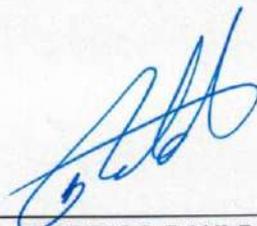


PLAN REGULADOR COMUNAL DE PENCAHUE

ESTUDIO DE RIESGOS



RODRIGO RAULD P.
GEÓLOGO
UNIVERSIDAD DE CHILE

El presente documento integra el PRC de <u>Pencahue</u> promulgado:
Resolución (A) N° <u>72</u> de <u>02.09.2020</u>
Gobierno Regional del Maule.
Fecha Toma Razón CGR: <u>19.11.2021</u>

ESTUDIO DE RIESGOS

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
Marilina Peñalva, Geóloga, MSc en Riesgo Geológico y Meteorológico

CONTRAPARTE TÉCNICA:

SEREMI de Vivienda y Urbanismo, Región del Maule

RESUMEN

En el marco de la actualización del Plan Regulador Comunal de Pencahue, 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 del límite urbano de las localidades de Pencahue y Corinto.

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, además del estudio de 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 Pencahue 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 Pencahue 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 casi 100 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 podría 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 en las localidades de Pencahue y Corinto. Por lo demás, ésta última localidad podría ser afectada por el encauzamiento en el río Claro de lahares producto de erupciones volcánicas, aunque su probabilidad de ocurrencia es muy baja.

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, sismos o lluvias intensas.

Los peligros de inundación por desborde de cauces naturales se asocian a los esteros y quebradas que drenan hacia el río Claro, Estero Los Puercos y Estero Las Candongas. 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 intercepción, 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	7
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	12
2	MARCO CONCEPTUAL	14
2.1	Peligros Geológicos en Chile	14
2.2	Conceptos de Susceptibilidad, Peligros Geológicos y Riesgo	15
3	MARCO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO	17
3.1	Marco Geodinámico	17
3.2	Marco Geomorfológico	18
3.3	Marco Geológico	26
3.3.1	Unidades de Roca	26
3.3.2	Depósitos No Consolidados	26
4	DESCRIPCIÓN Y CATASTRO DE INFORMACIÓN HISTÓRICA Y PREHISTÓRICA DE LOS PELIGROS GEOLÓGICOS ANALIZADOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	31
4.1	Procesos Internos o Endógenos de la Tierra - SISMICIDAD	31
4.1.1	Descripción del Peligro Geológico	31
4.1.2	Resultados del Catastro de Información Histórica de Sismicidad	37
4.2	Procesos Internos o Endógenos de la Tierra – VOLCANISMO	48
4.2.1	Descripción del Peligro Geológico	48
4.2.2	Resultados del Catastro de Información Histórica de Volcanismo	51
4.3	Procesos Exógenos o Externos de la Tierra – INUNDACIONES	56
4.3.1	Descripción del Peligro Geológico	56
4.3.2	Resultados del Catastro de Información Histórica de Inundaciones	58
4.4	Procesos Externos o Exógenos de la Tierra – REMOCIONES EN MASA	60
4.4.1	Descripción del Peligro Geológico	60
4.4.2	Resultados del Catastro de Información Histórica de Remociones en Masa	65

5	DIAGNÓSTICO Y ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS PELIGROS GEOLÓGICOS QUE PUEDEN AFECTAR EL ÁREA DE ESTUDIO	67
5.1	Peligros No Zonificables	67
5.1.1	Peligro Sísmico	67
5.1.2	Peligro Volcánico.....	67
5.2	Peligros Zonificables.....	69
5.2.1	Peligro de Inundaciones	69
5.2.2	Peligro de Remociones en Masa	75
6	SÍNTESIS DE LOS PELIGROS GEOLÓGICOS ANALIZADOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	80
7	RECOMENDACIONES	87
8	REFERENCIAS.....	90

INDICE DE FIGURAS

FIGURA Nº 1-1	Ubicación del área de estudio	7
FIGURA Nº 1-2	Puntos de control visita técnica del 29 de Marzo del 2011. Los Círculos verdes indican la ubicación de los puntos controlados.	11
FIGURA Nº 2-1	Etapas de la evaluación de un evento geológico peligroso.....	16
FIGURA Nº 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.....	18
FIGURA Nº 3-2	Principales unidades morfoestructurales y Rasgos geomorfológicos de la Zona Central de Chile.....	19
FIGURA Nº 3-3	Carta de elevaciones del área de estudio, localidad de Pencahue	20
FIGURA Nº 3-4	Carta de pendientes para el área de estudio, localidad de Pencahue	21
FIGURA Nº 3-5	Carta de exposición de ladera para el área de estudio, localidad de Pencahue.....	22
FIGURA Nº 3-6	Carta de Elevación para el área de estudio, localidad de Corinto.....	23
FIGURA Nº 3-7	Carta de Pendiente para el área de estudio, localidad de Corinto.....	24
FIGURA Nº 3-8	Carta de Pendiente para el área de estudio, localidad de Corinto.....	25
FIGURA Nº 3-9	Fotos de los depósitos de la terraza superior en Corinto.....	28
FIGURA Nº 3-10	Mapa Geológico del área de el área de estudio, localidad de Pencahue.....	29
FIGURA Nº 3-11	Mapa Geológico del área de el área de estudio, localidad de Corinto.....	30
FIGURA Nº 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.....	31
FIGURA Nº 4-2	Contexto geodinámico y margen de subducción de Chile.....	32
FIGURA Nº 4-3	Tipos de sismos que ocurren en un margen de subducción. Explicación en el texto	33
FIGURA Nº 4-4	Tipos de falla y esfuerzos asociados.....	34
FIGURA Nº 4-5	Tipos de ondas sísmicas	35
FIGURA Nº 4-6	Amplificación de la vibración generada por un terremoto.....	36

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.....	38
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 Penciahue está indicada por el círculo rojo.....	44
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	45
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	45
FIGURA N° 4-11 Ubicación espacial de epicentros en profundidad a la latitud 35° S. Fuentes sísmicas que afectan al área de estudio	46
FIGURA N° 4-12 Peligros volcánicos asociados a la erupción de un volcán.....	48
FIGURA N° 4-13 Principales centros volcánicos y depósitos volcánicos entre los 33° S y 36° S.....	53
Figura N° 4-14 Mapa de Isópacas de erupción de 1.932 del Quizapú, 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.....	55
FIGURA N° 4-15 Clasificación de los tipos de inundaciones	56
FIGURA N° 4-16 Fotos del sector de Corinto con peligro de inundaciones.....	59
FIGURA N° 4-17 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	60
FIGURA N° 4-18 Clasificación de tipos de remoción en masa en relación al movimiento que lo origina y el material constituyente de la ladera	62
FIGURA N° 4-19 Ejemplos de deslizamientos. A. Deslizamiento Rotacional, B. Deslizamiento traslacional.....	63
FIGURA N° 4-20 Fotos del sector de Corinto con peligro de remociones en masa.....	66
FIGURA N° 5-1 Mapa de distribución de Peligros Volcánicos	69
FIGURA N° 5-2 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	72
FIGURA N° 5-3 Zonas de susceptibilidad de inundaciones para las localidades de Penciahue.....	73
FIGURA N° 5-4 Zonas de susceptibilidad de inundaciones para las localidades de Corinto.....	74
FIGURA N° 5-5 Frecuencia de deslizamientos en función de la pendiente del terreno en la zona de generación.....	76
FIGURA N° 5-6 Zonas de susceptibilidad de deslizamientos y caída de bloques para las localidades de Penciahue	77
FIGURA N° 5-7 Zonas de susceptibilidad de generación de deslizamientos y caída de bloques para Corinto.....	78
FIGURA N° 5-8 Zonas de susceptibilidad de alcance de deslizamientos y caída de bloques para Corinto.....	79
FIGURA N° 6-1 Zonas susceptibles a ser afectadas por los peligros geológicos reconocidos en el área urbana de Penciahue y zonificables a escala local.....	85
FIGURA N° 6-2 Zonas susceptibles a ser afectadas por los peligros geológicos reconocidos en el sector de Corinto y zonificables a escala local.....	86

INDICE DE CUADROS

CUADRO N° 4-1 Peligros asociados al volcanismo	50
CUADRO N° 4-2 Principales volcanes en sectores cercanos al área de estudio	52
CUADRO N° 6-1 Síntesis del Peligro Geológico de Sismicidad y Fallas Activas	81
CUADRO N° 6-2 Síntesis del Peligro Geológico de Volcanismo	82
CUADRO N° 6-3 Síntesis del Peligro Geológico de Inundación	83
CUADRO N° 6-4 Síntesis del Peligro Geológico de Remoción en Masa	84

INDICE DE MAPAS FUERA DE TEXTO

PLANO N° 1: Mapa Geológico del Área Urbana de la localidad de Pencahue, escala 1:5.000.	
PLANO N° 2: Mapa Geológico del Área Urbana del sector Corinto, escala 1:5.000.	
PLANO N° 3: Mapa Síntesis de Peligros Geológicos del Área Urbana de la localidad de Pencahue, escala 1:5.000.	
PLANO N° 4: Mapa Síntesis de Peligros Geológicos del Área Urbana del sector Corinto, escala 1:5.000.	

