históricas entre 33° y 37° de latitud Sur, y cuáles fueron las áreas afectadas por los productos de las erupciones. Se describen los mayores eventos reportados, así como su ubicación espacial, alcance y daños reportados. En base a la recopilación realizada, se diagnosticó y describió la susceptibilidad para el peligro geológico reconocido en el subcapítulo 5.1.2 "Peligro Volcánico".

La zona comprendida entre las latitudes 33°S y 46°S presenta el índice más alto de actividad volcánica, con un promedio de una erupción cada 0,7 años entre 1800 y 1990 (Moreno, 1992). El área de estudio se encuentra a 80 km de distancia del arco volcánico actual (FIGURA N° 4-12), por lo que se considera que está directamente influenciada por el peligro volcánico. Dentro de los registros de actividad histórica destacan los centros volcánicos asociados al cordón del Planchón-Peteroa-Azufre, al grupo Descabezado-Azul-Quizapu y a los centros volcánicos asociados a la Laguna del Maule (CUADRO N° 4-2) entre los 33° y 37° de latitud sur.

CUADRO N° 4-2 Principales volcanes en sectores cercanos al área de estudio

Grupo	Ubicación	Altitud m s.n.m.	Volumen Eruptado (en km ³)	Edad Volcán	Erupciones Históricas	Productos Erupción
Tupungatito	33° 24' S 69° 48' O	5.933	6	Histórico	18 (1829 - 1980)	Lavas, Cenizas
Marmolejo – San José	33° 46' S 69° 55' O	6.070	95	Plioceno	6 (1822 - 1941)	Lavas, Domos, Avalanchas
Maipo	34° 10' S 69° 52' O	5.290	25	Pleistoceno	4? (1822 - 1941)	Lavas, Domos
Tinguiririca	34° 49' S 70° 21' O	4.300	15		1 (1917)	
Planchón – Peteroa – Azufre	33° 15' S 70° 57' O	4.090	61	Pleistoceno – Holoceno	17 (1660 - 1991)	Lavas, Avalanchas y Fumarolas
Descabezado Grande – Azul – Quizapu	35° 35' S 70° 45' O	3.953	50	Pleistoceno – Holoceno	15 (1846 - 1980)	Lavas – Cenizas Fumarolas
Volcanes asociados a la Caldera del Maule	36°05' S 70°30' O	4.020	-	Pleistoceno	-	-
Chillán	36°51'85" S 71°22'36" O	3.089	-	Pleistoceno - Holoceno	8 (1739 - 1945)	Erupciones explosivas.

Fuente: Sruoga, 2002 y Petit-Breuilh Sepúlveda, 2003.

Al norte del área de estudio, destacan los volcanes Planchón, Peteroa y Azufre, de los cuales el más activo corresponde al Peteroa, que muestra actividades desde 1.660 hasta la actualidad. Destacan la erupción de 1.762, donde ocurrieron violentas erupciones, el Colapso del Peteroa, flujos de

detritos, lahares y lluvia de tefra. La crónica de la época relata que al colapsar el Peteroa, "el estrépito fue horrible, que se sintió en una gran parte del reino.... Las cenizas y lavas rellenaron todos los valles inmediatos, y aumentaron por dos días las aguas del Teno, y precipitándose un pedazo de monte sobre el Gran río Teno. Suspendió su corriente por espacio de diez días y estancadas las aguas, después de haber formado una dilatada laguna que existió durante unos días, se abrió por ultimo con violencia un nuevo camino e inundo todos aquellos campos" (Urrutia y Lanza, 1993).

Las erupciones posteriores del complejo Planchón - Peteroa (1835, 1837, 1869, 1878, 1894, 1937, 1959, 1960, 1962, 1967, 1985, 1986, 1987, 1991), han sido de carácter explosivo, generación de lahares, con columna de tefra, caída de cenizas en la depresión Central y Argentina, sugieren que el volcán Peteroa es muy activo, y que el mayor peligro se concentra en la generación de lahares, que dada la configuración de la red hidrográfica, se movilizarán aguas abajo hacia la depresión central, por los ríos Teno y Claro de acuerdo a lo expuesto por González-Ferrán (1995).

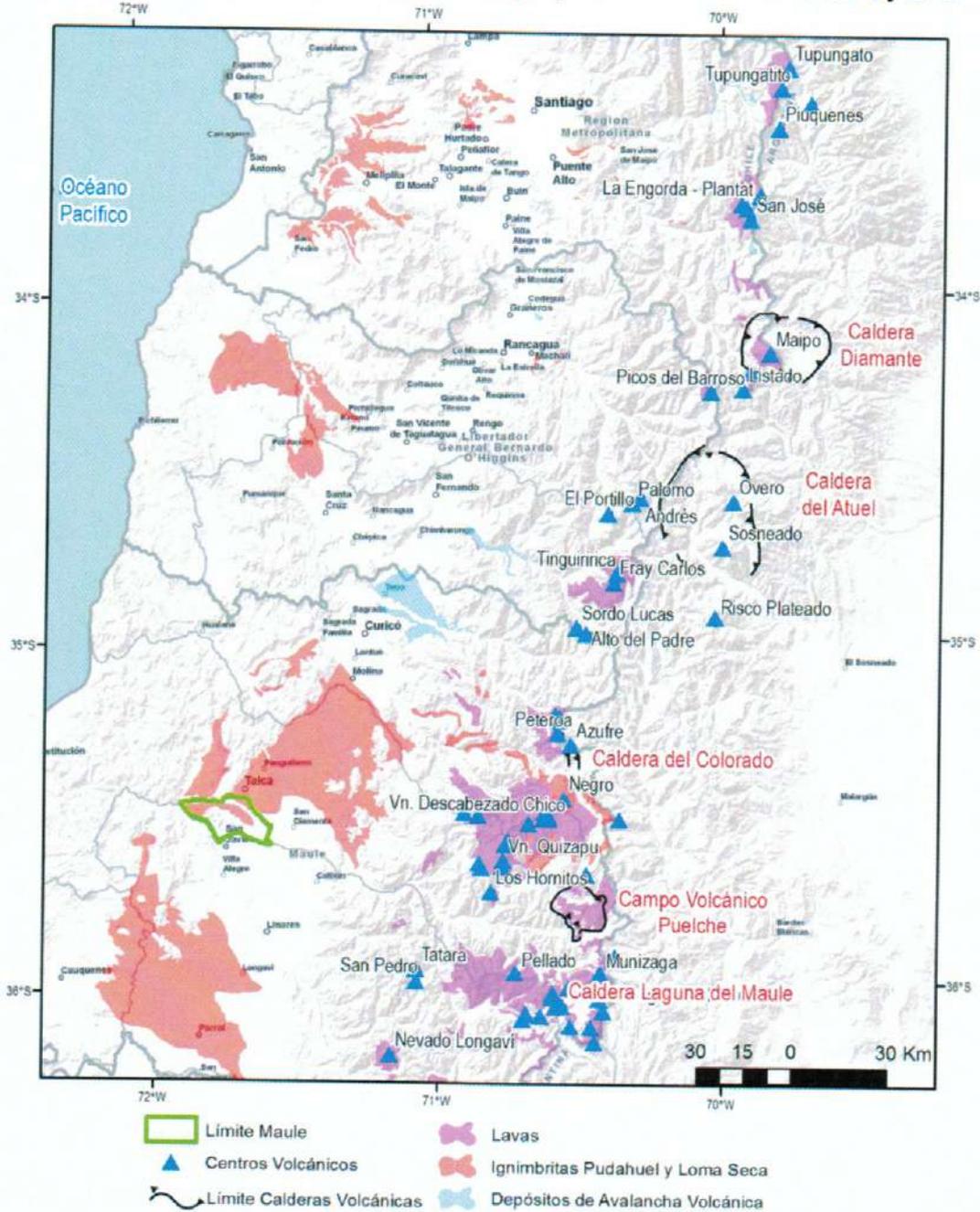
En la parte oriental del área de estudio, el principal agente de peligro volcánico es el cordón de los Descabezados – Azul – Quizapu. El volcán Descabezado Grande ha mostrado fumarolas, sismos y violentas erupciones de cráteres parásitos. Destaca la erupción del 2 de junio de 1932, que generó una columna de tefra de 7 a 8 Km. de altura, con cenizas que alcanzaron la Depresión Central. El volcán Quizapu, ha presentado varias erupciones históricas, donde destacan la erupción de 1846, el ciclo eruptivo de 1907 a 1932 que finaliza con una gran erupción en 1932, y pequeños ciclos eruptivos posteriores. La erupción de 1932 del Quizapu es una de las más explosivas reportadas en Chile Central. Se inició a las 8:00 hrs del 10 de Abril de ese año, con fuertes explosiones y una gran columna de tefra de hasta 30 Km. de altura que fue visible desde la depresión Central hasta Malargüe en Argentina. Las explosiones fueron perceptibles desde Valparaíso a Concepción según la crónica de la época. La caída de ceniza (FIGURA N° 4-13) alcanzo desde Santiago a Buenos Aires el 11 de abril, reportándose que alcanzo la Ciudad del Cabo el 21 del mismo mes. El volumen de Ceniza arrojado a la atmósfera fue calculado en 25 Km³ de material riodacítico, y hasta el día de hoy hay miles de hectáreas cubiertas por tefra y ceniza en las provincias de Talca, Curicó y la pampa Argentina, donde fallecieron miles de vacunos y caprinos, además de la fauna silvestre, junto con la pérdida de hectáreas cultivables (González-Ferrán, 1995).

Las características de las erupciones históricas muestran que el volcán Quizapu se comporta como un volcán explosivo dado el carácter silicio del magma que ha alimentado dos grandes erupciones con solo 86 años de diferencia. El mayor peligro lo constituye la lluvia de tefra, que dada la dirección de los vientos tiende a afectar principalmente los sectores oriente-nororiente, pero en caso de colapso de la columna de tefra puede generar flujos piroclásticos que pueden ser encausados por los valles de los Lontué, Lircay, y el río Blanquillo, que corresponde a un afluente del río Maule

En la FIGURA N° 4-12 se observa que el área de estudio no ha sido afectada por coladas de lava ni por flujos piroclásticos recientes, Sin embargo, en el registro geológico se reconocen las Ignimbritas Pudahuel de 440 ka (Stern et al., 1984) asociadas a la Caldera Diamante y las "Ceniza de Loma Seca". Las "Cenizas Loma Seca" afloran en gran parte de la depresión central y en particular en la comuna de Maule. Este depósito en realidad corresponde a tres grandes flujos piroclásticos de 800.000, 300.000 y 150.000 mil años de antigüedad (Sruoga, 2002), asociados al colapso de esta caldera volcánica, los que generaron depósitos de decenas de metros en gran parte de la Depresión Central al sur de Curicó. Este tipo de erupciones explosivas generan flujos piroclásticos que poseen

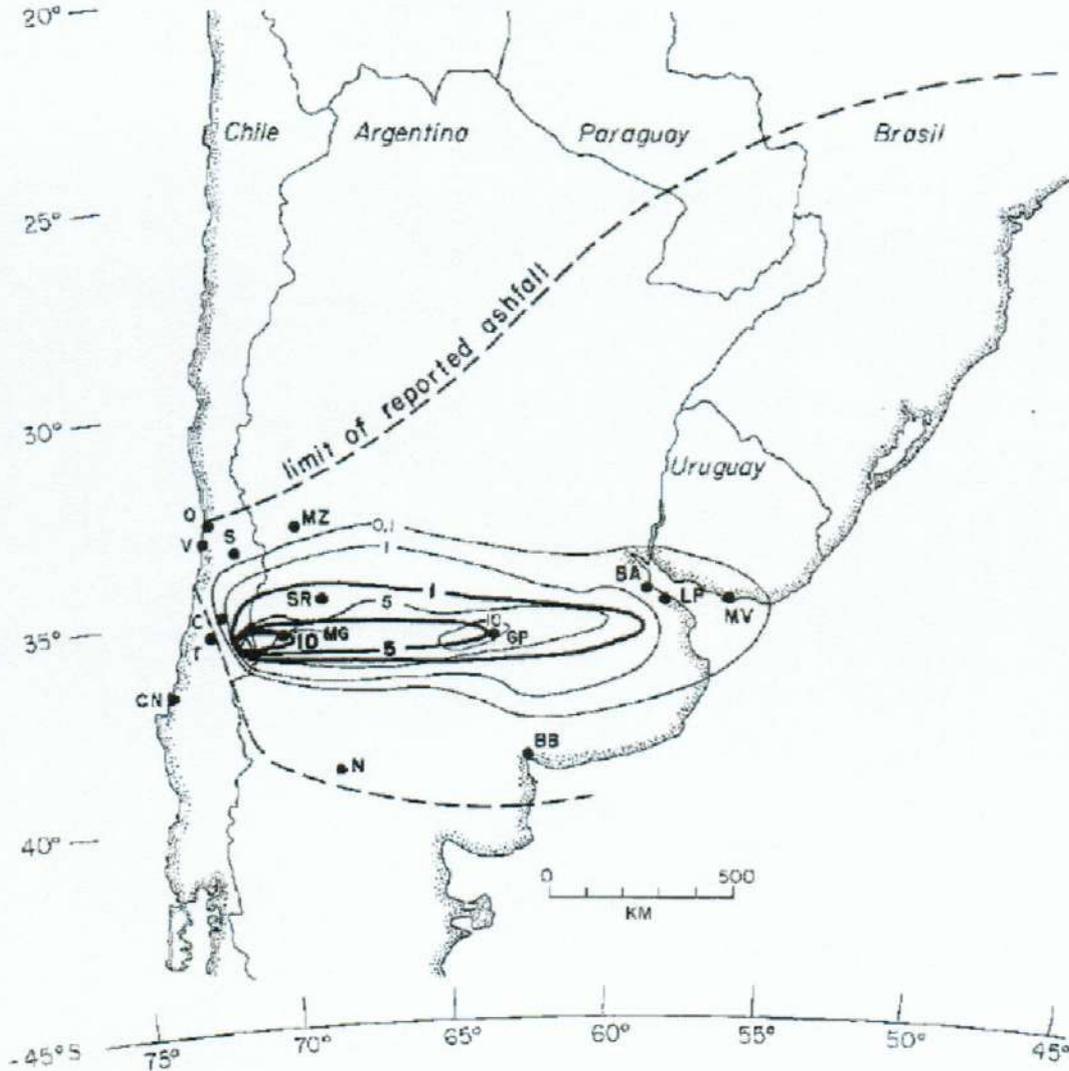
altas velocidades y alcanzan grandes distancias. Es por esto que el peligro volcánico puede existir en una región aunque los volcanes más cercanos estén a kilómetros de distancia.

FIGURA N° 4-12 Principales centros volcánicos y depósitos volcánicos entre los 33° S y 36° S



Fuente: Elaboración propia a partir de González-Ferrán (1995), SERNAGEOMIN (2002) y Eyquem, (2009).

FIGURA N° 4-13 Mapa de Isopacas de erupción de 1.932 del Quizapu, donde se indica el espesor de ceniza acumulada asociado a la erupción en centímetros. BA Buenos Aires; BB Bahía Blanca; C Curicó; CN Concepción; GP General Pico; LP La Plata; MG Malargüe; MV Montevideo; MZ Mendoza; N Neuquén; Q Quintero; S Santiago; SR San Rafael; T Talca; V Valparaíso.



Fuente: : Hildreth y Drake, 1992.

4.3 Procesos Exógenos o Externos de la Tierra - INUNDACIONES

4.3.1 Descripción del Peligro Geológico

Las inundaciones, sin considerar aquellas generadas por causas antrópicas, pueden ser de dos tipos (FIGURA N° 4-14): (1) terrestres, en el sentido de "tierra adentro", en las que aguas dulces anegan territorios al interior de los continentes, y (2) litorales o costeras, en las que aguas marinas o

lacustres-palustres invaden los sectores limítrofes con el dominio terrestre. Los procesos de inundación pueden originarse por varios factores, tales como lluvias intensas durante temporales, pero también pueden originarse por colapso o desbordamiento de represas y canales, marejadas en zonas costeras, o como afloramiento de aguas subterráneas en zonas pantanosas.

Cabe notar que existe una estrecha relación entre los fenómenos pluviométricos estacionales y los fenómenos de avalanchas, rodados, aluviones o erosiones. Los últimos se ven acentuados por el aumento de la capacidad de arrastre de material, por inundación y por desborde de cauces, todos ellos asociados a la activación de quebradas por lluvias ocasionales y que ponen en riesgo a la población en los alrededores.

Un parámetro importante para el mapeo de las zonas susceptibles es el "período de retorno" o "intervalo de recurrencia", que es la probabilidad de ocurrencia de un evento de una magnitud dada en un período de tiempo. Por ejemplo, en la FIGURA N° 4-15 se muestra el perfil transversal de un río, destacando el cauce principal y los distintos niveles de terrazas fluviales. Las líneas discontinuas azules muestran la altura de inundación con su período de retorno en años. Un período de retorno de un año significa que estadísticamente cada año se inundará ese sector, un período de retorno de 5 años, significa que la zona en esta área de influencia debería inundarse una vez cada 5 años (es decir, una probabilidad de 1/5 o 20% anual). Las áreas bajo un período de retorno de 100 años, implica que deberían inundarse una vez cada 100 años (probabilidad 1/100 o 1% anual).

A continuación se presenta una breve descripción de los distintos tipos de inundaciones.

4.3.1.1 Inundación por Desborde de Cauces

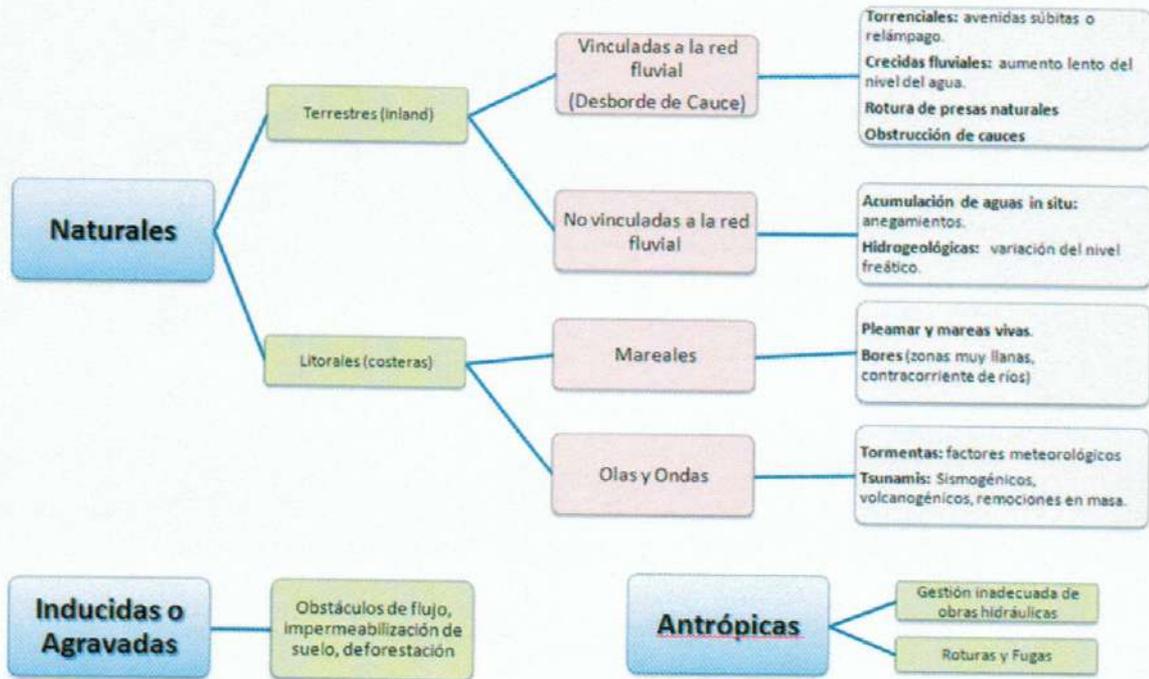
Como su nombre lo indica, estos tipos de fenómenos ocurren cuando ríos o esteros desbordan su cauce natural anegando las terrazas fluviales laterales o adyacentes, debido a la ocurrencia de caudales extremos. Estos fenómenos se producen generalmente debido a eventos de precipitaciones líquidas intensas y/o prolongadas en el tiempo. Los valores que pueden alcanzar los caudales, así como el tamaño del cauce, dependen también de otros factores como del área de la cuenca correspondiente, su forma, la diferencia de cota, la presencia de rocas o sedimentos permeables, etc.

Para este tipo de inundaciones, se pueden identificar dos tipos principales de cauces:

1. Perennes: ríos o esteros con cuencas que abarcan grandes áreas y que tienen sus cabeceras en zonas cordilleranas. Aunque no presenten necesariamente una escorrentía superficial continua, se consideran como perennes dado que la mayoría del flujo escurre en el acuífero ubicado bajo la superficie. Estos presentan cauces de gran extensión, bien definidos, con diferentes niveles de terrazas fluviales, y fácilmente identificables a partir del análisis estereoscópico de fotos aéreas. Las terrazas más altas generalmente están ocupadas por actividades agrícolas o asentamientos humanos.
2. Intermitentes: Esteros y quebradas de escurrimiento temporal como consecuencia directa de precipitaciones intensas. En general, algunas de estas quebradas pueden presentar amenaza por fenómenos de remociones en masa del tipo flujos de detritos, existiendo una estrecha relación entre estos fenómenos e inundaciones por escorrentía torrencial de gran

velocidad. Como se explicará posteriormente, los flujos de detritos, al perder su carga sólida, van transformándose paulatinamente en inundaciones torrenciales. Normalmente no existen estaciones fluviométricas en estos cauces, por lo que la estimación de caudales máximos se debe hacer con modelos matemáticos y estadísticas de precipitaciones máximas de gran intensidad.

FIGURA N° 4-14 Clasificación de los tipos de inundaciones

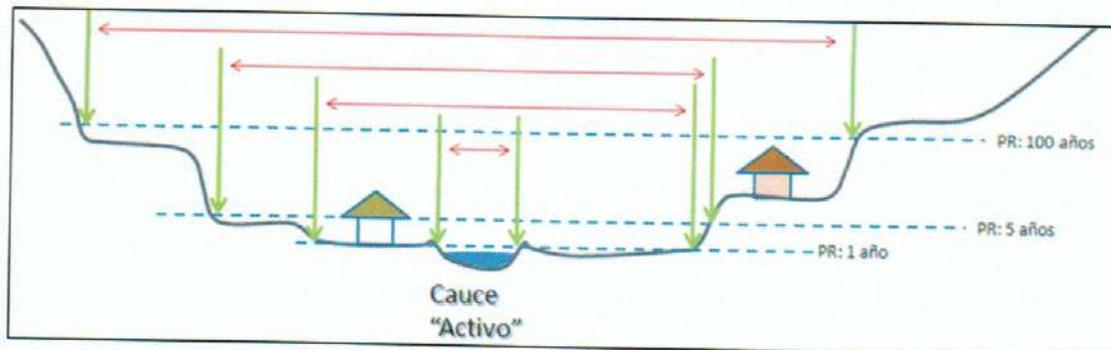


Fuente: Modificado de Díez-Herrero et al. (2008)

Los efectos en la población y sus actividades estarán dados por:

7. Tiempo de aviso: En general, las inundaciones por desborde de cauce tienen un tiempo de aviso suficiente, ya que los procesos de inundación son paulatinos y permiten evacuar a la población.
8. La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno
9. Densidad de población: En caso de que la población se encuentre directamente en la zona de inundación y no sea evacuada oportunamente, pueden ocurrir muertes, heridos, enfermedades, daños estructurales, etc. Si la inundación no afecta directamente a la población, puede producir cortes de camino, daños a la infraestructura sanitaria (por ejemplo, destruir captaciones de agua para el consumo humano) con un costo económico en reparaciones y medidas de mitigación.

FIGURA N° 4-15 Áreas de Inundación y Período de Retorno (PR). Las líneas discontinuas azules muestran la cota de inundación, las flechas verdes y rojas son referenciales para indicar el ancho del área de inundación y los límites



Fuente: Elaboración propia

4.3.1.2 Inundación por Acumulación de Aguas Lluvias en Zonas Llanas, o Anegamiento

Este tipo de inundaciones se producen en zonas deprimidas, de baja permeabilidad, con niveles freáticos someros y deficiente drenaje del terreno, frecuentemente inundadas debido a lluvias intensas y/o prolongadas. Este tipo de inundaciones se asocia a la zona de desembocadura de algunas quebradas, las que son "embalsadas" por caminos y obstrucciones antrópicas. Estas barreras no permiten que el río escurra fácilmente hacia el mar, sino solo de forma subterránea, provocando el ascenso de los niveles freáticos y la formación de zonas pantanosas y humedales. Sólo en eventos de pluviosidades extremas, el caudal transportado por las quebradas tiene la suficiente fuerza para romper esta barrera, atravesándola y provocando inundaciones por desborde de cauces.

En las zonas urbanas consolidadas, las acumulaciones de aguas lluvia ocurren especialmente en cruces viales, donde la evacuación de las aguas lluvias es insuficiente, ya sea por el colapso de los sistemas de colección, acumulación de basuras que obstruyen los desagües, la no existencia de redes de evacuación y vialidad pavimentada, por la diferencia de nivel de las carpetas de rodado en las intersecciones de las calles existentes, o por diseñar las obras de mitigación para un período de retorno no adecuado.

El grado de daño producido por una inundación, dependerá de varios factores:

10. Tiempo de aviso: Los sistemas de emergencia y aviso a la población disminuyen considerablemente la vulnerabilidad social. Por lo demás, en general los procesos de inundación son paulatinos y permiten evacuar a la población.
11. La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno
12. Densidad de población: En caso de que la población se encuentre directamente en la zona de inundación, pueden ocurrir muertes, heridos, enfermedades, daños estructurales, etc. Si

la inundación no afecta directamente a la población, puede producir cortes de camino, daños a la infraestructura sanitaria (por ejemplo, destruir captaciones de agua para el consumo humano) o un costo económico en reparaciones y medidas de mitigación.

4.3.2 Resultados del Catastro de Información Histórica de Inundaciones

Para este peligro, se ubicaron los puntos donde ocurren con mayor frecuencia las inundaciones. En base a la recopilación realizada, se diagnosticó y describió la susceptibilidad para el peligro geológico reconocido en el subcapítulo 5.2.1 "Peligro de Inundaciones".

El clima en la VII Región es templado cálido con estación seca de 4 a 5 meses. La latitud y diferencias del relieve influyen la duración de la estación seca y la precipitación total anual. La estación lluviosa en esta región es principalmente el invierno concentrándose entre el 70% y 75% de la precipitación anual entre los meses de mayo y agosto. El tipo de precipitación es de origen frontal. La estación seca ocurre entre los meses de octubre y marzo período en el que caen menos de 40 milímetros de aguas lluvia por mes.

El peligro reconocido de inundaciones fue determinado principalmente a partir de las características hidrográficas de la zona, identificación de los cauces fluviales activos, áreas de drenaje aportantes a las quebradas, llanura de inundación y terrazas de los cursos fluviales principales. Además, personal de la Dirección de Obras de la Municipalidad de Maule informó cuáles son los sectores que más frecuentemente se ven afectados por inundaciones, ya sean de origen natural (desborde de cauces, anegamientos) o antrópico (desborde de canales). En el caso de Maule éstos sectores corresponden al El Mirador (producto de un inadecuado sistema de evacuación de aguas lluvias) y a la Av. Diego Portales, entre Freire y San Martín (FIGURA N° 4-16). Por otro lado, de acuerdo a lo informado por la Dirección de Obras Municipal, en el sector Culenar-Chacarillas los sectores más propensos a ser afectados por inundaciones corresponden a la Villa Don Pablo y Santa Teresita (FIGURA N° 4-16). Es importante mencionar que, generalmente, estos sectores coinciden con los lugares en que se encuentran los Depósitos Fluviales Activos de Esteros y Quebradas o los Depósitos Fluviales Antiguos (paleo-cauces) que fueron identificados a partir del mapeo geológico (ver capítulo 3.3.2 "Depósitos No Consolidados").

Por otra parte, se reconocieron sectores de anegamiento. Estos fueron determinados a partir del análisis de la topografía, la geología e imágenes de Google Earth. Este reconocimiento además fue complementado con la información proporcionada por la Dirección de Obras de la Municipalidad de Maule.

Se realizó una revisión bibliográfica con el fin de recopilar información para estimar los periodos de retorno asociados a las inundaciones que afectan a la comuna. Sin embargo, los antecedentes disponibles son muy escasos y no se contó con ningún antecedente referente al caso particular de los canales artificiales de las áreas urbanas de la comuna.

Las estimaciones que se pueden realizar son de acuerdo a rasgos más generales de los eventos de inundaciones que comúnmente afectan a Chile Central, donde además, las inundaciones en cuencas pequeñas suelen ser gatilladas por eventos pluviométricos extremos. En Chile Central este tipo de eventos se correlacionan con periodos ENSO (El Niño Southern Oscillation) los cuales suelen tener una recurrencia aproximada de 10 años (Ortlieb, 1994).

4.4 Procesos Externos o Exógenos de la Tierra – REMOCIONES EN MASA

4.4.1 Descripción del Peligro Geológico

El término “remoción en masa” incluye una amplia variedad de procesos que generan el movimiento aguas abajo de los materiales que constituyen las laderas, incluyendo roca, suelo, relleno artificial o una combinación de las anteriores (FIGURA N° 4-17). El movimiento de estos materiales puede ser por caída, volcamiento, deslizamiento, propagación lateral o flujo (PMA: GCA, 2007).

4.4.1.1 Desprendimientos o Caída de Rocas

Los desprendimientos o caída de rocas son remociones en masa en las cuales bloques de rocas o suelo se desprenden a partir de laderas de altas pendientes, como cornisas o acantilados rocosos, para luego desplazarse en caída libre, al menos en parte de su trayectoria (Hauser, 2000). Normalmente, las superficies de rotura corresponden a planos de estratificación, cuya inclinación es superior a su ángulo de fricción interna, con proyección libre a la cara del talud. Entre las zonas susceptibles a sufrir desprendimientos o caídas de rocas destacan los flancos de quebradas profundas, labradas en secuencias estratificadas con niveles más duros hacia el techo, expuestas a erosión fluvial, o acantilados costeros expuestos a erosión marina.