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 Pencahue.

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 Pencahue. 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 Pencahue. Este estudio delimita las áreas de riesgos que han de ser incorporadas y/o adecuadas en la modificación del Plan Regulador Comunal, 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.

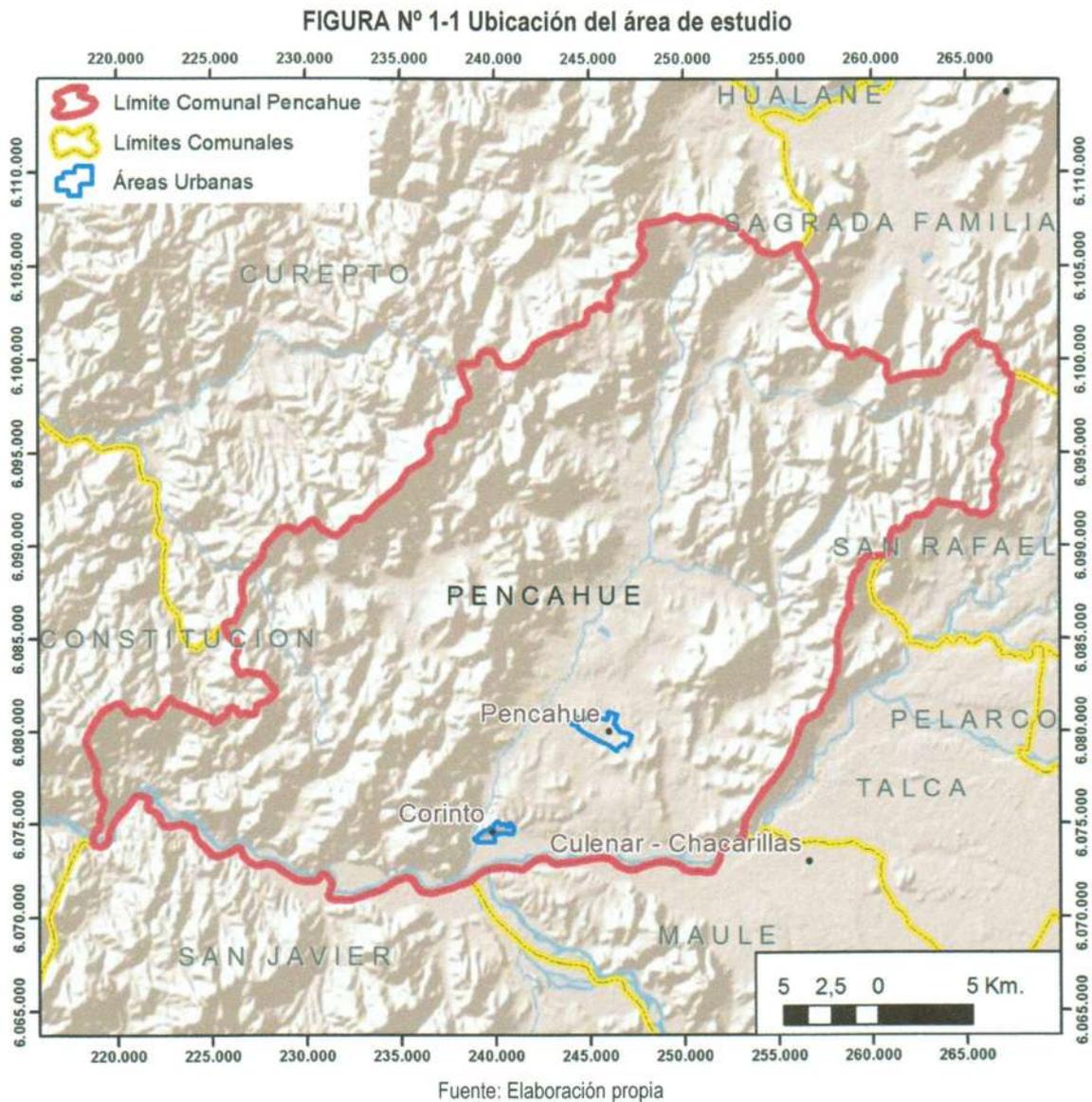
1.1 *Ubicación Área de Estudio*

La comuna de Pencahue está ubicada en la provincia de Talca, entre 35°08' y 35°28' de Latitud Sur, y entre 72°06' y 71°33' de Longitud Oeste en la VII Región del Maule. Limita al norte con la comuna de Sagrada Familia, de la provincia de Curicó, al sur con la comuna de San Javier, al este con las comunas de Curepto y Constitución y al oeste con las comunas de San Rafael, Talca y Maule. El área de estudio del presente trabajo incluye las áreas urbanas de Pencahue, capital comunal, y Corinto, ubicadas en el centro y en el sector sur de la comuna homónima, respectivamente (FIGURA N° 1-1).

Los principales accesos a Pencahue son a través de la ruta K-60, que cruza la comuna de Oeste a Este, uniendo las comunas de Curepto y Talca. El poblado de Corinto se une a Pencahue a través de la ruta K-660-L.

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 Pencahue, 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 Pencahue.



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 se presenta a una escala 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 periodos de retorno (**peligrosidad**) o de consideraciones socio-económicas (**riesgo**), por lo que los mapas entregados corresponden a mapas de susceptibilidad y de factores condicionantes (consultar Marco Conceptual, sección 2.2).

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 que 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 4.2.2 "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 Pencahue es generar mapas de susceptibilidad para el área urbana de Corinto y Pencahue.

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 (actuales) e inactivos (pasados), 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 Pencahue, 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 que gatillan 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 fuentes de información geológica 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, 2003). 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 en terreno fue de 1:2.500.

La interpretación de fotografías aéreas e imágenes satélites permitió delimitar los principales contactos entre el basamento rocoso, y los depósitos no consolidados, tales como depósitos fluvio-aluviales activos, depósitos fluviales activos, depósitos coluviales y depósitos de playa. 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.

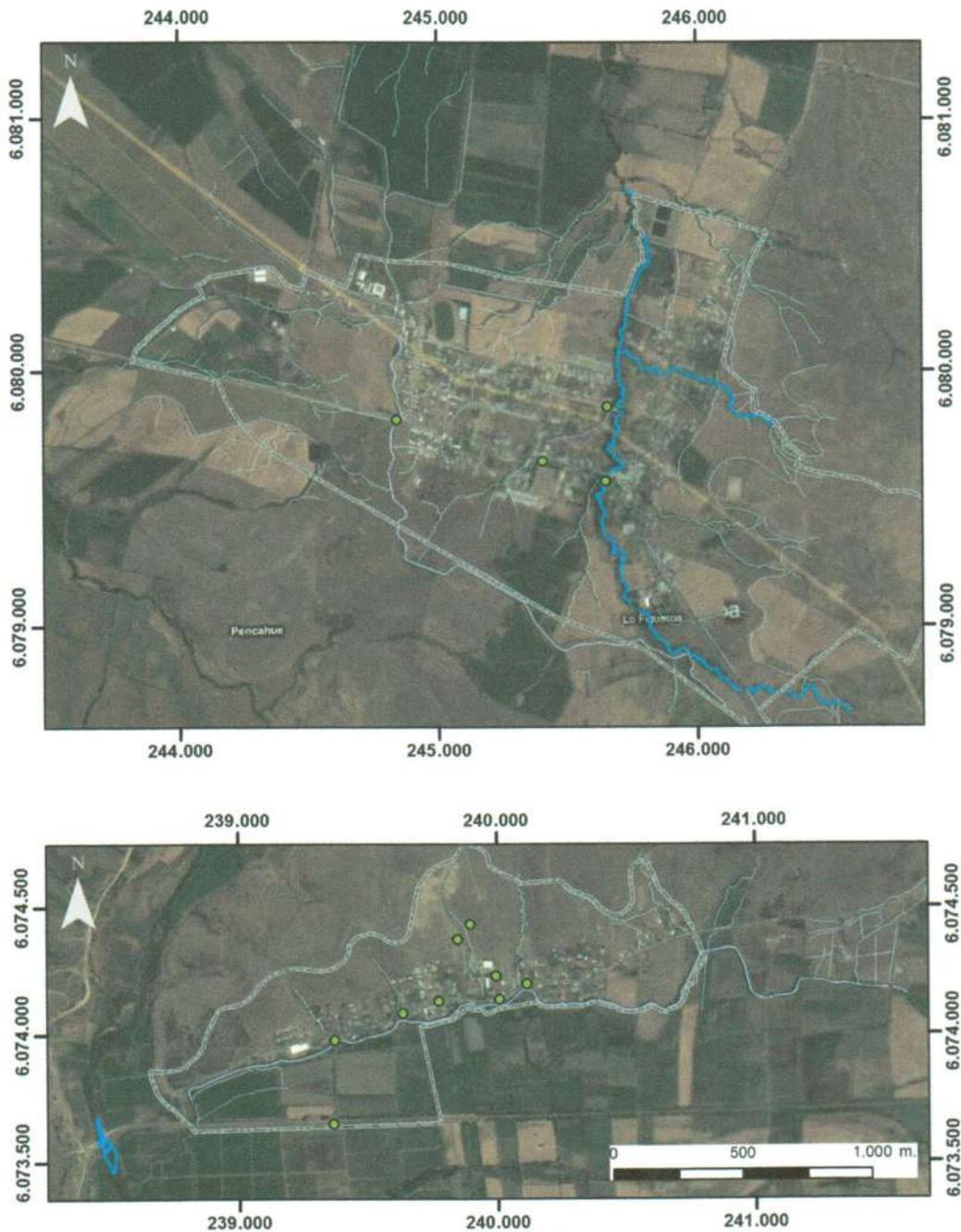
Simultáneamente, se construyó un Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés). El DEM corresponde a una matriz que contiene la información topográfica básica (elevación) que permite estimar los parámetros morfométricos utilizando Sistemas de Información Geográficos. Los parámetros morfométricos 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.

1.5.2 Visita técnica al área de estudio

Durante esta etapa, se realizó una visita técnica en el área de estudio (FIGURA N° 1-2), 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.

FIGURA N° 1-2 Puntos de control visita técnica del 29 de Marzo del 2011. Los Círculos verdes indican la ubicación de los puntos controlados.



Fuente: Elaboración propia

La salida a terreno se realizó el 29 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 Pencahue 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.

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), Sruoga (2002) y Vargas et al. (2011).

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 (llamados también factores desencadenantes). Considerando lo anterior, se recopilaron datos de los procesos de remoción en masa a partir de la revisión bibliográfica de los eventos generadores.

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 *et al.* 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 Servicio Geológico Estadounidense (USGS, por sus siglas en inglés)*. Esta base de datos corresponde a los sismos 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.

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

Para los eventos volcánicos se revisaron las fechas de registro de actividad (Urrutia y Lanza, 1993 y González, 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 Quizapú, 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, Quizapú, Planchón y Descabezado Grande (Urrutia et al, 1993). Cabe mencionar que estos centros volcánicos se encuentran lejos de la Comuna de Pencahue y su actividad sólo podría afectar de manera indirecta al área de estudio.

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 "MARCO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO". 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): Fueron elaborados a partir del DEM de celdas de 1 metro creado con las curvas de nivel cada 2 metros del PRC anterior de Pencahue.
2. Elevación, pendiente, curvatura y dirección de drenaje de la ladera (exposición) para la comuna de Pencahue: Generados a partir del modelo de elevación ASTER GDEM, con una resolución espacial de 30 metros por pixel.
3. Litología: Corresponden 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 reportados y cuya área de influencia incluye a la zona 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, Mpodosis 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:

$$R = A \times C$$

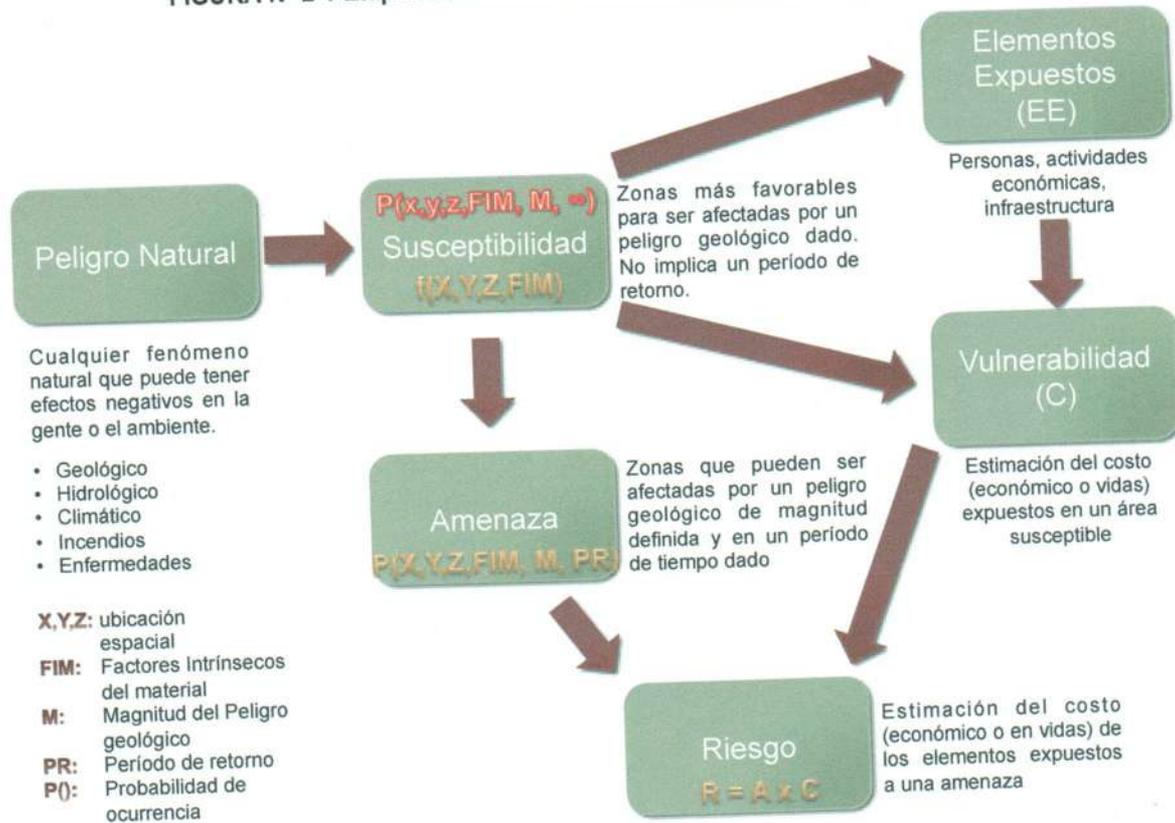
Donde A corresponde a la amenaza o peligrosidad (probabilidad de que ocurra un evento dado en un período de tiempo) y C corresponde al costo (ya sea en vidas, valoración económica, metros de caminos, etc.). La FIGURA N° 2-1 muestra la relación entre el conocimiento y la estimación de la susceptibilidad,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

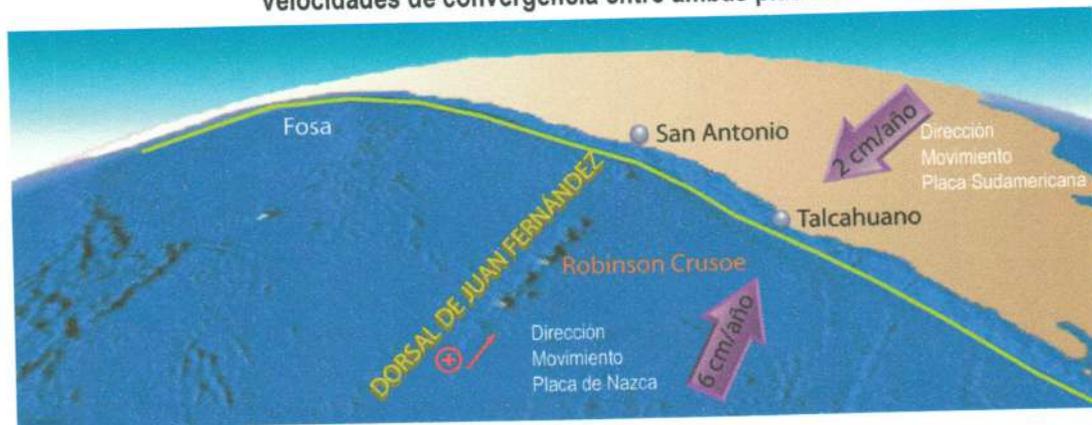
Chile se ubica en un margen convergente de placas tipo océano-continente (FIGURA N° 3-1), donde la Placa Oceánica de Nazca subducta a la Placa Continental Sudamericana bajo su margen occidental (Uyeda, 1979). Esta subducción, cuya tasa actual de convergencia se estima en 8 cm/año (Demets et al., 1994), 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 (entre 56 y 5 Ma) 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:

1. 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.
2. 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.
3. 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). El área de estudio se encuentra en la unidad morfoestructural correspondiente a la Cordillera de la Costa (FIGURA N° 3-2).