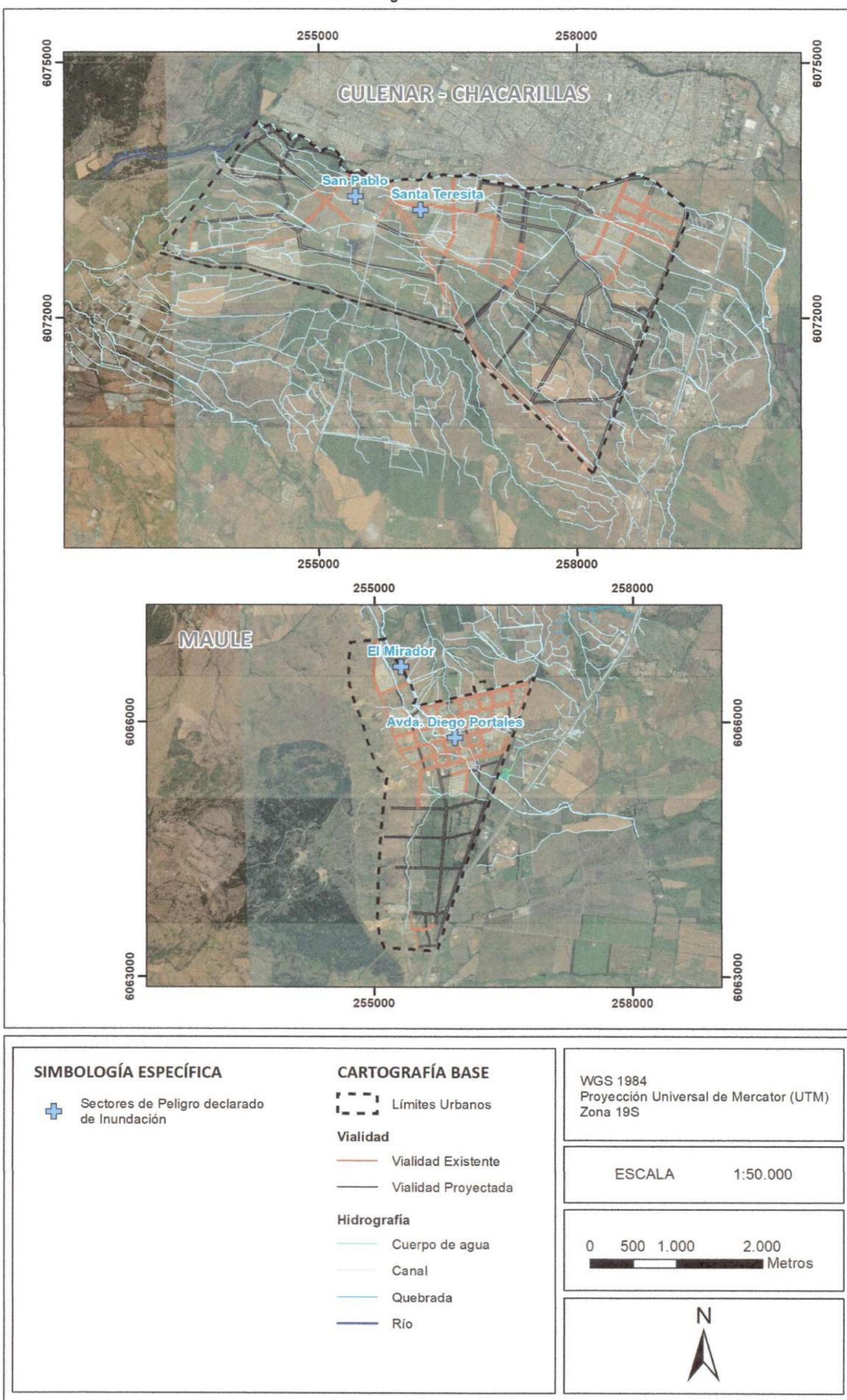
La gravedad es el principal motor del peligro de caída de rocas. Como éste es un proceso gravitacional depende de leyes de fricción y es, por consiguiente, caótico. Dentro de los factores desencadenantes destacan los grandes sismos que pueden generar numerosos desprendimientos a partir de laderas con fuerte inclinación y con condiciones geológicas y estructurales favorables.

La caída de bloques o desprendimientos, puede producir una serie de efectos en personas, desde contusiones menores hasta la muerte, dependiendo del tamaño del bloque y la fuerza con que éste cae. En el caso de estructuras, por lo general los daños son casi nulos, pero puede producirse la rotura de vidrios o daños a muros en función del tamaño del bloque y la distancia recorrida por éste.

Además, al caer un bloque en el camino puede producirse un accidente debido a maniobras de conducción para evitarlo.

En general, este peligro presenta una vulnerabilidad social, económica y estructural menor que otros peligros geológicos. Además, afecta a escala local, pero tiene una mayor incidencia debido a que su recurrencia es alta. En este peligro, el tiempo de aviso es mínimo, pero se puede mitigar indicando que la zona es susceptible a ser afectada por caída de bloques.

FIGURA Nº 4-16 Sectores donde comúnmente se registran inundaciones en el área urbana de la localidad de Maule



Fuente: Elaboración propia en base a información proporcionada por la Dirección de Obras Municipal

4.4.1.2 Deslizamientos

Los deslizamientos son remociones en masa en las cuales las masas de suelo o roca se deslizan principalmente a lo largo de superficies de ruptura, al superarse la resistencia al corte, generando el movimiento del material en su conjunto (Hauser, 2000). Los volúmenes incluidos en estas remociones varían desde algunas decenas hasta varios millones de metros cúbicos y pueden adquirir magnitud catastrófica.

Estos fenómenos pueden ocurrir de varias formas dependiendo de las propiedades del material y las características geológicas y geomorfológicas del entorno, siendo principalmente divididos en rotacionales y traslacionales (FIGURA N° 4-18). Esto implica que las superficies de ruptura son ya sea curvas y cóncavas o a lo largo de un plano o superficie ondulada, respectivamente.

Estos fenómenos incluyen los deslizamientos que ocurren durante el retroceso de terrazas fluviales producto de la erosión fluvial o el retroceso de acantilados costeros por erosión marina basal, en especial al desarrollo de terrazas de abrasión. Este proceso es causado por la fuerza de las olas, las que cavan cavernas y desestabilizan el bloque superior, provocando que éste caiga por su propio peso. Ello produce además que el acantilado costero se encuentre en constante retroceso, lo que permite definir como zona de alta susceptibilidad todas las áreas cercanas al acantilado costero. Los mismos procesos de erosión ocurren en valles con erosión fluvial activa.

Los factores condicionantes de un deslizamiento corresponden principalmente a: los factores intrínsecos del suelo y la roca, las características geológicas (litología, estructuras, grado de alteración y meteorización, etc.), los factores geomorfológicos (pendiente, aspecto, curvatura, elevación, entre otros), la cantidad y tipo de vegetación y el grado de humedad y posición del agua subterránea.

Por otro lado, estos fenómenos pueden ser generados por factores externos, denominados factores desencadenantes o gatillantes, tales como eventos hidrometeorológicos, sísmicos y actividad antrópica (excavaciones para caminos, canales, terraplenes, etc.).

Los daños en el medio antrópico producto de un deslizamiento que afecta a un área determinada, estarán dados por el volumen de material desplazado durante el proceso y la velocidad con la que se produce el deslizamiento. El grado en que un deslizamiento afecta a la población depende de:

13. Distancia al origen del fenómeno: Por lo general, los deslizamientos son procesos que afectan un área limitada (radios menores a 1 km., incluso menores a 500 m). Hay que considerar que este punto depende directamente del tamaño de volumen desplazado.
14. La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno: En general, dado que estos procesos son de alta velocidad los daños potenciales son altos.
15. Densidad de población: A mayor densidad de población y área expuesta susceptible de ser afectada, mayores serán los daños esperados. Si la población se encuentra directamente en el área de alcance de un deslizamiento, la vulnerabilidad, estructural y económica es muy alta ya que la pérdida de vidas, viviendas y productividad son efectos típicos de este peligro

geológico. Por otro lado, si un deslizamiento afecta a caminos, acueductos o líneas eléctricas puede producir aislamiento, enfermedades gastrointestinales y pérdidas económicas en general para la población.

16. Tiempo de aviso: En este proceso, sin estudios de detalle, el tiempo de aviso es casi nulo.

4.4.1.3 Flujos de Detritos y Barro

Los flujos de detritos, referidos comúnmente como 'aluviones', son remociones en masa que ocurren cuando una masa de sedimentos con mala clasificación, agitados y saturados con agua, se movilizan pendiente abajo como flujos viscosos de sedimentos concentrados (Antinao et al. 2002). Los flujos de detritos usualmente son descritos como fluidos no-newtonianos o plásticos de Bingham, donde la fracción sólida varía generalmente entre 50 a 90% en volumen (Costa, 1984). En los casos en que la granulometría del material transportado sea predominantemente fina estos flujos se conocen como flujos de barro.

Las partículas sueltas que cubren pendientes desnudas y otros depósitos detríticos no consolidados, disponibles dentro de la cuenca de recepción, son transportadas hacia el cauce principal donde continúa su movimiento. Se remueven así depósitos de gravas y arenas sueltas del lecho, hasta alcanzar el área de depositación, que corresponde al sitio de salida de dichas quebradas a zonas más llanas donde se forman abanicos aluviales. Con la disminución de la pendiente, a medida que aumenta la distancia desde su fuente, los flujos van perdiendo su carga sólida de mayor granulometría, por lo que van pasando paulatinamente a flujos de barro y finalmente a inundaciones o flujos hiperconcentrados donde la fracción sólida varía generalmente entre 1 a 25% en volumen (Pierson y Scott, 1985).

Para la ocurrencia de flujos de detritos es necesario que exista una cuenca donde se colecten los aportes de lluvia y una zona de acumulación de material donde los detritos se acopien para ser posteriormente transportados en el caso de que se cumpla alguna condición desencadenante.

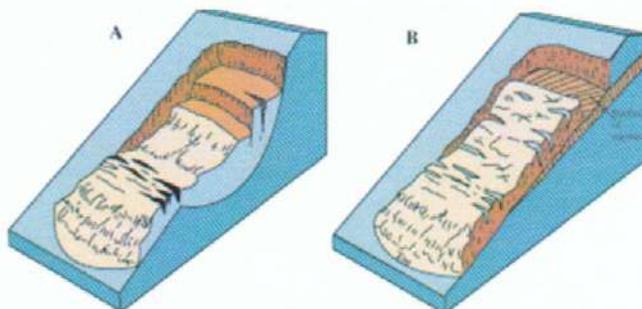
En Chile, el factor desencadenante más común de flujos de detritos son las lluvias esporádicas, de corta duración y de intensidad excepcional. Por otro lado, en nuestro país existen muy pocos estudios que relacionen las intensidades de precipitaciones y este tipo de fenómenos, debido, principalmente, a los escasos registros de intensidad de precipitaciones y de flujos de detritos históricos. Sólo durante las últimas décadas se han instalados pluviógrafos que miden la intensidad instantánea u horaria de precipitaciones (mm por hora). Sólo se disponen de registros más sostenidos en el tiempo de precipitaciones diarias (mm en 24 horas). Esto dificulta los análisis de relación a estas variables ya que a veces basta una lluvia "corta" pero extremadamente intensa para generar un flujo de detritos.

FIGURA Nº 4-17 Clasificación de tipos de remoción en masa en relación al movimiento que lo origina y el material constituyente de la ladera

Material		ROCA	DETRITO	SUELO
Tipo de movimiento				
CAIDA		Caída de roca	Caída de detritos Guijarros Cono de detrito	Caída de suelo Cono de detrito Coluvio
	VOLCAMIENTO	Volcamiento de roca	Volcamiento de detrito Cono de detrito	Volcamiento de tierra Cono de detrito
DESPLAZAMIENTO	Rotacional	Deslizamiento rotacional simple (slump) Superficie de cizallo	Deslizamiento rotacional múltiple Cima Escarpe menor Superficie de cizallo	Deslizamientos rotacionales sucesivos
	Traslacional (planar)	Deslizamiento de roca	Deslizamiento de detrito	Deslizamiento de suelo
PROPAGACION	<p>Estructura subhorizontal normal Quebradas Cobertura de roca Limolita arcillosa Adegazamiento de estratos Plano de despegue Sustrato competente</p>			Propagación de suelo
FLUJO	Solifluxión (Flujo de detritos periglacial)	Flujo de detritos		Flujo de suelo (Flujo de barro)
COMPLEJO	p.ej.: Deslizamiento de suelo con detritos de caída de rocas		p.ej.: Deslizamiento rotacional/traslacional compuesto, gradando a flujo de suelo hacia el pie	

Fuente: Clasificación utilizada por el British Geological Service, modificada de Varnes (1978) y Cruden y Varnes (1996). Disponible en: http://www.bgs.ac.uk/landslides/how_does_BGS_classify_landslides.html

FIGURA N° 4-18 Ejemplos de deslizamientos. A. Deslizamiento Rotacional, B. Deslizamiento traslacional



Fuente: Modificado de Landslide Types and Process, USGS. Fact Sheet 2004-3072. Disponible en: <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/images/fig3grouping-2LG.jpg>

Los flujos o "aluviones" del 18 de Junio de 1991 en Antofagasta y del 3 de Mayo de 1993 en la Quebrada de Macul en Santiago Oriente son ejemplos de eventos que han suscitado el interés nacional tanto por el alto grado de daños materiales como el costo de vidas humanas. Estos eventos han sido, por otra parte, un aporte para el conocimiento de los umbrales de intensidad de precipitaciones mínimas para la generación de flujos de detritos en Chile. En el caso de Antofagasta, en una de las zonas más secas del país, se estimaron precipitaciones mínimas de 30 mm en 24 horas para la generación de flujos de detritos (Hauser, 1997). En el caso de Santiago Oriente, se contó con datos pluviográficos más precisos, donde se registraron casi 10 mm en una sola hora (Naranjo y Varela, 1996). Anteriormente, para la Región Metropolitana se estimó un mínimo de 60 mm en 24 horas para la generación de flujos de detritos (Hauser, 1985).

Si bien los casos anteriores se encuentran fuera del área de estudio, cabe destacar que corresponden a los pocos eventos donde se ha relacionado cuantitativamente la ocurrencia de estos fenómenos y la intensidad de precipitaciones. Sin embargo, estos constituyen datos valiosos en cuanto a los umbrales de intensidad de precipitaciones en las que se podrían generar flujos de características catastróficas.

El grado de daño producido por un flujo dependerá de varios factores:

17. Tiempo de aviso: Los sistemas de emergencia y alerta a la población disminuyen considerablemente la vulnerabilidad social. Si se tienen mediciones continuas de la intensidad de precipitación, será posible alertar a la población de que existe la posibilidad de que se genere un flujo, entregando quizás minutos valiosos que podrían salvar vidas.
18. Distancia al origen del fenómeno: Mientras más alejado sea el origen, y si se cuenta con sistemas de emergencia y alerta a la población, se puede disminuir la vulnerabilidad social.
19. La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno (tamaño del flujo): Un flujo de mayor tamaño y rápido tiene mayor capacidad de afectar a una población que uno más pequeño y lento.

20. Densidad de población en la zona susceptible a ser afectada: En caso de que la población se encuentre directamente en el cauce del flujo, los daños pueden ser catastróficos, ya que pueden producirse muertes, heridos, enfermedades, daños estructurales mayores, etc., como se observó en los casos de Antofagasta (1991) y Quebrada de Macul (1993). Si el cauce no afecta directamente a la población, puede producir cortes de camino, daños a la infraestructura sanitaria (por ejemplo, destruir captaciones de agua para el consumo humano) o un costo económico en reparaciones y medidas de mitigación.

Este peligro geológico será tratado en conjunto con el peligro de inundación por desborde de cauce, ya que estos dos eventos comparten una serie de características comunes que permiten estudiarlos como un mismo proceso.

4.4.2 Resultados del Catastro de Información Histórica de Remociones en Masa

Para el caso de las remociones en masa se describen los eventos reportados, así como su ubicación espacial. En base a la recopilación realizada, se diagnosticó y describió la susceptibilidad para el peligro geológico reconocido en el subcapítulo 5.2.2 "Peligro de Remociones en Masa".

Este tipo de procesos se analizó mediante el análisis de fotografías aéreas e imágenes satelitales, la visita a terreno y la recopilación histórica de peligros geológicos. En el área de estudio no se identificaron depósitos de remociones en masa recientes, pero sí se reconocieron depósitos de remociones en masa antiguos en el sector occidental del área urbana de la localidad de Maule, los que fueron mapeados como "Depósitos Coluviales y de Piedemonte" (ver capítulo 3.3.2 "Depósitos No Consolidados"). Los sectores donde se encuentran estos depósitos actualmente presentan pendientes bajas (<15°) a moderadas (15°-25°).

5 DIAGNÓSTICO Y ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS PELIGROS GEOLÓGICOS QUE PUEDEN AFECTAR EL ÁREA DE ESTUDIO

Los peligros reconocidos en la zona de estudio se pueden diferenciar en dos grupos:

- Peligros No Zonificables a escala comunal (escala de trabajo mayor a 1:50.000) casos en los que no se pueden zonificar a escala urbana o que requerirían estudios de mayor detalle para poder determinar una zonificación de la susceptibilidad.
- Peligros Zonificables a escala comunal (escala de trabajo mayor a 1:25.000): casos en los que se puede categorizar la susceptibilidad y por lo tanto determinar una zonificación de la misma (PLANO N°3 y N°4 fuera de texto).