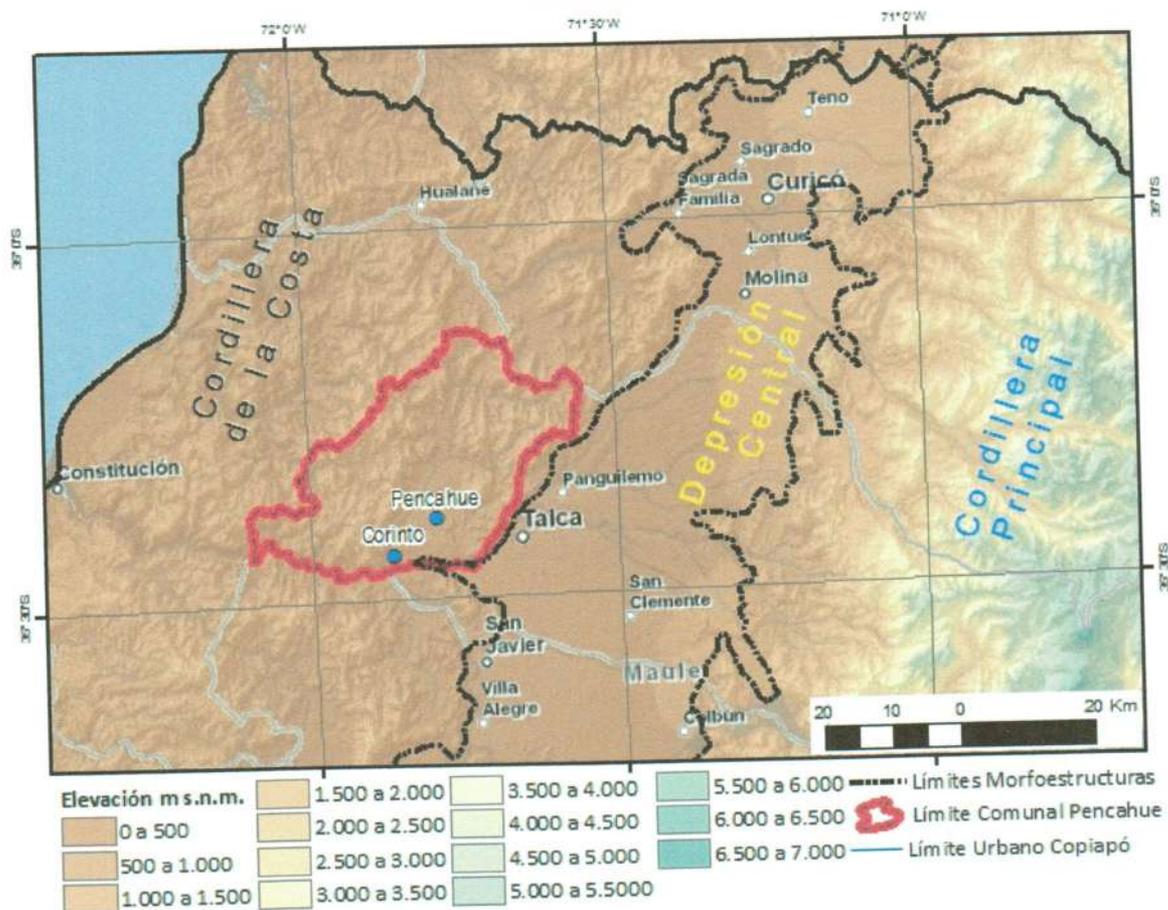
La Cordillera de la Costa se presenta como un cordón montañoso y accidentado, con una orientación general Norte – Sur. Está formada principalmente por granitoides y metamorfitas del Paleozoico Superior en su flanco occidental y rocas mesozoicas en su flanco oriental, como indica la cartografía geológica disponible. En los alrededores del área de estudio está compuesta por cerros que rara vez superan 700 m s.n.m. (FIGURA N° 3-2), sin embargo las laderas adedañas a los sectores urbanos poseen alturas mucho menores, las que no superan 113 m s.n.m. en Pencahue (FIGURA N° 3-3) y los 121 m s.n.m. en Corinto (FIGURA N° 3-6).

En el área urbana de Pencahue, las pendientes máximas se encuentran próximas a los ejes de quebradas y de manera muy local, superando rara vez los 25° de inclinación (FIGURA N° 3-4). Sin embargo, en Corinto (FIGURA N° 3-7), las pendientes máximas están asociadas a los relieves ubicados en el límite norte de la localidad, alcanzando pendientes de hasta 75° de inclinación.

Al este de la zona de estudio, limitando con la Cordillera de la Costa, se encuentra la Depresión Central, que se presenta como una franja alargada en dirección Norte-Sur, la cual corresponde a una extensa llanura levemente inclinada hacia el Oeste (FIGURA N° 3-2). La Cordillera Principal es una zona de alto relieve y con una altura de 3000 m s.n.m. en la divisoria de aguas (límite con Argentina), sólo superada por grandes edificios volcánicos como el Planchón-Peteroa, Descabezado Grande, Descabezado Chico, etc. Debido a su altura, los Andes son los captadores de la

precipitación, alimentando los ríos de desembocan en el mar y proporcionando los sedimentos que formarán las terrazas fluviales río abajo.

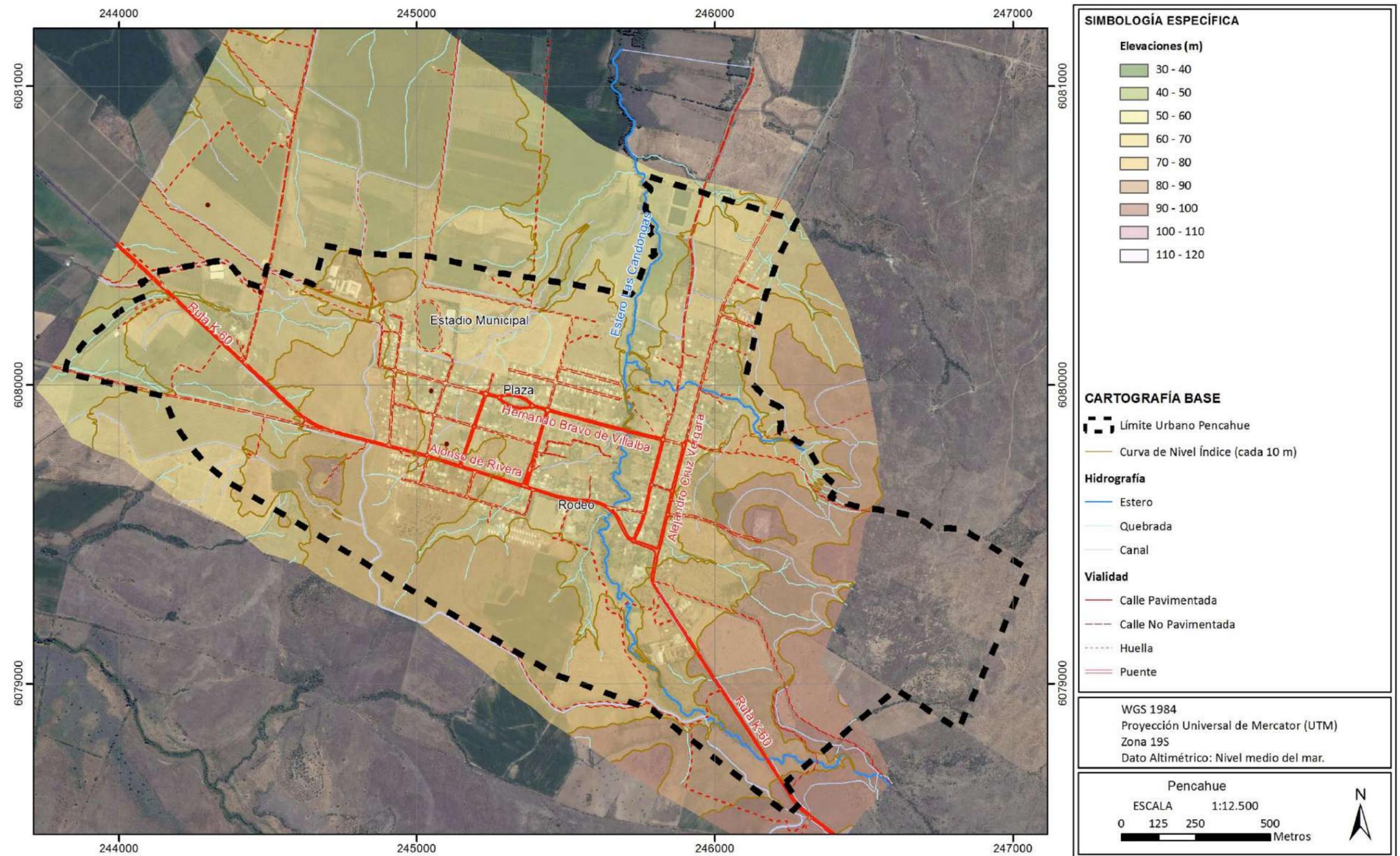
FIGURA N° 3-2 Principales unidades morfoestructurales y Rasgos geomorfológicos de la Zona Central de Chile



FUENTE: Elaboración propia a partir de: a) Shuttle Radar Topography Misión (SRTM) para mayor detalle ver Farr et al. (2007);
 b) Modificado de SERNAGEOMIN (2003)

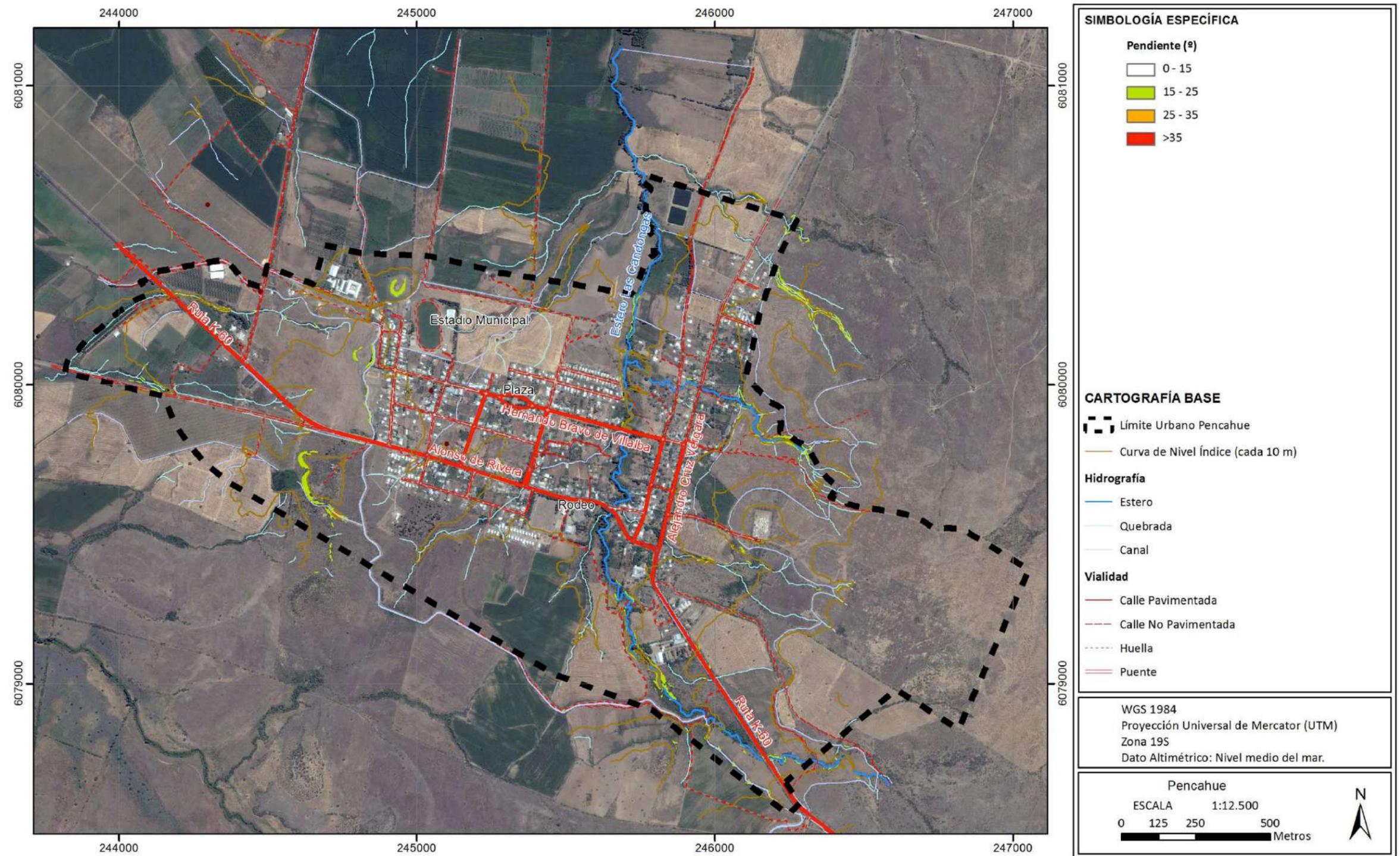
Para el análisis de los rasgos morfométricos del área de estudio, se utilizó el modelo de elevación generado a partir de las curvas de nivel cada 2 m del PRC anterior, el cual cuenta con una resolución de 1 m por píxel. A partir de esta información, se generó una carta de elevaciones, de pendientes y de exposición de ladera para las áreas urbanas de la comuna, citadas previamente (FIGURA N° 3-3 a FIGURA N° 3-10).

FIGURA N° 3-3 Carta de elevaciones del área de estudio, localidad de Pencahue



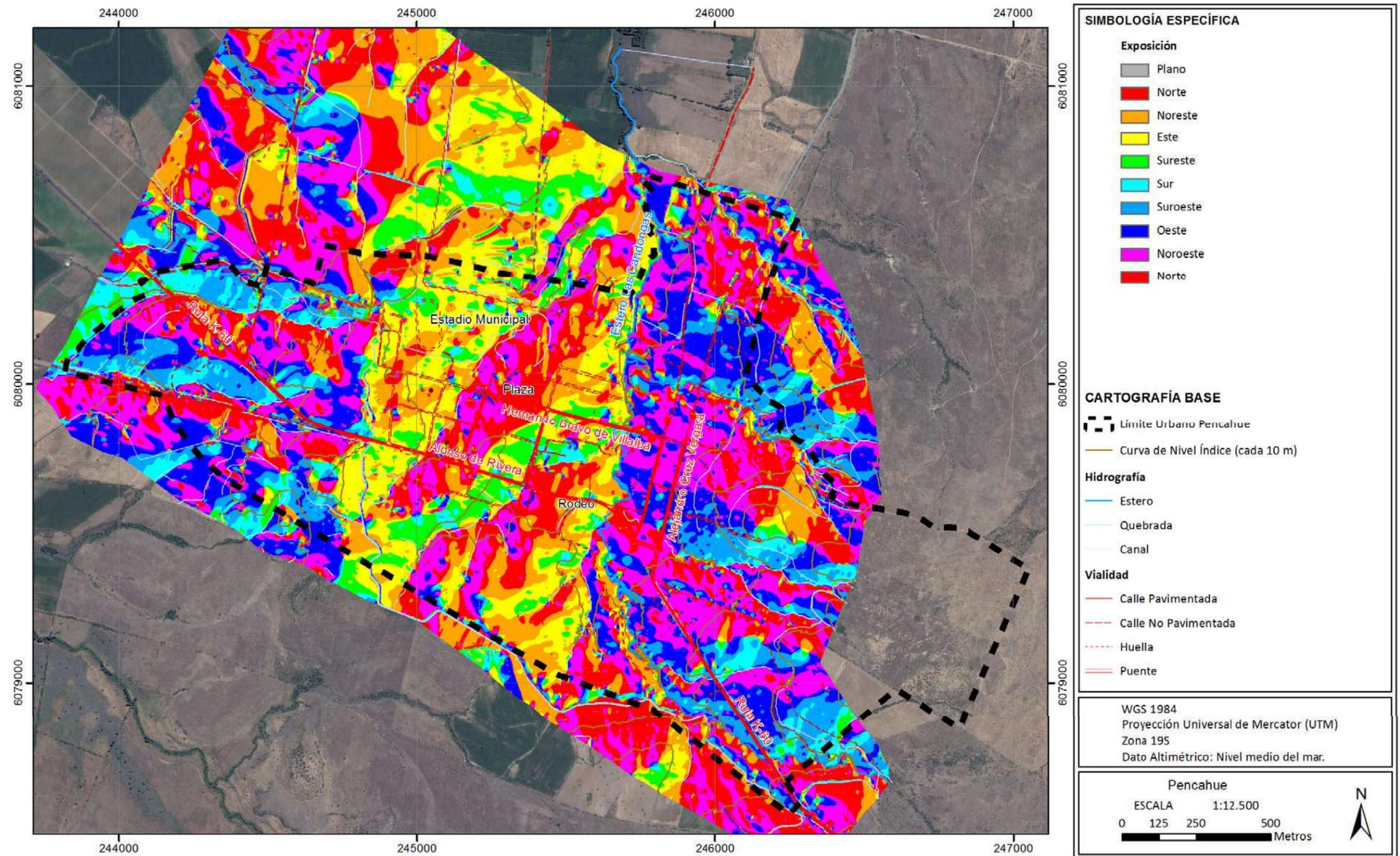
FUENTE: Elaboración propia a partir de interpolación Curvas de Nivel PRC.