5.1 Peligros No Zonificables

5.1.1 Peligro Sísmico

Considerando lo discutido anteriormente se puede concluir que el área de estudio ha sido afectada por sismos importantes, al igual que casi todo Chile. Con la liberación de energía acumulada por el terremoto del 27 de febrero de 2010, se estima poco probable a corto plazo la ocurrencia de un sismo de subducción de magnitud importante que afecte a la zona, pero considerando que estos fenómenos son recurrentes y propios de la dinámica de subducción en que se encuentra Chile, no debe descartarse la ocurrencia de este tipo de fenómenos en la planificación a mediano y largo plazo. En general, en este peligro, el tiempo de aviso es mínimo, el daño será proporcional a población que habita y a la infraestructura presente en la zona afectada.

Tanto los sismos de profundidad intermedia como los sismos corticales, son muy poco probables en la zona de estudio, pues sólo existe escasa evidencia de ocurrencias anteriores. Sin embargo, los mecanismos generadores de este tipo de sismos son poco conocidos, y no puede descartarse un evento importante en el futuro.

Durante el siglo XX y XXI ocurrieron 7 sismos de subducción de magnitudes mayores a 7 en escala Richter (los terremotos de 1906, 1928, 1949, 1953, 1960, 1985 y 2010), lo que da un período de retorno de aproximadamente 17 ± 8 años.

5.1.2 Peligro Volcánico

El peligro asociado a volcanismo que más probablemente puede afectar el área de estudio es la caída de tefra producto de la erupción de alguno de los volcanes activos ubicados entre los 33° y los 40°S, así como el encauzamiento de lahares producidos por la erupción volcánica. Con el objetivo de definir las áreas susceptibles a ser afectadas de peligro volcánico durante el desarrollo del PRI de Talca se definieron 3 tipos de zonificación: Peligro Volcánico directo por erupción volcánica, zona de caída de cenizas, y sectores por donde se encauzarían lahares y flujos piroclásticos.

El área más afectada durante una erupción volcánica corresponde al radio de 20 kilómetros alrededor del cono volcánico, que se define como el área más expuesta a una erupción volcánica

(FIGURA N° 5-1). En esta área pueden ocurrir deslizamientos asociados a la actividad sísmica, caída de bombas piroclásticas, además de caída de cenizas y tefra. Además, en este sector se puede generar el derretimiento de hielos, los que dan paso a lahares e inundaciones. Por otro lado, se define una parábola para indicar el sector hacia donde se dispersarían principalmente las cenizas en función de los datos de erupciones histórica (FIGURA N° 5-1).

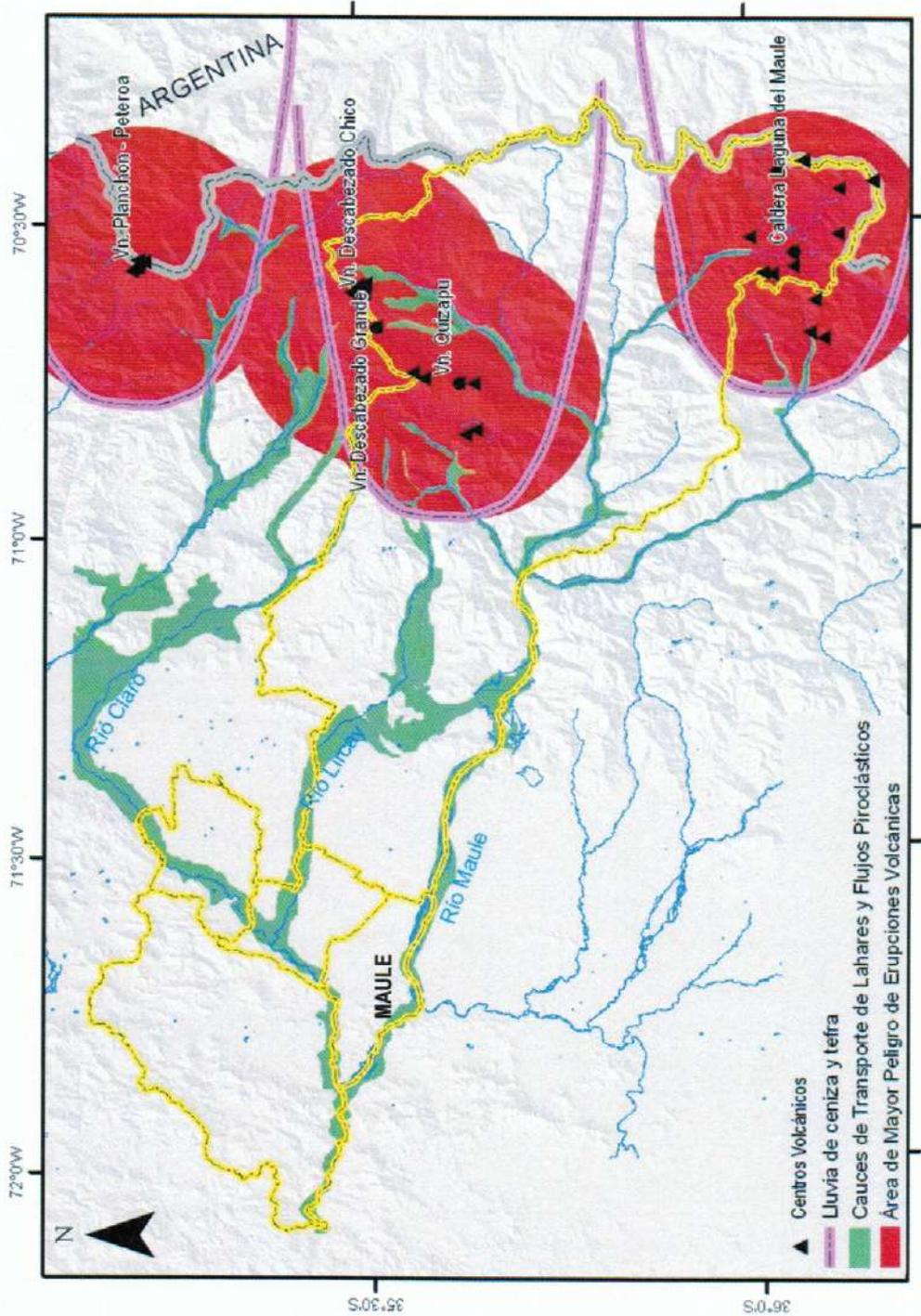
En la mayoría de los casos, las cenizas se dispersan hacia Argentina, pero dependiendo de cambios en la dirección del viento, pueden caer hacia la Depresión Central (véase caso del Quizapu en 1932). Finalmente, a modo ilustrativo, se definieron los cauces principales por donde pueden encauzarse los lahares y flujos piroclásticos. El alcance de estos estará dado por los siguientes factores:

- Lahares: Cantidad de nieve o hielo en las zona cercana a la erupción. Estos pueden originarse en cualquier acumulación de nieve o hielo, basta que el hielo entre en contacto con la ceniza o lava para que se funda y escurra aguas abajo.
- Flujos piroclásticos: Dependerá de la altitud de la columna de tefra, mientras más alta sea esta, mayor es la energía potencial acumulada, la que al colapsar la columna se transformará en energía cinética.

Cabe destacar que los flujos piroclásticos y lahares son capaces de remontar el relieve, por lo que la zonificación planteada solo demarca las vías de flujo preferencial y no considera la colmatación del cauce.

Dada la distancia de la zona a los centros volcánicos activos se considera baja la probabilidad de que algún otro peligro volcánico afecte el área. Sin embargo, debe tenerse en cuenta la presencia de los depósitos de cenizas volcánicas correspondientes a la Ceniza Loma Seca, los cuales son producto de una gran erupción ocurrida cientos de miles de años atrás. Eventos de tal magnitud son de una recurrencia muy baja que se estima como poco probable que ocurra en el corto plazo, sin embargo son procesos extremadamente destructivos que no pueden dejar de ser considerados en planes de emergencia y evacuación.

FIGURA N° 5-1 Mapa de distribución de Peligros Volcánicos. Las líneas amarillas representan los límites comunales



Fuente: Dirección Meteorológica de Chile.

5.2 Peligros Zonificables

5.2.1 Peligro de Inundaciones

Las principales inundaciones que han afectado al área de estudio tienen relación con desbordes de cauces, ya sean naturales o artificiales, y generalmente se manifiestan con una frecuencia anual.

Con respecto a las inundaciones por desbordes de cauces artificiales (canales), éstas no corresponden a un peligro geológico en sentido estricto, pero fueron consideradas en este estudio, debido a que personal de la Dirección de Obras Municipal informó que este tipo de fenómenos son uno de los problemas más frecuentes y que mayores daños causan en la comuna. Además, los canales artificiales generan suelos saturados en agua, los cuales presentan un mal comportamiento geotécnico, tal como quedó demostrado para el terremoto del 27 de febrero del 2010, donde la mayor parte de los daños a viviendas se registraron en los sectores aledaños a canales artificiales. Por ello, se decidió incorporar en la zonificación a los canales artificiales y se realizó una revisión de antecedentes legales y de normativas, tanto de Chile como el resto del mundo.

El Código de Aguas entrega las principales directrices de los usos permitidos y de la normativa vigente para el uso de este recurso natural., señalando en su artículo 5º que "las aguas son bienes nacionales de uso público y se otorga a los particulares el derecho de aprovechamiento de ellas en conformidad a las disposiciones del presente código".

Los códigos más relevantes para la gestión de canales artificiales e inundaciones corresponden a los Artículos 92, 304 y 305, detallados a continuación:

- **Art. 92.** *Prohíbese botar a los canales sustancias, basuras, desperdicios y otros objetos similares, que alteren la calidad de las aguas. Será responsabilidad de las Municipalidades respectivas, establecer las sanciones a las infracciones de este artículo y obtener su aplicación. Además, dentro del territorio urbano de la comuna las Municipalidades deberán concurrir a la limpieza de los canales obstruidos por basuras, desperdicios u otros objetos botados en ellos.*
- **Art. 304.** *La Dirección General de Aguas tendrá la vigilancia de las obras de toma en cauces naturales con el objeto de evitar perjuicios en las obras de defensa, inundaciones o el aumento del riesgo de futuras crecidas y podrá ordenar que se modifiquen o destruyan aquellas obras provisionales que no den seguridad ante las creces. Asimismo, podrá ordenar que las bocatomas de los canales permanezcan cerradas ante el peligro de grandes avenidas. Podrá igualmente adoptar dichas medidas cuando por el manejo de las obras indicadas se ponga en peligro la vida o bienes de terceros. Con tal objeto podrá ordenar también la construcción de las compuertas de cierre y descarga a que se refiere el artículo 38, si ellas no existieren.*
- **Art. 305.** *La Dirección General de Aguas podrá exigir a los propietarios de los canales la construcción de las obras necesarias para proteger caminos, poblaciones u otros terrenos de interés general, de los desbordamientos que sean imputables a defectos de construcción o por una mala operación o conservación del mismo. Con todo, si los desbordamientos se*

debieran a hechos, u obras ajenas al canal y posteriores a su construcción, las protecciones que sea necesario efectuar no serán de cargo de los propietarios del cauce.

Por otro lado, la Comisión de Productos Forestales de Idaho (IFPC, por sus siglas en inglés), sugiere el uso de franjas de protección de cauces y canales (ZPC), que varían entre 5 y 75 pies de ancho (1,5 y 23 metros), dependiendo del tamaño del canal[§].

De acuerdo a lo anterior, se decidió establecer una franja de protección en torno a los canales artificiales.

Luego, a partir del análisis de fotografías aéreas e imágenes satelitales, el mapeo geológico y la información proporcionada por la Dirección de Obras Municipal, se determinó la siguiente zonificación de susceptibilidad (FIGURA N° 5-2 y FIGURA N° 5-3):

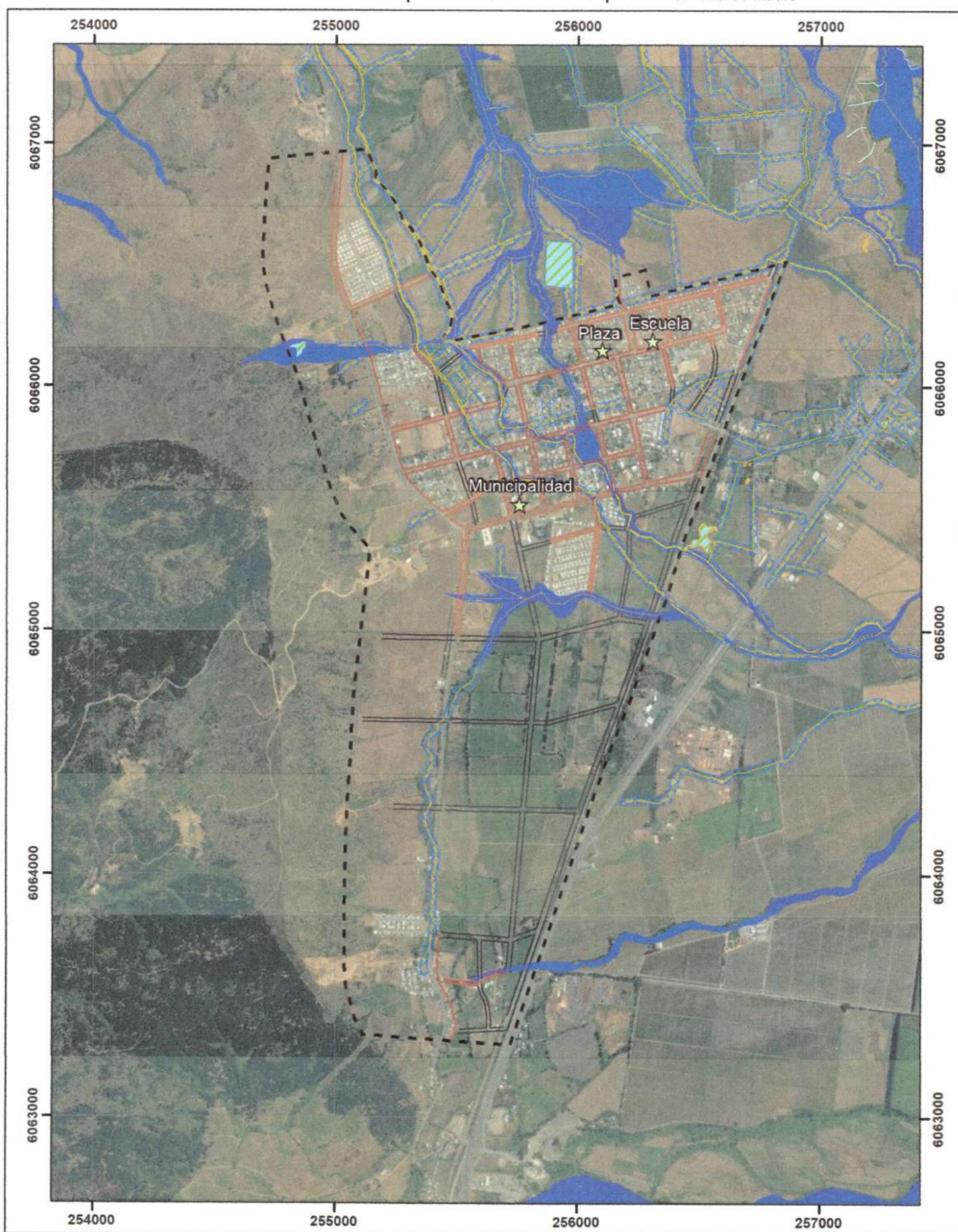
- **Inundación por Desborde de Cauces Naturales:** Sectores de cauces fluviales naturales de ríos, esteros y quebradas. Geológicamente corresponden a depósitos fluviales activos y depósitos fluviales antiguos (paleo-cauces).
- **Inundación por Desborde de Canales Artificiales:** Áreas ubicadas a menos de 15 m de canales artificiales.
- **Anegamiento:** Áreas anegables correspondientes a humedales y/o zonas deprimidas, ya sean naturales o de origen antrópico.

En este estudio no se realizaron modelos hidrológicos debido a la falta de series de precipitación, caudales o antecedentes históricos. Por ello, no se realizaron mapas de peligrosidad o amenaza de inundaciones considerando el período de retorno y analizando el alcance máximo lateral del área de inundación sino que se tuvieron en cuenta, en el caso de los cauces naturales, las expresiones geomorfológicas y los depósitos asociados a cauces fluviales. Las estimaciones que se pueden realizar, en base a los escasos antecedentes disponibles, son de acuerdo a rasgos generales de los eventos de inundaciones que comúnmente afectan a Chile Central, donde las inundaciones en cuencas pequeñas suelen ser gatilladas por eventos pluviométricos extremos. En Chile Central este tipo de eventos se correlacionan con períodos ENSO (El Niño Southern Oscillation) los cuales suelen tener una recurrencia aproximada de 10 años (Ortlieb, 1994).

Con respecto a las inundaciones por desbordes de canales artificiales, como ya se ha mencionado, éstas tienen como factor desencadenante a los eventos pluviométricos extremos. Sin embargo, otro factor muy importante, que puede actuar como condicionante o desencadenante, es la gestión y manejo de estos cursos de agua, ya que si no se realiza un adecuado diseño, mantenimiento y limpieza, los canales verán dificultado su curso, lo que se traducirá en desbordes e inundaciones. Estos aspectos se relacionan únicamente con la gestión que se efectúe, lo que está fuera de los alcances de este estudio.

[§] <http://www.idahoforests.org/streams03.htm> accesado el 24 Agosto 2011

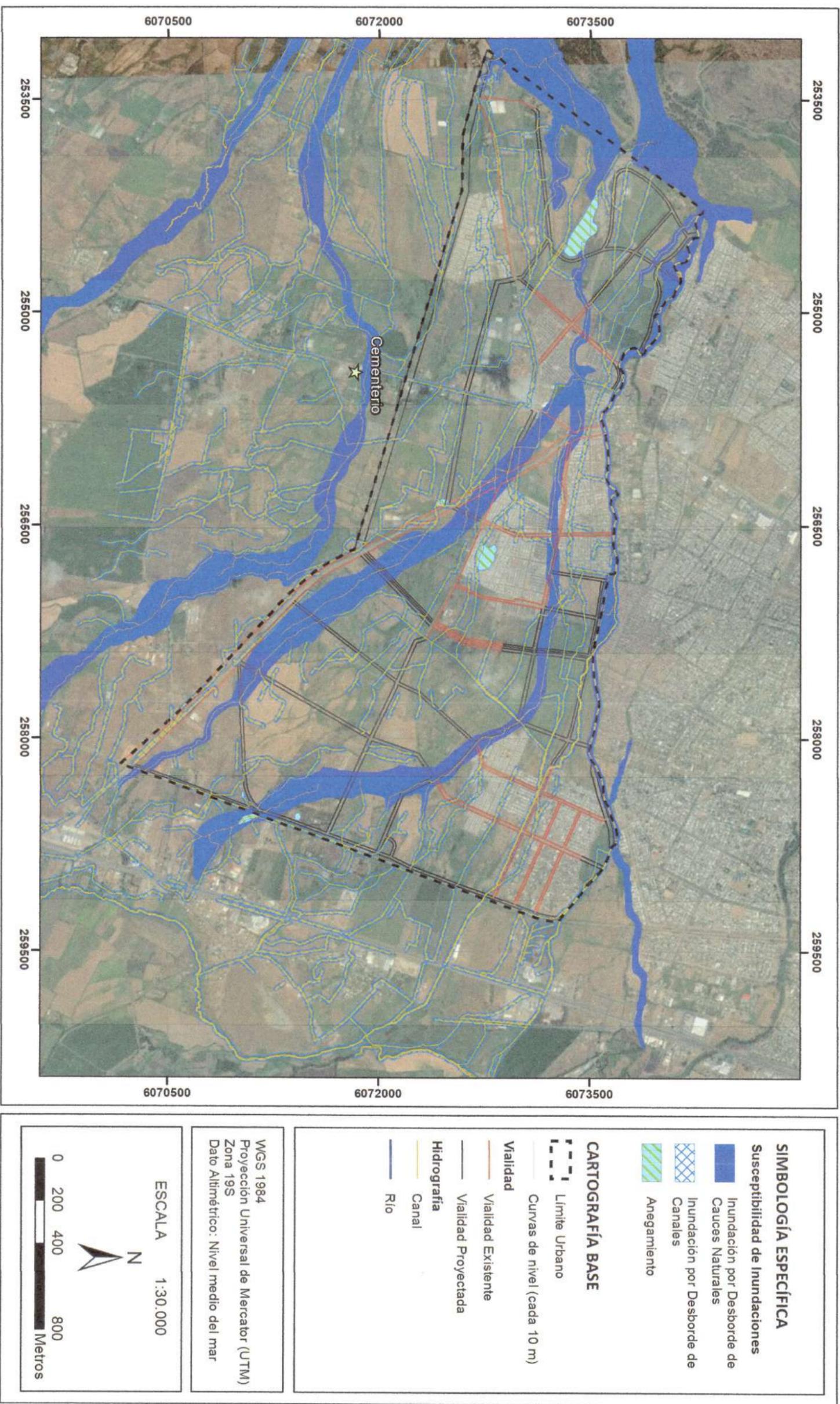
FIGURA Nº 5-2 Zonas de susceptibilidad de inundaciones para la localidad de Maule



SIMBOLOGÍA ESPECÍFICA Susceptibilidad de Inundaciones Inundación por Desborde de Cauces Naturales Inundación por Desborde de Canales Anegamiento		CARTOGRAFÍA BASE Límite Urbano Curvas de nivel (cada 10 m) Vialidad Vialidad Existente Vialidad Proyectada Hidrografía Cuerpo de agua Canal Quebrada		WGS 1984 Proyección Universal de Mercator (UTM) Zona 19S
		ESCALA 1:20.000		

Fuente: Elaboración propia

FIGURA Nº 5-3 Zonas de susceptibilidad de inundaciones para el sector Culenar-Chacarillas



Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Peligro de Remociones en Masa

En el presente estudio se identificaron las zonas susceptibles de generar deslizamientos y caídas de bloques, y todas aquellas zonas susceptibles de ser alcanzadas por estos procesos generados inmediatamente pendiente arriba.

Los deslizamientos principalmente están asociados a laderas poco estables, especialmente en intrusivos graníticos meteorizados o con cobertura de suelo. No se reconocieron procesos de este tipo gatillados por el terremoto del 27 de febrero de 2010, pero sí depósitos antiguos que pueden haber sido gatillados por otros sismos.

Para la zonificación de los sectores susceptibles de ser afectados por deslizamientos y caídas de bloques se realizó un análisis de fotografías aéreas, se realizó una visita a terreno, se utilizó la cobertura topográfica disponible (1:2.000 en algunos sectores o en su defecto 1:30.000) y se revisaron estudios previos que documentan la ocurrencia de este tipo de procesos en la región.

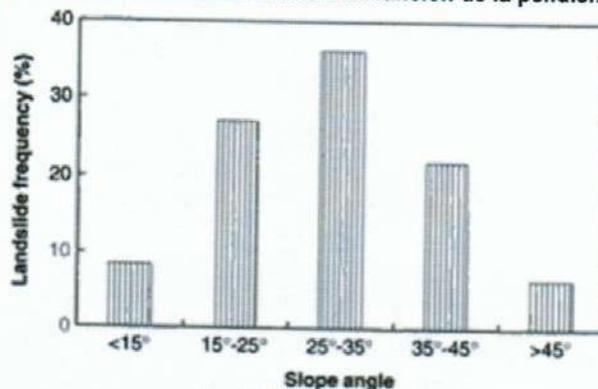
En el área de estudio afloran materiales geológicos que, producto de un intenso proceso de meteorización, se han transformado en suelos con un potente manto de material con poca cohesión. Esta situación provoca que todos los sectores con pendientes elevadas (laderas de cerros y escarpes) constituyen factores condicionantes para la generación de remociones en masa de diversas magnitudes (Naranjo et al., 2006). Considerando además la intervención antrópica en las laderas (excavaciones, modificaciones del drenaje natural, construcción de caminos sin sistemas de drenaje de aguas adecuados), se tienen las condiciones ideales para la generación de remociones en masa. Los eventos sísmicos y los eventos de precipitaciones intensas, y ocasionalmente con precipitaciones antecedentes abundantes que han saturado los suelos del terreno (e.g., Naranjo et al., 2006), constituyen los factores desencadenantes de este tipo de remociones en masa.

Para diferenciar que pendientes son las más susceptibles, se utilizó la información compilada a partir de diversas fuentes que han generado catastros de deslizamientos en distintos lugares del mundo. Esaki et al (2005) y Giraud y Shaw (2007), así como varios catálogos de deslizamientos, indican que la mayor frecuencia de deslizamientos se observa sobre pendientes de 25° a 35° de inclinación (FIGURA N° 5-4).

Considerando lo anterior y los antecedentes recopilados, se zonificó la susceptibilidad de generación de deslizamientos y caída de bloques (FIGURA N° 5-5 y FIGURA N° 5-6) de acuerdo a los siguientes criterios:

- **Zonas de Moderada Susceptibilidad de Generación:** Corresponde a sectores donde la pendiente se encuentra entre 15° y 25°.
- **Zonas de Alta Susceptibilidad de Generación:** En sectores de alta pendiente (de 25° a 35°).
- **Zonas de Muy Alta Susceptibilidad de Generación:** En sectores de muy alta pendiente (sobre 35°)

FIGURA N° 5-4 Frecuencia de deslizamientos en función de la pendiente del terreno.



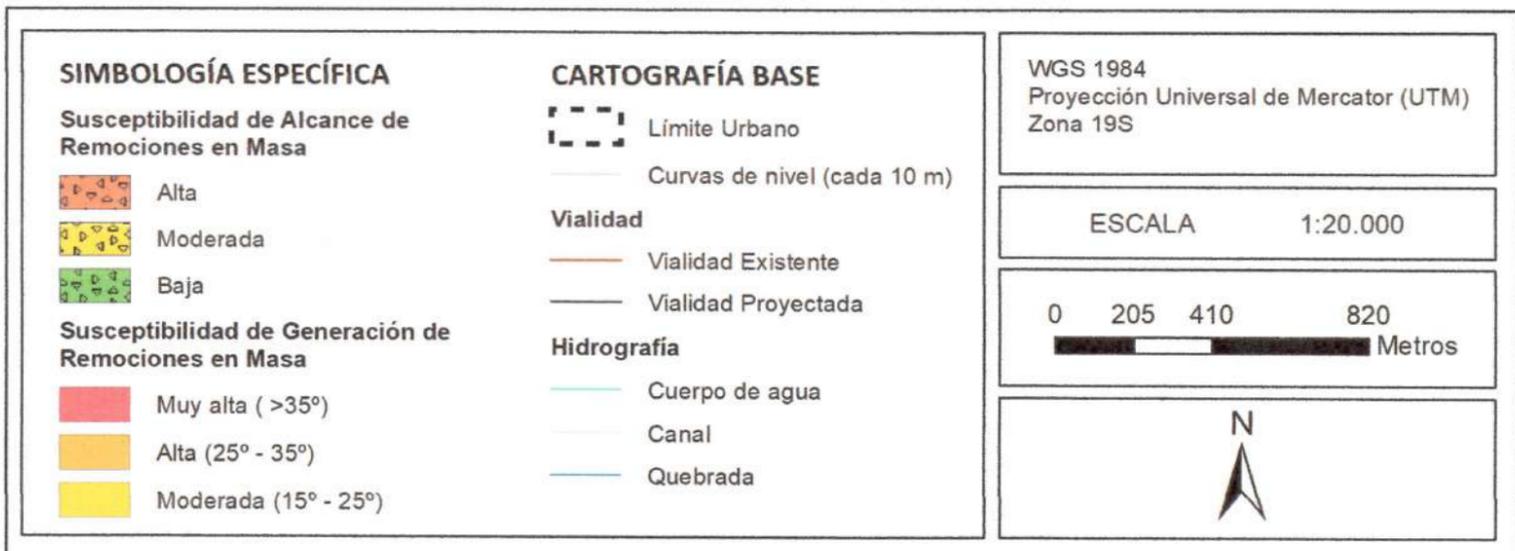
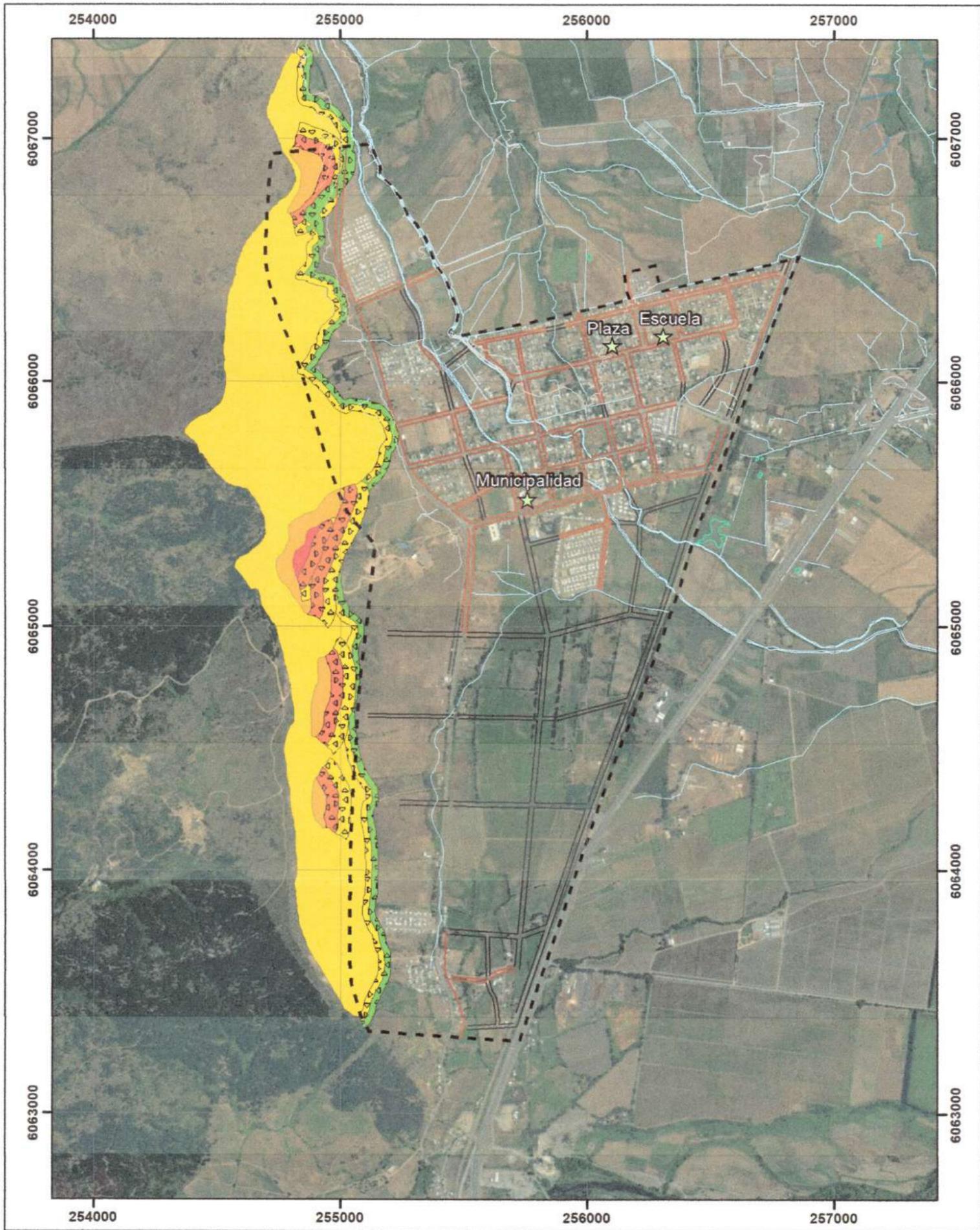
Fuente: Esaki et al., 2005.