FIGURA N° 3-4 Carta de pendientes para el área de estudio, localidad de Pencahue



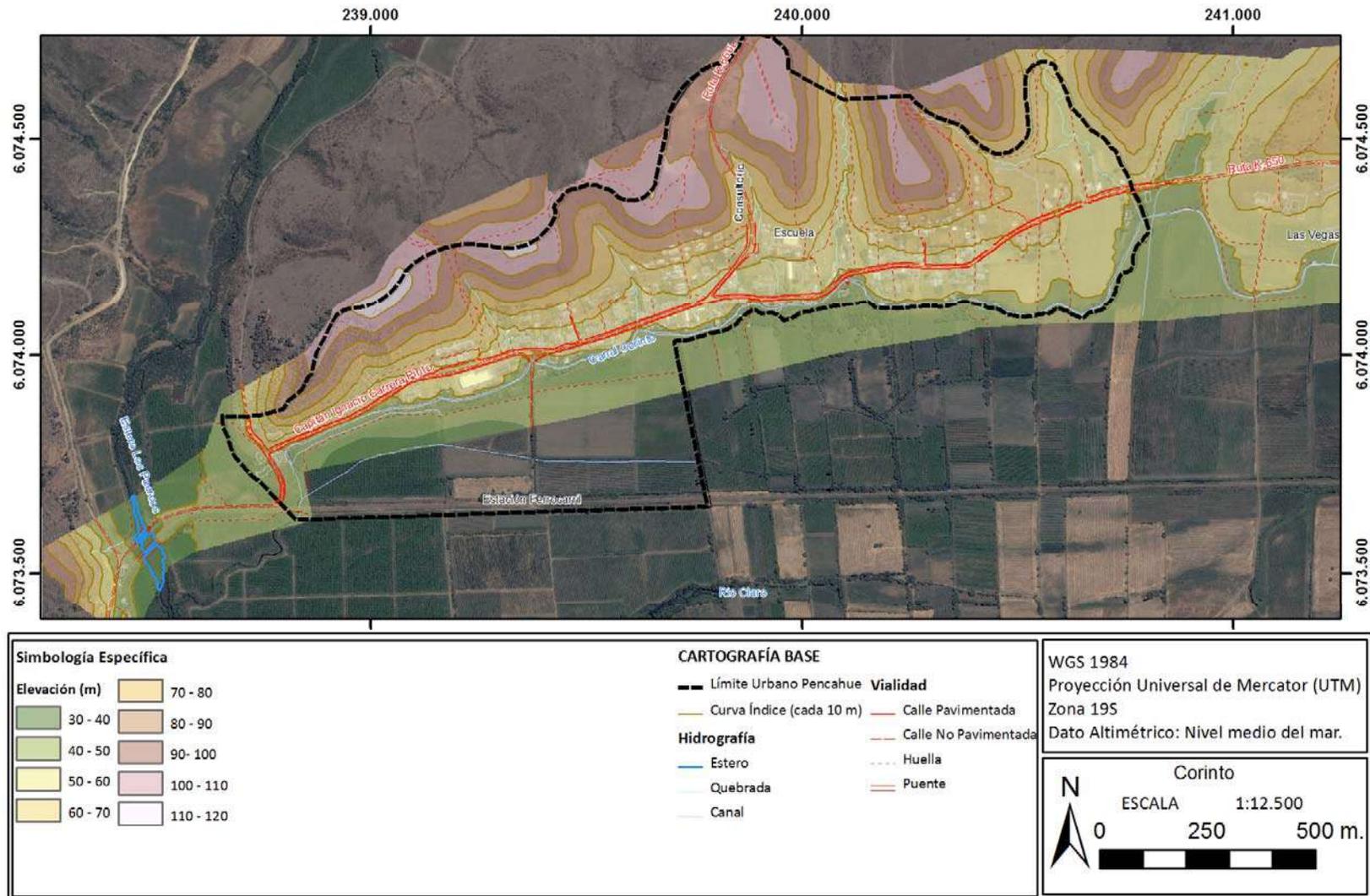
FUENTE: Elaboración propia a partir de interpolación Curvas de Nivel PRC

FIGURA Nº 3-5 Carta de exposición de ladera para el área de estudio, localidad de Pencahue.



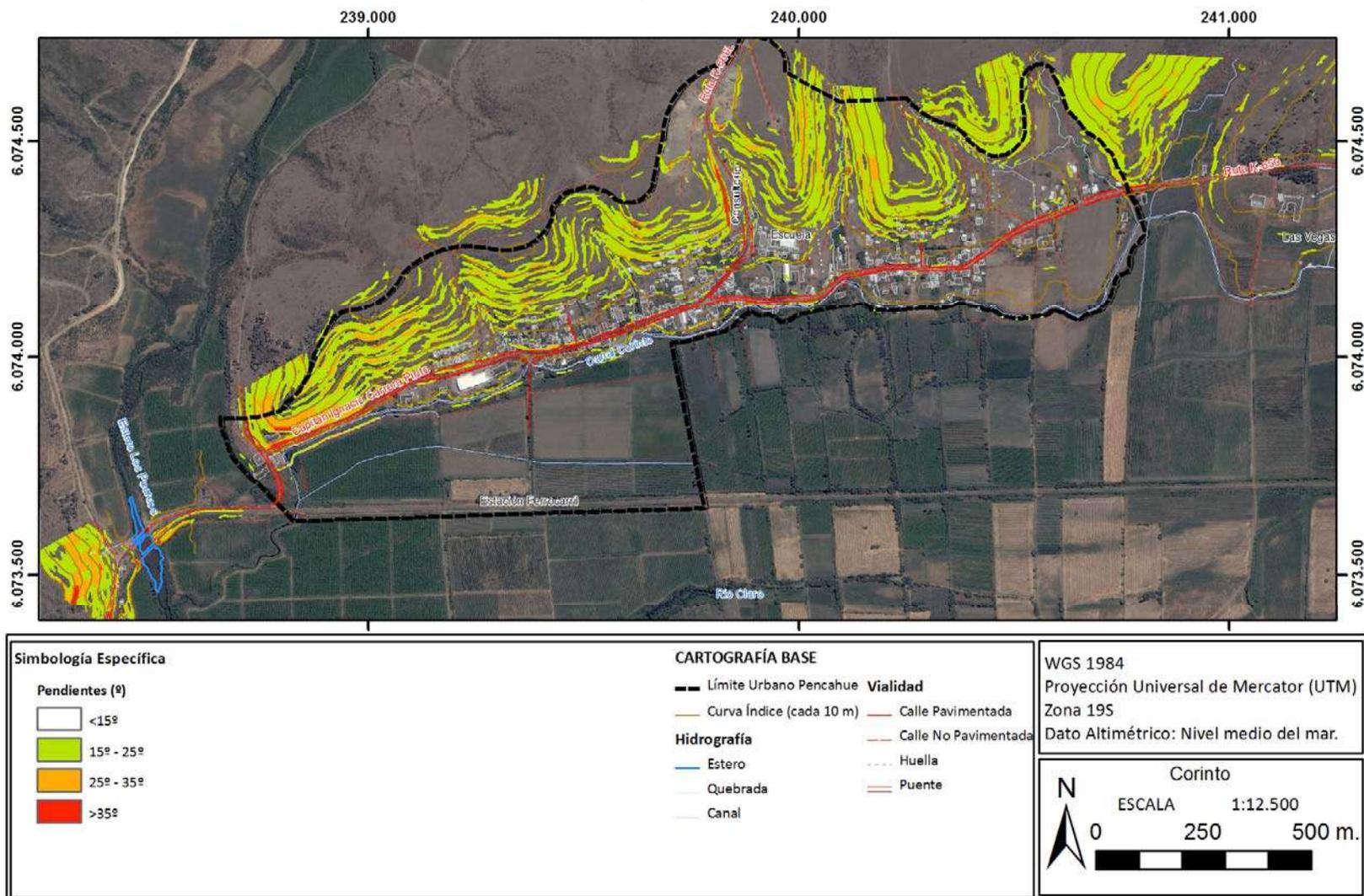
FUENTE: Elaboración propia en base a modelo de elevación ASTER GDEM y DEM Generado a partir de las curvas de nivel del PRC vigente.

FIGURA N° 3-6 Carta de Elevación para el área de estudio, localidad de Corinto.



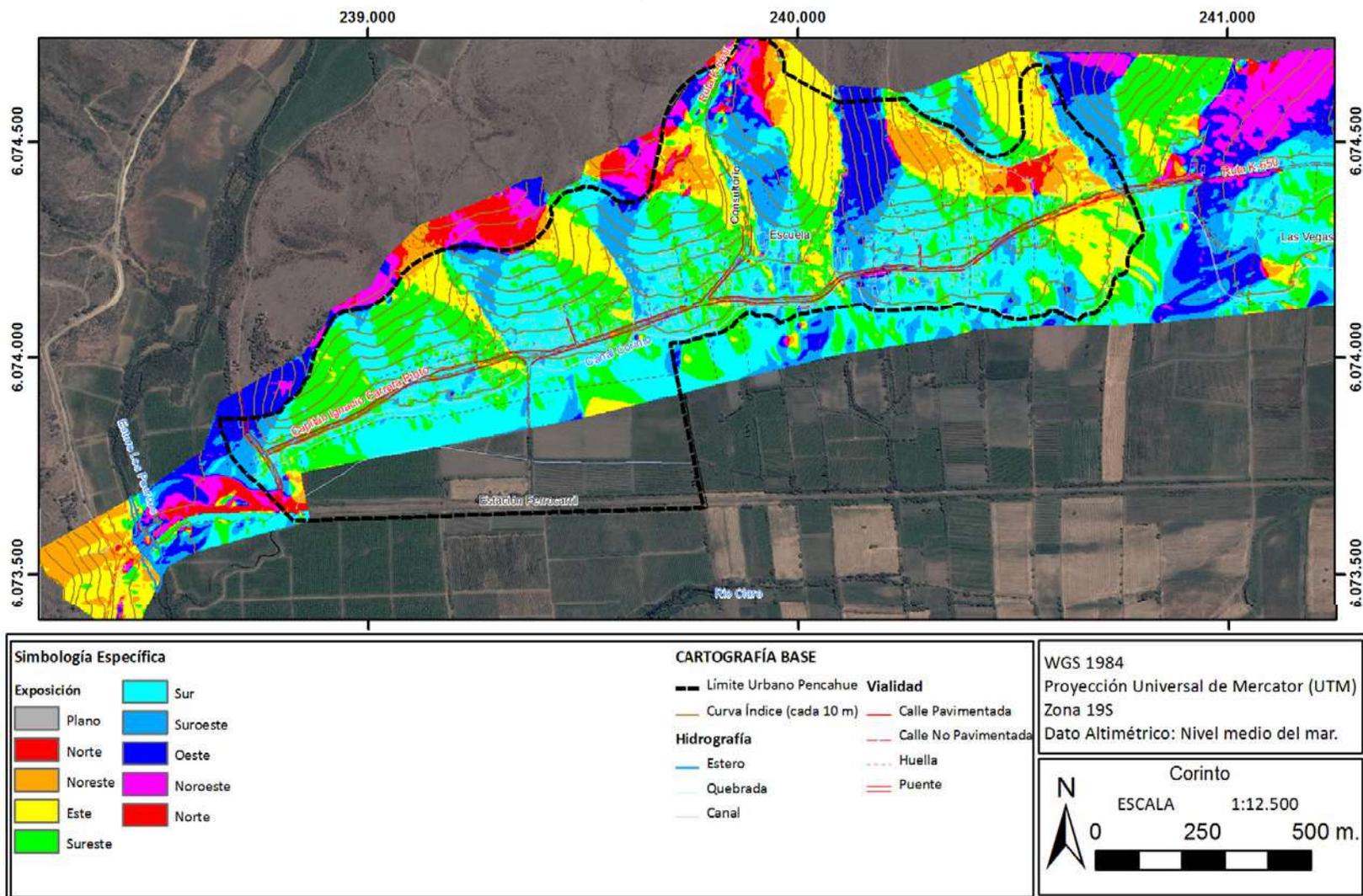
FUENTE: Elaboración propia en base a modelo de elevación ASTER GDEM y DEM Generado a partir de las curvas de nivel del PRC vigente.

FIGURA N° 3-7 Carta de Pendiente para el área de estudio, localidad de Corinto.



FUENTE: Elaboración propia en base a modelo de elevación ASTER GDEM y DEM Generado a partir de las curvas de nivel del PRC vigente.

FIGURA N° 3-8 Carta de Pendiente para el área de estudio, localidad de Corinto.



FUENTE: Elaboración propia en base a modelo de elevación ASTER GDEM y DEM Generado a partir de las curvas de nivel del PRC vigente.

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) y el Mapa Geológico de Chile a escala 1:1.000.000, publicado por el Servicio Nacional de Geología y Minería durante el año 2003. La geología de la comuna de Pencahue (FIGURA N° 3-10 y FIGURA N° 3-11, PLANO N°1 y PLANO N°2 fuera de texto) está constituida por rocas y sedimentos cuyo rango de edades van desde el Cretácico Superior hasta depósitos no consolidados producto de los procesos erosivos actuales (Hauser, 2005; SERNAGEOMIN, 2003). De manera general, el área se caracteriza por la existencia de la Formación Lo Valle, la que se encuentra cubierta en discordancia por rocas sedimentarias continentales del Neógeno Superior en el área de estudio.

3.3.1 Unidades de Roca

3.3.1.1 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).

3.3.2 Depósitos No Consolidados

3.3.2.1 Depósitos Fluvio - Aluviales Antiguos Aterrazados.

Afloran principalmente en el sector de Corinto. Corresponden mayormente a gravas y arenas,

- Terraza Superior: Corresponde a un depósito de hasta 50 m de espesor, compacto, bien consolidado, cuya morfología es un manto con una leve pendiente Oeste (FIGURA N° 3-9). Está compuesto de gravas y ripios, con un alto porcentaje de cenizas, esquirlas de vidrio y trozos de pómez, las cuales fueron generadas en la cordillera producto de grandes erupciones (e.g. Loma Seca, Descabezado Grande, ver sección 6.3) y posteriormente transportadas por la acción hídrica. Constituyen una terraza de depositación fluvial o también llamada agradacional antigua, asociada al río Maule, la cual se encuentra actualmente afectada por procesos erosivos.
- Terraza Intermedia: Constituye un segundo nivel aterrazado, de hasta 10 metros de espesor, ubicado bajo la Terraza Superior. Está compuesta de gravas redondeadas y arenas finas a gruesas, con escasa matriz de limos y arcillas.
- Depósitos Aluviales de Valle: Corresponden a sedimentos acumulados en las partes topográficamente más bajas de la Depresión Central. Están compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas que actualmente son erosionadas por el sistema fluvial activo.

3.3.2.2 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 del río Claro, Estero Los Puercos, en Corinto, y el Estero Las Candongas en Pencahue, con escaso nivel de aterrazamiento.
- Depósitos Fluviales Inactivos: Corresponden a brazos inactivos del río Claro, ubicados al sur de Corinto.
- Depósitos Fluviales de Llanura de Inundación: Se ubican en las riberas del Estero Los Puercos y el Estero Las Candongas, y corresponden a áreas que normalmente se inundan durante precipitaciones intensas (crecidas del río). Normalmente presentan un nivel de aterrazamiento parcial.
- Depósitos Aluviales de Quebrada Activos: Estos depósitos se distribuyen a lo largo de los cauces activos de esteros y riachuelos que drenan por las quebradas desde las laderas aguas arriba de Pencahue y Corinto. Normalmente se asocian a cauces angostos y no presentan terrazas asociadas.
- Depósitos Aluviales de Quebrada Inactivos: Estos depósitos corresponden a conglomerados y brechas, que no presentan actividad reciente. Se reconocen principalmente en el área urbana de Corinto.

FIGURA N° 3-9 Fotos de los depósitos de la terraza superior en Corinto.