Como no se identificaron depósitos de deslizamientos o caídas de bloques recientes en el área de estudio, para identificar las zonas susceptibles de ser alcanzadas por este tipo de fenómenos generados pendiente arriba, se tomaron como referencia observaciones realizadas en otras áreas de la región del Maule por el equipo consultor (por ejemplo Pelluhue, Iloca-Duao) y estudios realizados en la región del Biobío por Naranjo et al. (2006). Estos autores señalan que asociadas a las zonas de generación de remociones en masa, se debe implementar una franja de protección de 50 m pendiente debajo del lugar de generación del fenómeno. A partir de lo anterior y de la zonificación de áreas susceptibles de generar deslizamientos o caídas de bloques, se determinaron las zonas susceptibles de ser alcanzadas por estos fenómenos (FIGURA N° 5-5 y FIGURA N° 5-6) de la siguiente manera:

- **Zonas de Baja Susceptibilidad de Alcance:** Corresponden a todas aquellas zonas ubicadas entre 25 y 50 m pendiente abajo de una zona de moderada susceptibilidad de generación.
- **Zonas de Moderada Susceptibilidad de Alcance:** Corresponden a todas aquellas zonas ubicadas a menos de 25 m pendiente abajo de una zona de moderada susceptibilidad de generación, o a aquellas zonas ubicadas entre 50 y 100 m pendiente abajo de una zona de alta o muy alta susceptibilidad de generación.
- **Zonas de Alta Susceptibilidad de Alcance:** Corresponden a todas aquellas zonas ubicadas a menos de 50 m pendiente abajo de una zona de alta o muy alta susceptibilidad de generación.

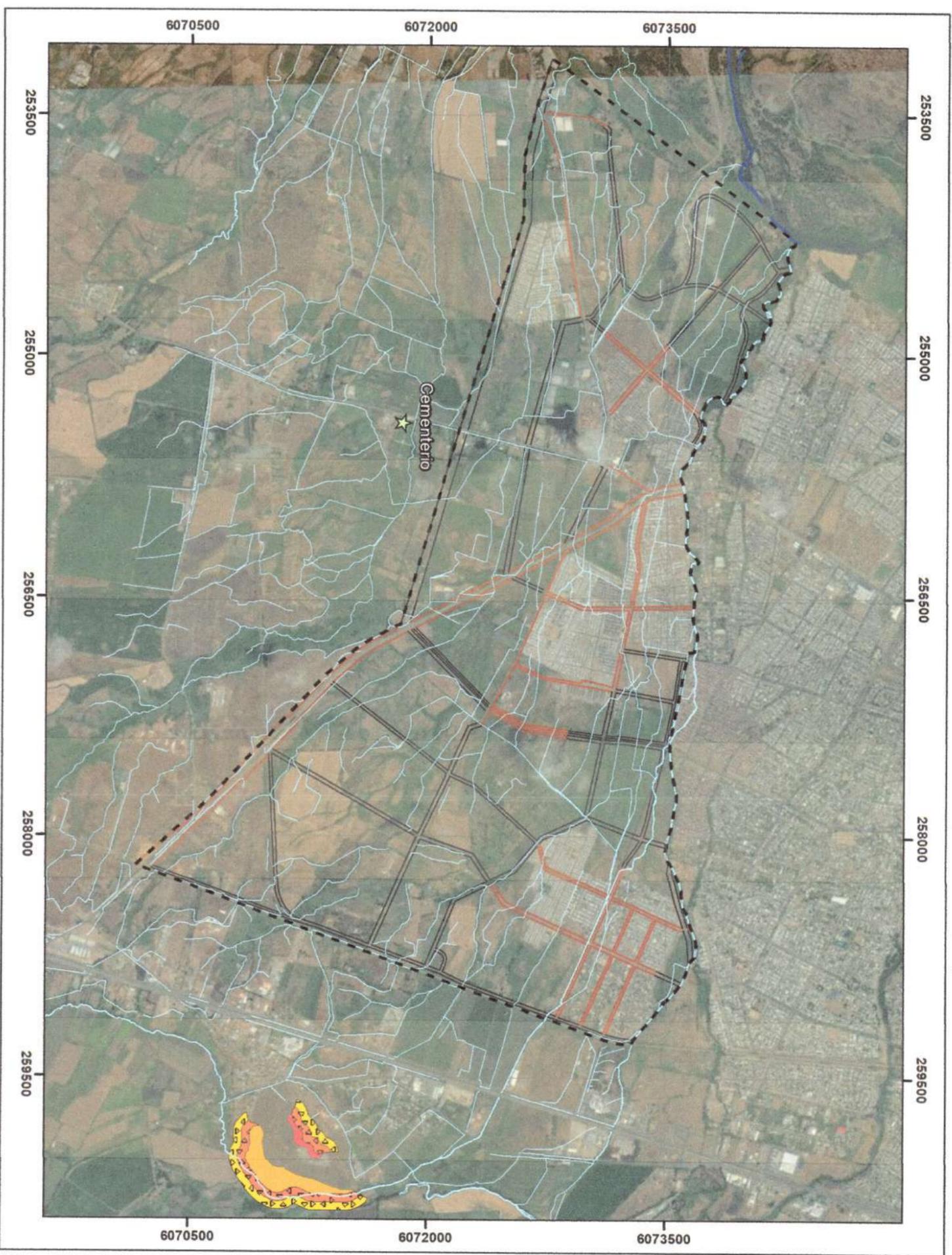
A partir de los mapas generados, se deduce que las zonas susceptibles de ser afectadas por deslizamientos y caídas de bloques se encuentran ubicadas principalmente en las laderas de la Cordillera de la Costa, en el sector occidental de la localidad de Maule.

FIGURA N° 5-5 Zonas de susceptibilidad de deslizamientos y caída de bloques para la localidad de Maule



Fuente: Elaboración propia

FIGURA Nº 5-6 Zonas de susceptibilidad de deslizamientos y caída de bloques para el sector Culenar-Chacarillas



Fuente: Elaboración propia

<p>SIMBOLOGÍA ESPECÍFICA</p> <p>Susceptibilidad de Alcance de Remociones en Masa</p> <ul style="list-style-type: none"> Alta Moderada Baja 	
<p>Susceptibilidad de Generación de Remociones en Masa</p> <ul style="list-style-type: none"> Muy alta (>35°) Alta (25° - 35°) Moderada (15° - 25°) 	
<p>CARTOGRAFÍA BASE</p> <ul style="list-style-type: none"> Límite Urbano Curvas de nivel (cada 10 m) Vialidad Vialidad Existente Vialidad Proyectada Hidrografía Canal Río 	
<p>WGS 1984 Proyección Universal de Mercator (UTM) Zona 19S Dato Altimétrico: Nivel medio del mar</p>	
<p>ESCALA 1:30.000</p> <div style="text-align: center;"> <p>N</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>0 200 400 800 Metros</p> </div>	

6 SÍNTESIS DE LOS PELIGROS GEOLÓGICOS ANALIZADOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

En el CUADRO N° 6-1, CUADRO N° 6-2, CUADRO N° 6-3 y se incluye un resumen los peligros geológicos analizados en el área de estudio, con una breve descripción, el detalle del catastro de los eventos recopilados o reconocidos y la metodología para la zonificación de susceptibilidad asociada a cada peligro. En la FIGURA N° 6-1 y FIGURA N° 6-2 se sintetizan las zonas susceptibles a ser afectadas por los peligros zonificables dentro de los límites urbanos de Maule y Culenar-Chacarillas a escala 1:20.000 y 1:30.000, respectivamente. Además, en los planos N°3 y N°4 fuera de texto se incluyen los mapas síntesis de peligros geológicos a escala 1:5.000 para Maule y 1:7.500 para Culenar-Chacarillas.

CUADRO N° 6-1 Síntesis de peligro sísmico para el área de estudio, descripción, catastro, metodología y zonificación

Peligro	SISMICIDAD
Descripción	Este peligro está asociado a la zona de subducción de la Placa de Nazca por debajo de la Sudamericana. Los sismos que se analizaron son los de "costa afuera" asociados a extensión por abombamiento, sismos asociados al contacto interplaca, sismos de intraplaca de profundidad intermedia y sismos superficiales de intraplaca (FIGURA N° 4-3). Se analizaron los principales eventos sísmicos y los peligros asociados a ellos
Peligros Asociados	Movimientos de terreno
Factores Desencadenantes	Dinámica de subducción del borde Pacífico del continente Sudamericano
Catastro	Se presenta una figura con el resumen de los terremotos por subducción históricos de magnitud mayor a 7,2 (FIGURA N° 4-7) y dos mapas con las profundidades y magnitudes de los eventos ocurridos en la región entre 1973 y febrero de 2011 (FIGURA N° 4-9 y FIGURA N° 4-10). No se han identificado fallas que presenten evidencias de actividad reciente en la comuna de Maule.
Metodología de Zonificación	La sismicidad no es zonificable a escala local para los alcances de este estudio. En base a antecedentes históricos, mapas de intensidades y comparación con otras zonas, se pueden realizar algunas estimaciones
Zonas Susceptibles	<p>Luego de la gran energía liberada por el terremoto del 27 de Febrero de 2010, se estima poco probable a corto plazo la ocurrencia de un sismo de subducción de magnitud importante que afecte a la zona, pero considerando que estos fenómenos son recurrentes y propios de la dinámica de subducción en que se encuentra Chile, no debe descartarse la ocurrencia de este tipo de fenómenos en la planificación a mediano y largo plazo.</p> <p>Los sismos de profundidad intermedia y los sismos corticales son muy poco probables en la zona de estudio, pues sólo existe escasa evidencia de ocurrencias anteriores. Sin embargo, los mecanismos generadores de este tipo de sismos son poco conocidos, y no puede descartarse un evento importante en el futuro.</p>

Fuente: Elaboración propia

CUADRO N° 6-2 Síntesis de peligro volcánico para el área de estudio, descripción, catastro, metodología y zonificación

Peligro	VOLCANISMO
Descripción	El peligro volcánico, se asocia a los procesos relacionados con la erupción de un volcán. La zona ubicada entre las latitudes 33° a 46° S, presenta el índice de actividad volcánica más alto del país, con un promedio de una erupción cada 0,7 años entre los años 1800 y 1990 (Moreno, 1993). Aunque, en general, los centros volcánicos se encuentran emplazados donde la densidad demográfica es baja, los productos asociados a una erupción volcánica pueden tener alcances de centenas de kilómetros.
Peligros Asociados	Lluvia de Tefra y proyectiles balísticos Flujos Piroclásticos Escurrimiento de Lavas Remociones en Masa y Lahares Sismicidad
Factores Desencadenantes	Dinámica de subducción del borde Pacífico del continente Sudamericano
Catastro	Se presenta un mapa con los centros volcánicos activos en la región (FIGURA N° 4-12) y un cuadro con las erupciones históricas y prehistóricas cercanas al área de estudio (CUADRO N° 4-2). En la FIGURA N° 4-12 se observa que el área de estudio no ha sido afectada por coladas de lava ni por flujos piroclásticos recientes, Sin embargo, en el registro geológico se reconocen depósitos de ignimbritas que afloran en la comuna de Maule. Estos depósitos registran la ocurrencia de grandes flujos piroclásticos de 800.000, 300.000 y 150.000 mil años de antigüedad (Sruoga, 2002), asociados al colapso de esta caldera volcánica, los que generaron depósitos de decenas de metros en gran parte de la Depresión Central al sur de Curicó. Este tipo de erupciones explosivas generan flujos piroclásticos que poseen altas velocidades y alcanzan grandes distancias. Es por esto que el peligro volcánico puede existir en una región aunque los volcanes más cercanos estén a kilómetros de distancia.
Metodología de Zonificación	El volcanismo no es zonificable a escala local para los alcances de estudio. En base a antecedentes históricos y los depósitos volcánicos existentes en la región, se pueden realizar algunas estimaciones y una zonificación de carácter regional.
Zonas Susceptibles	El peligro asociado a volcanismo que más probablemente puede afectar el área de estudio es la caída de tefra producto de la erupción de alguno de

Peligro	VOLCANISMO
	<p>los volcanes activos ubicados entre los 33º y los 40ºS, así como el encauzamiento de lahares y flujos piroclásticos producidos por la erupción volcánica.</p> <p>El área más afectada durante una erupción volcánica corresponde al radio de 20 kilómetros alrededor del cono volcánico, que se define como el área más expuesta a una erupción volcánica (FIGURA Nº 5-1). En esta área pueden ocurrir deslizamientos asociados a la actividad sísmica, caída de bombas piroclásticas, además de caída de cenizas y tefra. Además, en este sector se puede generar el derretimiento de hielos, los que dan paso a lahares e inundaciones.</p> <p>Por otro lado, se define una parábola para indicar el sector hacia donde se dispersarían principalmente las cenizas en función de los datos de erupciones históricas (FIGURA Nº 5-1). En la mayoría de los casos, las cenizas se dispersan hacia Argentina, pero dependiendo de cambios en la dirección del viento, pueden caer hacia la Depresión Central (véase caso del Quizapu en 1932). Finalmente, a modo ilustrativo, se definieron los cauces principales por donde pueden encauzarse los lahares y flujos piroclásticos. El alcance de estos estará dado por los siguientes factores:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Lahares: Cantidad de nieve o hielo en las zona cercana a la erupción. Estos pueden originarse en cualquier acumulación de nieve o hielo, basta que el hielo entre en contacto con la ceniza o lava para que se funda y escurra aguas abajo. - Flujos piroclásticos: Dependerá de la altitud de la columna de tefra, mientras más alta sea esta, mayor es la energía potencial acumulada, la que al colapsar la columna se transformará en energía cinética. <p>Cabe destacar que los flujos piroclásticos y lahares son capaces de remontar el relieve, por lo que la zonificación planteada solo demarca las vías de flujo preferencial y no considera la colmatación del cauce.</p> <p>Dada la distancia de la zona a los centros volcánicos activos se considera baja la probabilidad de que algún otro peligro volcánico afecte el área. Sin embargo, debe tenerse en cuenta la presencia de los depósitos de cenizas volcánicas correspondientes a la Ceniza Loma Seca, los cuales son producto de una gran erupción ocurrida cientos de miles de años atrás. Eventos de tal magnitud son de una recurrencia muy baja que se estima como poco probable que ocurra en el corto plazo, sin embargo son procesos extremadamente destructivos que no pueden dejar de ser considerados en planes de emergencia y evacuación.</p>

Fuente: Elaboración propia

CUADRO N° 6-3 Síntesis de peligro de inundaciones para el área de estudio, descripción, catastro, metodología y zonificación

Peligro	INUNDACIONES TERRESTRES Y FLUJOS
Descripción	Este peligro está asociado a eventos pluviométricos extremos, produciendo inundaciones por desborde de cauce o anegamientos. Asociados a estos eventos pueden producirse flujos de detritos, referidos comúnmente como 'aluviones'
Peligros Asociados	Inundaciones por Desborde de Cauces Inundaciones por Anegamiento Flujos de Detritos
Factores Desencadenantes	Eventos hidrometeorológicos extremos
Catastro	<p>Se ubicaron los puntos donde ocurren con mayor frecuencia las inundaciones.</p> <p>El peligro reconocido de inundaciones fue determinado principalmente a partir de las características hidrográficas de la zona, identificación de los cauces fluviales activos, áreas de drenaje aportantes a las quebradas, llanura de inundación y terrazas de los cursos fluviales principales. Además, personal de la Dirección de Obras de la Municipalidad de Maule informó cuáles son los sectores que más frecuentemente se ven afectados por inundaciones, ya sean de origen natural (desborde de cauces, anegamientos) o antrópico (desborde de canales). En el caso de Maule éstos sectores corresponden al El Mirador (producto de un inadecuado sistema de evacuación de aguas lluvias) y a la Av. Diego Portales, entre Freire y San Martín (FIGURA N° 4-16). Por otro lado, de acuerdo a lo informado por la Dirección de Obras Municipal, en el sector Culenar-Chacarillas los sectores más propensos a ser afectados por inundaciones corresponden a la Villa Don Pablo y Santa Teresita (FIGURA N° 4-16). Es importante mencionar que, generalmente, estos sectores coinciden con los lugares en que se encuentran los Depósitos Fluviales Activos de Esteros y Quebradas o los Depósitos Fluviales Antiguos (paleo-cauces) que fueron identificados a partir del mapeo geológico (ver capítulo 3.3.2 "Depósitos No Consolidados").</p> <p>Por otra parte, se reconocieron sectores de anegamiento. Estos fueron determinados a partir del análisis de la topografía, la geología e imágenes de Google Earth. Este reconocimiento además fue complementado con la información proporcionada por la Dirección de Obras de la Municipalidad de Maule.</p>

Peligro	INUNDACIONES TERRESTRES Y FLUJOS
<p>Metodología de Zonificación</p>	<p>Las principales inundaciones que han afectado al área de estudio tienen relación con desbordes de cauces, ya sean naturales o artificiales, y generalmente se manifiestan con una frecuencia anual. A partir del análisis de fotografías aéreas e imágenes satelitales, el mapeo geológico y la información proporcionada por la Dirección de Obras de la Municipalidad, se determinó la siguiente zonificación de susceptibilidad (FIGURA N° 5-2 y FIGURA N° 5-3):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Inundación por Desborde de Cauces Naturales: Corresponden a depósitos fluviales activos y depósitos fluviales antiguos (paleocauces). - Inundación por Desborde de Canales Artificiales: Áreas ubicadas a menos de 15 m de canales artificiales. - Anegamiento: Corresponden a zonas de humedales y/o zonas deprimidas, ya sean naturales o de origen antrópico. <p>Es importante aclarar que el Peligro de Inundación por Desborde de Canales Artificiales no corresponde a un peligro geológico en sentido estricto, pero fue considerado en este estudio, debido a que personal de la Dirección de Obras de Municipal informo que este tipo de fenómenos son uno de los problemas más frecuentes y que mayores daños causan en la comuna. Además, los canales artificiales generan suelos saturados en agua, los cuales presentan un mal comportamiento geotécnico, tal como quedo demostrado para el terremoto del 27 de febrero del 2010, donde la mayor parte de los daños a viviendas se registraron en los sectores aledaños a canales artificiales.</p> <p>En este estudio no se realizaron modelos hidrológicos debido a la falta de series de precipitación y caudales. Por ello, no se realizaron mapas de peligrosidad o amenaza de inundaciones considerando el período de retorno y analizando el alcance máximo lateral del área de inundación sino que se tuvieron en cuenta, en el caso de los cauces naturales, las expresiones geomorfológicas y los depósitos asociados a cauces fluviales.</p>
<p>Zonas Susceptibles</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Inundación por Desborde de Cauces Naturales: Sectores de cauces fluviales naturales de ríos, esteros y quebradas. - Inundación por Desborde de Canales Artificiales: Áreas ubicadas a menos de 15 m de canales artificiales. - Anegamiento: Áreas anegables correspondientes a humedales y/o zonas deprimidas, ya sean naturales o de origen antrópico.

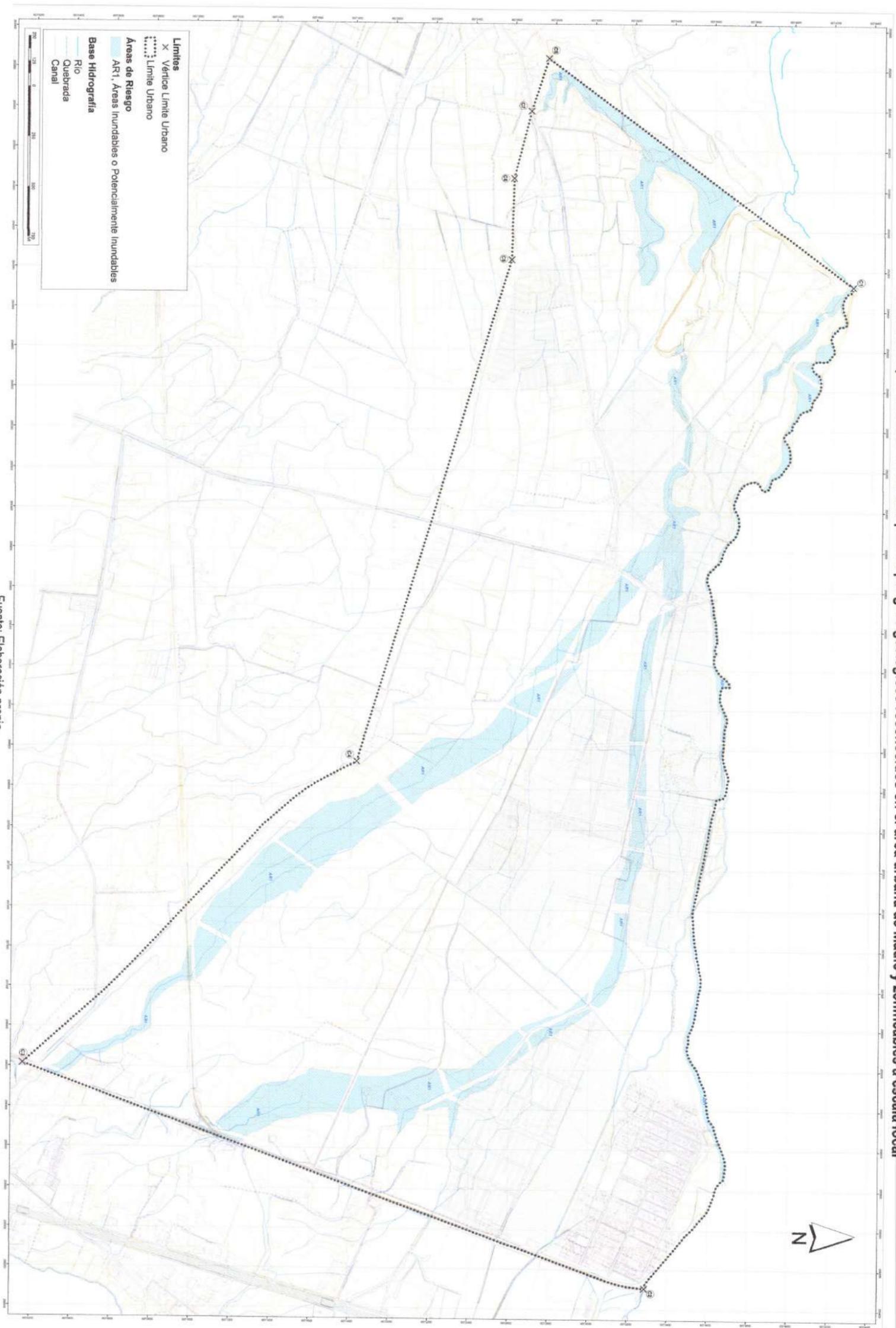
Fuente: Elaboración propia

CUADRO N° 6-4 Síntesis de peligro de deslizamientos y caída de rocas para el área de estudio, descripción, catastro, metodología y zonificación

Peligro	DESIZAMIENTOS Y CAÍDA DE ROCAS	
Descripción	Este peligro está asociado a volúmenes de roca o suelo que son transportados por procesos gravitacionales. Se reconocen dos tipos principales, los deslizamientos y las caídas de rocas. Su alcance es en general limitado, y debe ser tratado como un peligro geológico local	
Peligros Asociados	Deslizamientos Desprendimientos o Caídas de Rocas	
Factores Desencadenantes	Eventos pluviométricos o sísmicos	
Catastro	Este tipo de procesos se analizó mediante el análisis de fotografías aéreas e imágenes satelitales, la visita a terreno y la recopilación histórica de peligros geológicos. En el área de estudio no se identificaron depósitos de remociones en masa recientes, pero sí se reconocieron depósitos de remociones en masa antiguos en el sector occidental de la localidad de Maule, los que fueron mapeados como “Depósitos Coluviales y de Piedemonte” (ver capítulo 3.3.2 “Depósitos No Consolidados”). Los sectores donde se encuentran estos depósitos actualmente presentan pendientes bajas (<15º) a moderadas (15º-25º).	
Metodología de Zonificación	Se zonificó la susceptibilidad de generación de deslizamientos y caída de bloques (FIGURA N° 5-5 y FIGURA N° 5-6) de acuerdo a los siguientes criterios:	
	GENERACIÓN	ALCANCE
	<u>Susceptibilidad Muy Alta</u> : sectores con pendientes mayores a 35º	<u>Susceptibilidad Muy Alta</u> : -----
	<u>Susceptibilidad Alta</u> : sectores con pendientes entre 35º y 25º	<u>Susceptibilidad Alta</u> : Zonas ubicadas a menos de 50 m pendiente abajo de una zona de alta o muy alta susceptibilidad de generación.
<u>Susceptibilidad Moderada</u> : sectores con pendientes entre 25º y 15º	<u>Susceptibilidad Moderada</u> : Zonas ubicadas a menos de 25 m pendiente abajo de una zona de moderada susceptibilidad de generación, o zonas ubicadas entre 50 y 100 m pendiente abajo de una zona de alta o muy alta susceptibilidad de generación. <u>Susceptibilidad Baja</u> : Zonas ubicadas entre 25 y 50 m pendiente abajo de una zona de moderada susceptibilidad de generación.	
Zonas Susceptibles	Zonas de pendientes altas a moderadas ubicadas en las laderas de la Cordillera de la Costa, en el sector occidental de la localidad de Maule.	

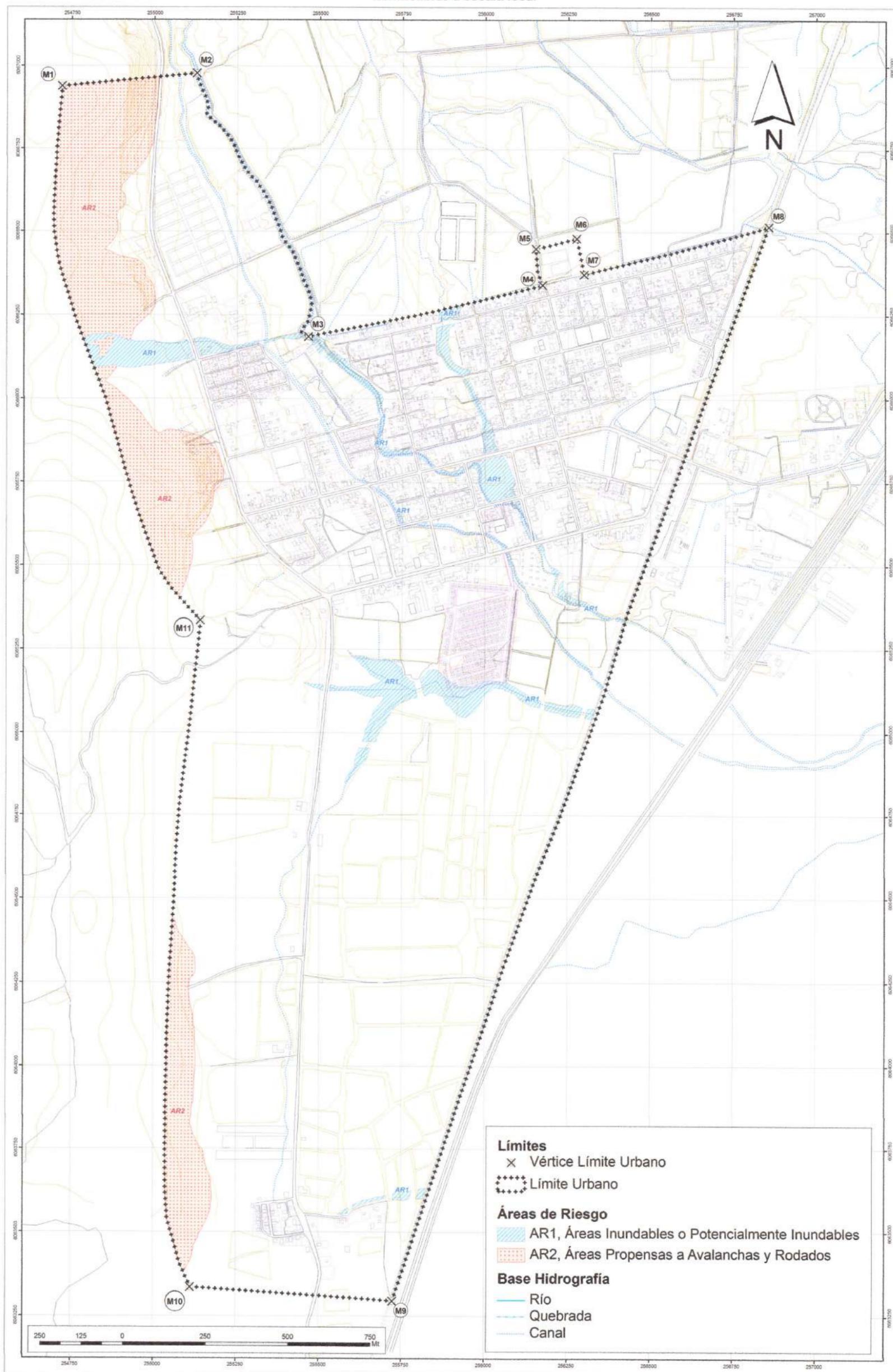
Fuente: Elaboración propia

FIGURA N° 6-1 Zonas susceptibles a ser afectadas por los peligros geológicos reconocidos en el área urbana de Maule y zonificables a escala local



Fuente: Elaboración propia

FIGURA Nº 6-2 Zonas susceptibles a ser afectadas por los peligros geológicos reconocidos en el área urbana del sector Culenar-Chacarillas y zonificables a escala local



Fuente: Elaboración propia

7 RECOMENDACIONES

En el CUADRO N° 7-1 se presenta una síntesis de los peligros reconocidos en el área, los criterios utilizados para evaluar la susceptibilidad y las recomendaciones para la zonificación urbana de las áreas susceptibles.

Con respecto a los peligros geológicos, se recomienda que se implementen sistemas de alerta temprana y evacuación en caso de eventos meteorológicos que puedan generar inundaciones o remociones en masa (flujos de detritos, deslizamientos y caídas de bloques). Este sistema debe contemplar un plan de emergencia que debe ser comunicado adecuadamente a la comunidad y debe ser periódicamente practicado, bajo la responsabilidad y coordinación de encargados comunales y provinciales de protección civil, con la participación de las comunidades.

Para mitigar los riesgos asociados a remociones en masa e inundaciones, se recomienda controlar el escurrimiento de aguas superficiales, su intercepción, captación, conducción y descarga controlada hacia cauces establecidos. Todo esto con una asesoría técnica-profesional apropiada.

Se recomienda zonificar como no edificables los sectores ubicados sobre zonas de susceptibilidad muy alta y alta de generación de deslizamientos y caída de bloques, y las zonas de susceptibilidad alta de alcance de estos procesos.

Con respecto a las inundaciones, se recomienda realizar estudios hidrológicos detallados para los cauces naturales, con el fin de complementar la cartografía de las zonas susceptibles a ser afectadas por inundaciones, con los periodos de retornos asociados, lo que permitiría definir zonas de riesgo. Para las áreas altamente susceptibles a inundaciones se debe condicionar la utilización a resultados de estudios de detalle, realizados por profesionales especializados en el tema, que determinen el tipo de medidas de mitigación y su adecuado dimensionamiento a los factores locales y tamaño de proyecto. En terrenos susceptibles de ser afectados por estos peligros se deberá proponer usos sólo con fines recreativos y prohibir la utilización de estas áreas con fines habitacionales.

Con respecto a las inundaciones por desborde de canales artificiales, pese a que este fenómeno no constituye un peligro geológico en sentido estricto, se recomienda que sea considerado al momento de establecer la zonificación urbana, ya que es un proceso que genera inundaciones de frecuencia anual, con daños a viviendas asociados. Además, la presencia de canales artificiales generan suelos saturados en agua en su cauce y los sectores aledaños, dando origen a suelos con un mal comportamiento geotécnico, tal como quedo demostrado para el terremoto del 27 de febrero del 2010, donde la mayor parte de los daños a viviendas se registraron en los sectores aledaños a canales artificiales.

Finalmente, se recomienda realizar capacitaciones a la población con respecto a los peligros geológicos, considerando sus causas y consecuencias. En caso que la autoridad no pueda dar una alerta oportuna, la educación y conocimiento acerca de los diferentes peligros y riesgos geológicos puede salvar vidas, ya que conduce a una reacción correcta y autónoma por parte de la población, tal como quedó demostrado para el reciente terremoto y maremoto ocurrido el 27 Febrero de 2010,

cuando en varias localidades los pobladores se alejaron de la costa por cuenta propia después de ocurrido el sismo.

CUADRO N° 7-1 Resumen de Peligros Geológicos del área urbana de la Comuna de Maule y Criterios utilizados para definir la zonificación de susceptibilidad y la zonificación urbana propuesta para cada caso

Peligro	Susceptibilidad	Criterios	Zonificación Urbana
Inundación	Desborde de cauces naturales	Cursos naturales de ríos, esteros y quebradas. Geológicamente corresponden a depósitos fluviales activos y depósitos fluviales antiguos (paleo-cauces).	Riesgo (2.1.17)
	Desborde de canales artificiales	Áreas ubicadas a menos de 15 m de canales artificiales.	Riesgo (2.1.17)
	Anegamientos	Áreas de anegamiento. Corresponden a humedales y/o zonas deprimidas ya sean naturales o de origen antrópico.	Riesgo (2.1.17)
Generación de deslizamientos y caída de bloques	Muy Alta	Pendientes > 35 °	Restricción
	Alta	Pendientes 25 - 35 °	Restricción
	Moderada	Pendientes 15 - 25 °	Riesgo (2.1.17)
Alcance de deslizamientos y caída de bloques	Alta	0 - 50 m pendiente abajo de la zona de generación alta y muy alta.	Restricción
	Moderada	0 - 25 m pendiente abajo de la zona de generación moderada o 50 - 100 m pendiente abajo de la zona de generación alta y muy alta.	Riesgo (2.1.17)
	Baja	25 - 50 m pendiente abajo de la zona de generación moderada	Normas Urbanísticas

Fuente: Elaboración propia

8 REFERENCIAS

- Alvarado, P., Barrientos, S., Saez, M., Astroza, M. y Beck, S., 2009. Source study and tectonic implications of the historic 1958 Las Melosas crustal earthquake, Chile, compared to earthquake damage. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 175(1-2): 26-36.
- Anativia, C., Luzio, W., Vera, W., Lara, P. 2001. Mapas de suelos de Reconocimiento e Interpretativos. II. VI REGIÓN DE CHILE, ESCALA 1:100.000. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*. Volumen 1, páginas VI2-VI7.
- Antinao, J.L., Fernández, J.C., Naranjo, J.A., Villarroel, P. 2002. Peligro de Remociones en Masa e Inundaciones en la Cuenca de Santiago. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Ambiental, No. 2, 1 mapa escala 1:100.000.
- Barrientos, S., Vera, E., Alvarado, P. y Monfret, T., 2004. Crustal seismicity in central Chile. *Journal of South American Earth Sciences* 16(8): 759-768.
- Bloom, A. L., 1998. *Geomorphology: a systematic analysis of late Cenozoic landforms*. Prentice Hall. Upper Saddle River, N.J., 482 p.
- Centeno, J., Fraile, M.J., Otero, M.A., Pividal, A.J., 1994. *Geomorfología Práctica*. 95 p.
- Comte, D. y Pardo, M., 1991. Reappraisal of great historical earthquakes in the northern Chile and southern Peru seismic gaps. *Natural Hazards* 4(1): 23-44.
- Comte, D., Haessler, H., Dorbath, L., Pardo, M., Monfret, T., Lavenu, L., Pontoise, P., y Hello, Y., 2002. Seismicity and stress distribution in the Copiapo, northern Chile subduction zone using combined on- and off-shore seismic observations. *Physics of The Earth and Planetary Interiors* 132(1-3): 197-217.
- Costa, J.E. 1984. Physical geomorphology of debris flows. In *Developments and Applications of Geomorphology*, Costa, J.E., Fleischer, P.J., edits. Springer Verlag, Berlín, p. 2VI8-317.
- Cruden, D.M., Varnes, D.J., 199VI. Landslide types and processes. In *Special Report 247: Landslides: Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board, Washington D.C.
- De Mets, C., Gordon, R., Argus, D., Stein, S., 1994. Effects of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters* 21 (20): 2191-2194.
- Díez-Herrero, A., Laín-Huerta, L., Lloremte-Isidro, M., 2008. Mapas de Peligrosidad por avenidas e inundaciones: Guía metodológica para su elaboración. Instituto Geológico y Minero de España. Serie Riesgos Geológicos/Geotecnia No. 1, 190 p.

- Esaki, T., Thapa, P., Mitani, Y., Ikemi, H., 2005. Landslide and debris flow characteristics and hazard mapping in mountain hillslope terrain using GIS, Central Nepal. *En: Eberhardt, E., Hungr, O., Fell, R., Couture, E. (eds), Proceedings, International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver*, p. 657-669.
- Eyquem, D., 2009. Volcanismo cuaternario de Sierras de Bellavista: Comparación geoquímica con el magmatismo contemporáneo del arco comprendido entre los 34°30' y los 35°30'S. Departamento de Geología. Santiago, Universidad de Chile. Memoria de título de Geólogo: 116 páginas.
- Farias, M., 2007. Tectónica y erosión en la evolución del relieve de Los Andes de Chile Central durante el Neógeno. Departamento de Geología. Santiago, Universidad de Chile. Doctor en Ciencias, mención geología: 275 páginas.
- Giraud, R., Shaw, L., 2007. Landslide Suceptibility Map of Utah. Utah Geological Survey, 16 p.
- González-Ferrán, O., 1995. Volcanes de Chile. Instituto Geográfico Militar, VI40 p. Santiago.
- Hauser, A., 1995. Hoja Talca, región VII, Escala 1:100.000. SERNAGEOMIN, Carta Hidrogeológica de Chile (n.2): 73 p., + anexos; 2 mapas pleg. col, Santiago. Coordenadas: 35°00' - 35°30' / 72°00' - 71°00' ; 35°30' - 36°00' / 72°00' - 71°15'
- Hauser, A., 1997. Los aluviones del 18 de Junio de 1991 en Antofagasta: un análisis crítico, a 5 años del desastre. Servicio Nacional de Geología y Minería. Boletín No. 49, 47 p. Santiago.
- Hauser, A., 2000. Remociones en masa en Chile. Boletín N°59, Servicio Nacional de Geología. Santiago. 89 p.
- Hauser, A., Parra, J., Skarmeta, J. 1982. Deslizamiento del Fundo Santa Domitilo, Chanco, VII región. Servicio Nacional de geología y Minería, documento inédito, 12 pp.
- Hauser, A., 1985. Flujos de barro en la zona preandina de la Región Metropolitana: Características, causas, efectos, riesgos y medidas preventivas. *Revista Geológica de Chile* (24): 75 - 92.
- Hildreth, W. y Drake, R., 1991. Volcán Quizapú, Chilean Andés. *Bulletin of Volcanology* (1992)54: 93-125.
- Infracon S.A. 2007. Memoria Explicativa PRC Maule.
- Jara, P., 2007. Geometría y cinemática de la deformación en compresión del neógeno en la hoya del Río Claro de Cauquenes (34°15'S - 34°30'S), Cordillera Principal, Chile Central. Departamento de Geología. Santiago, Universidad de Chile. Memoria de título de Geólogo: 109 páginas.
- Keefer, D., 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America* 95: 40VI-421.
- Keller, E., Blodgett, R., 2004. Riesgos Naturales. Pearson Education, 448 p. Madrid.

- Lara, L. y Rauld, R., 2003. Diagnóstico de la geología ambiental de las grandes ciudades de Chile. Santiago, Servicio Nacional de Geología y Minería: 182 p.
- Larraín, P., Simpson-Housley, P., 1994. Percepción y Prevención de Catástrofes Naturales en Chile. Pontificia Universidad Católica de Chile, 141 p. Santiago.
- Luebert, F. y Pliscoff, P., 2009. Sinopsis Bioclimática y vegetacional de Chile. Escala 1:250.000, cobertura nacional. Sistema de Información Ambiental Geográfica, Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile.
- Moreno, H., 1993. Erupciones volcánicas en Chile: procesos y riesgos asociados. I Jornadas Nacionales de Vulcanología, Medio Ambiente y Defensa Civil, pp. 161-170.
- Mpodozis, C., Ramos, V.A., 1989. The Andes of Chile and Argentina. En: Ericksen, G.E., Cañas, M.T., Reinemund, J.A. Geology of the Andes and its relation to Hydrocarbon and Mineral Resources, Earth Science Series, Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Huston, Texas, v. 11, p. 59-90.
- Myers, B., Brantley, S., 1995. Hazardous Phenomena at Volcanoes: USGS Open-File Report 95-231
- Naranjo, J.A., Varela, J., 1997. Flujos de detritos y barro que afectaron el sector oriente de Santiago el 3 de Mayo de 1993. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín No. 47, 42 p. Santiago.
- Naranjo, J., Arenas, M., Ramírez, P. 2006. Remociones en masa causadas por las precipitaciones de los días 9 al 11 de julio de 2006, en algunos sectores de la Provincia de Concepción. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- New South Wales Government, 1990. "Coastline Management Manual." NSW Government Printer. Sydney, Australia. ISBN: 0730575063 en <http://www.environment.gov.au/coasts/publications/nswmanual/index.html>.
- Nishenko, S. P. 1985. Seismic potential for large and great interplate earthquakes along the Chilean and southern Peruvian margins of South America: a quantitative reappraisal." J. Geophys. Res. 90(B5): 3589-3615.
- Ogura, A., Soares Macedo, E., 2000. Procesos y Riesgos Geológicos. En: II Curso Internacional de Aspectos Geológicos de Protección Ambiental (UNESCO y UNICAMP). Campinas, Brasil, 345 p. Disponible en: <http://unesdoc.unesco.org/images/001VI/001VI31/1VI3153s.pdf>
- Ortlieb, L., 1994. Las mayores precipitaciones históricas en Chile central y la cronología de eventos ENOS en los siglos XVI-XIX. Revista Chilena de Historia Natural VI7: 4VI3 – 485.
- Petit-Breuilh Sepúlveda, M. E., 2003. El efecto de los desastres naturales en las ciudades chilenas (siglos XVI al XX). Proyecto de Investigación, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Pierson, T., Scott, K., 1985. Downstream dilution of Lahar: transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow. Water Reserach 21 (10): 15511-1524.

- Proyecto Multinacional Andino (PMA): Geociencias para las Comunidades Andinas (GCA), 2007. Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 4, 432 p.
- PMA, 2008. Atlas de deformaciones cuaternarias de los Andes. Publicación Geológica Multinacional, No 7, 320 p. 1 Mapa en CD-ROM.
- Pye, K. y Tsoar, H., 2009. Aeolian sand and sand dunes. Springer-Verlag. Berlin, 462 p.
- Rauld, R., 2002. Análisis morfoestructural del frente cordillerano de Santiago oriente, entre el río Mapocho y la quebrada de Macul. Departamento de Geología. Santiago, Universidad de Chile. Geólogo: 57 páginas.
- Rauld, R., Armijo, R., Vargas, G., Lacassin, R., Thiele, R., y Campos, J., 2009. Cartografía y modelación estructural del Frente Andino Occidental de Santiago, un sistema de pliegues por propagación de falla. Actas XII Congreso Geológico Chileno (CD-ROM), Santiago.
- Reckendorf, F., 1998. Geologic Hazards of development on sand dunes along the Oregon coast. En: Environmental, groundwater, and engineering geology: Applications from Oregon. (SWCES Publication Nº 24). Editor: Burns, S., Southwest Washington Coastal Erosion Study. United States Geological Survey & Washington Department of Ecology. pag: 429 - 438.
- Sancho, C., 1997. Los mapas de riesgos. En: Peña, J. Cartografía geomorfológica básica y aplicada, Ed. Geomorfa, Zaragoza, p. 181-200.
- Scholz, C.H., 1990. The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge University Press, 439 p. Cambridge.
- Sepúlveda, S.A., Rebolledo, S., Vargas, G., 2007. Recent catastrophic debris flows in Chile: Geological hazard, climatic relationships and human response. Quaternary International 158 (1): 83-95.
- Sepúlveda, S. A., Astroza, M., Kausel, E., Campos, J., Casas, E., Rebolledo, S., y Verdugo, R., 2008. New Findings on the 1958 Las Melosas Earthquake Sequence, Central Chile: Implications for Seismic Hazard Related to Shallow Crustal Earthquakes in Subduction Zones." Journal of Earthquake Engineering 12(3): 432 - 455.
- Sepúlveda, S.A., Serey, A., 2009. Tsunamigenic, earthquake-triggered rock slope failures during the 21st of April 2007 Aisén earthquake, Southern Chile (45.5°S). Andean Geology 36(1), 131-136.
- Sepúlveda, S., Serey, A., Lara, M., Pavez, A., Rebolledo, S., 2010. Landslides induced by the April 2007 Aysén Fjord earthquake, Chilean Patagonia. Landslides: 1-10. doi: 10.1007/s1034VI-010-0203-2.
- SERNAGEOMIN, 2002. Mapa Geológico de Chile: Versión Digital. Publicación Geológica Digital, Nº4. Santiago, Servicio Nacional de Geología y Minería.

- Sruoga, P., 2002. El volcanismo reciente y riesgo asociado en la Provincia de Mendoza. IANIGLA, 30 Años de Investigación Básica y Aplicada en Ciencias Ambientales, pág. 255 a 259.
- Stern, C.R., Amini, H., Charrier, R., Godoy, E., Hervé, F., Varela, J., 1984. Petrochemistry and age of rhyolitic pyroclastic flows which occur along the drainage valleys of the río Maipo and río Cachapoal (Chile) and río Yaucha and río Papagayos (Argentina). *Revista Geológica de Chile*, N° 23, páginas 39 – 52.
- United Nations Inter-Agency Secretariat of the International Strategy for Disaster Risk Reduction, 2004. *Living with Risk: A global review of disaster reduction initiatives*. Geneva: UN/ISDR. 430 p. Disponible en: http://www.unisdr.org/eng/about_isdr/bd-lwr-2004-eng.htm.
- Urrutia, R. y Lanza, C. 1993. *Catástrofes en Chile 1541-1992*. Editorial La Noria. 440p. Facultad de Ingeniería, Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Uyeda, S., Kanamori, H., 1979. Back-arc opening and the mode of subduction. *Journal of Geophysical Research* 8 (NO B3): 1049-1059.
- Varela, J., y Moreno, H., 1982. Los depósitos de relleno de la depresión central de Chile entre los Ríos Lontué y Bío-bío. En Congreso Geológico Chileno, 3., Concepción, 8-14 noviembre, 1982: pp.F280-F306.
- Vargas, G., Fariás, M., Carretier S., Tassara, A., Baiza, S. y Melnick, D., 2011. Coastal uplift and tsunami effects associated to the 2010 M_w 8.8 earthquake in Central Chile. *Andean Geology* 38 (1): 219-238.
- Varnes, D.J., 1984. *Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice*. IAEG Commission on Landslides and Other Mass Movements on Slopes, UNESCO, Natural Hazards, No.3, VI1 p
- Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes. In Special report 17VI: *Landslides: Analysis and Control*, Transportation Research Board, Washington, D.C.