FUENTE: Elaboración propia

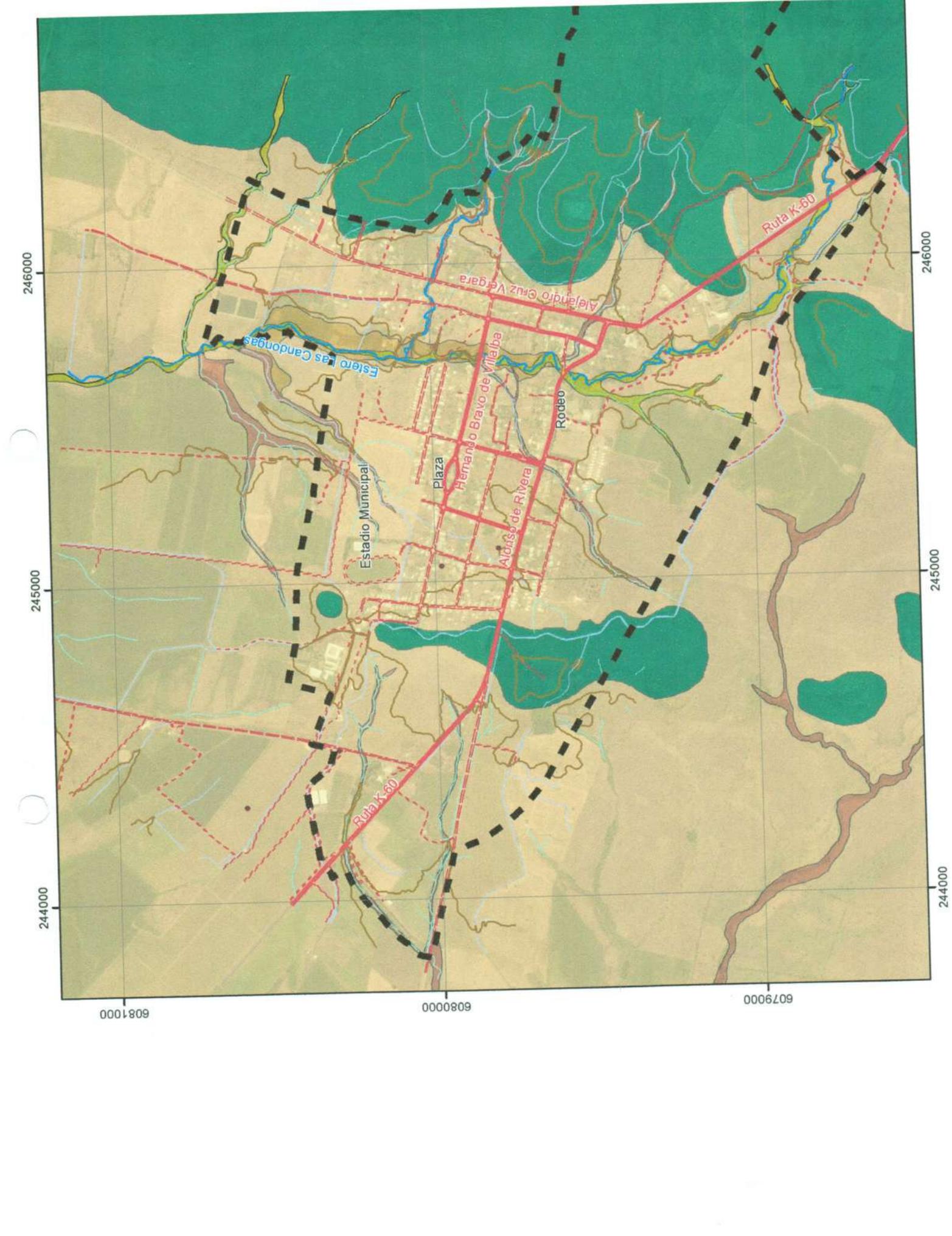
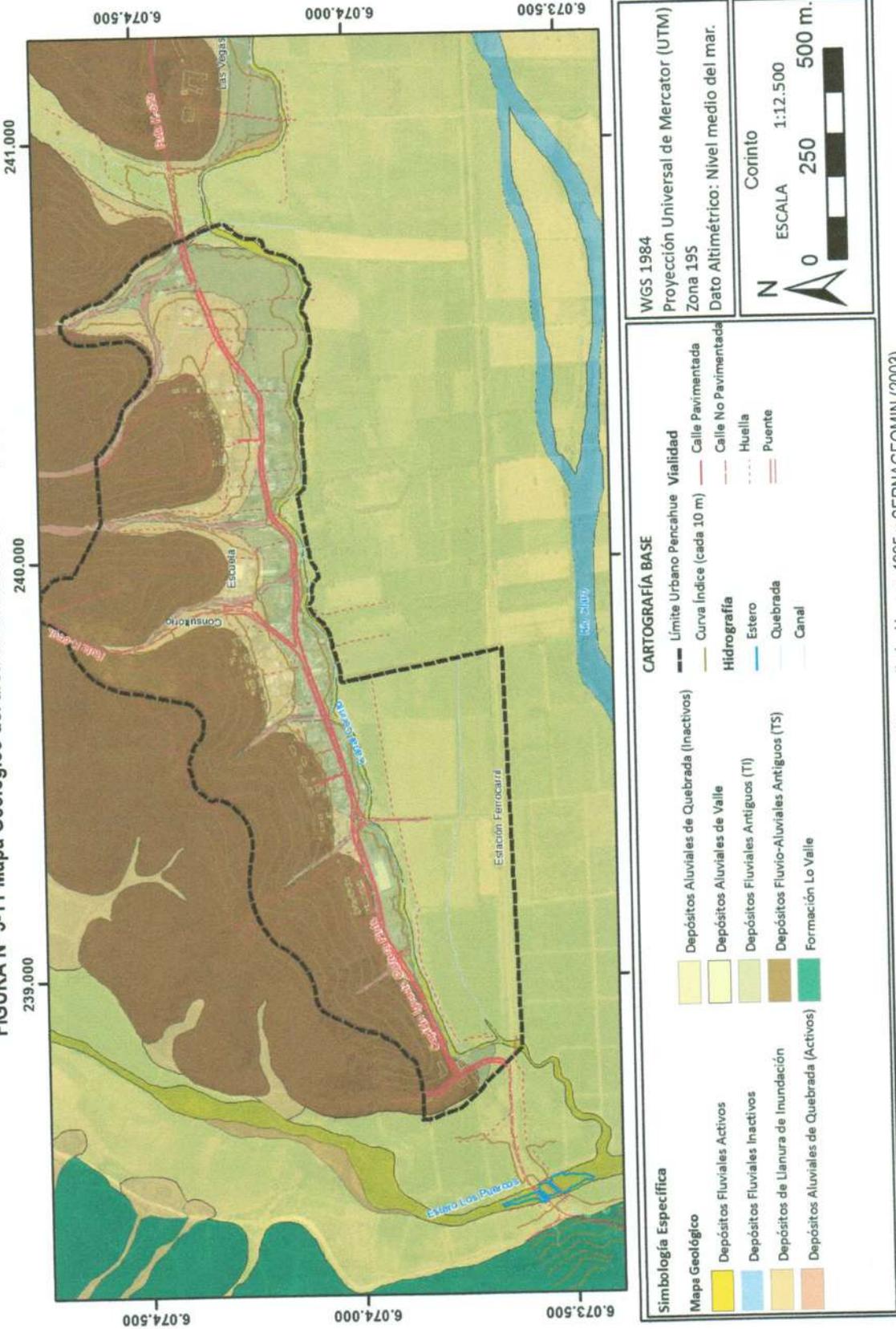


FIGURA Nº 3-11 Mapa Geológico del área de estudio, localidad de Corinto.



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

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.

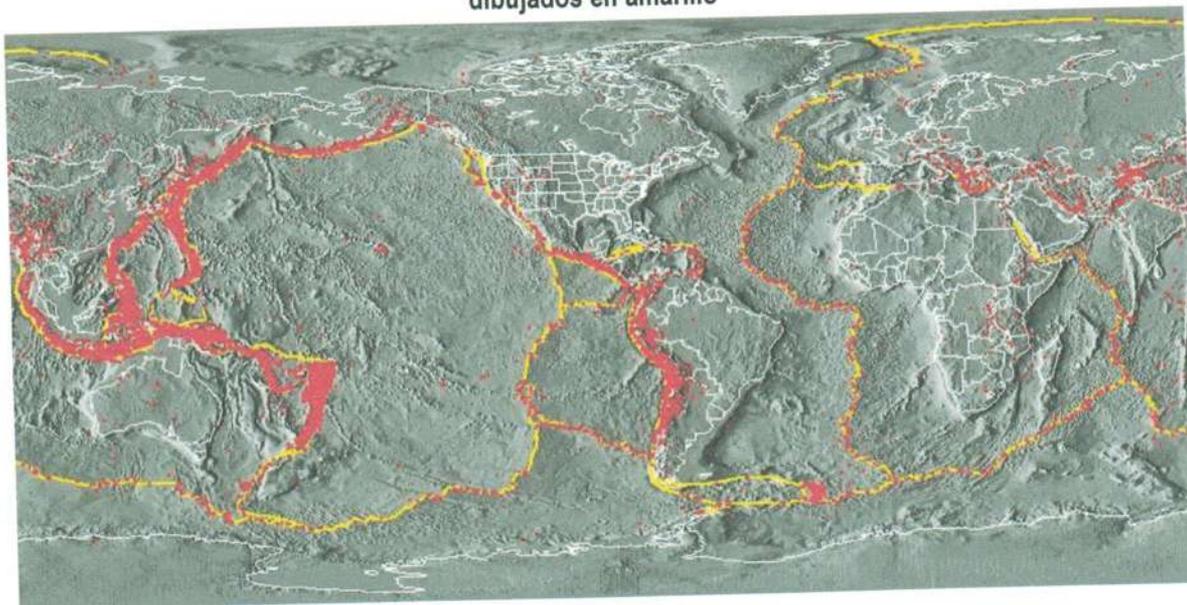
Para cada peligro, se describe en qué consiste, cuáles son sus factores condicionantes, y los principales efectos para la población y sus actividades. El análisis se realiza dividiendo los peligros geológicos en dos grupos, procesos internos o endógenos de la tierra (peligro sísmico y volcánico), y los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

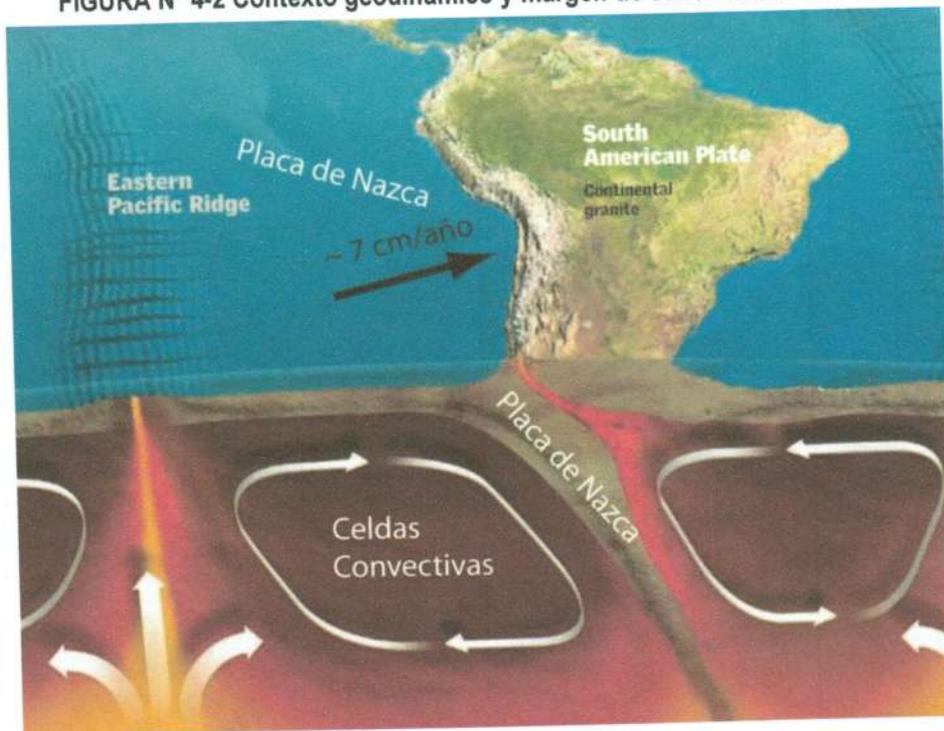
FIGURA N° 4-1 Sismicidad mundial entre los años 1980 y 1990, se representan en puntos rojos los epicentros con magnitud >5. Nótese como la sismicidad “ilumina” los límites de las placas tectónicas, dibujados en amarillo



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, que corresponde a:

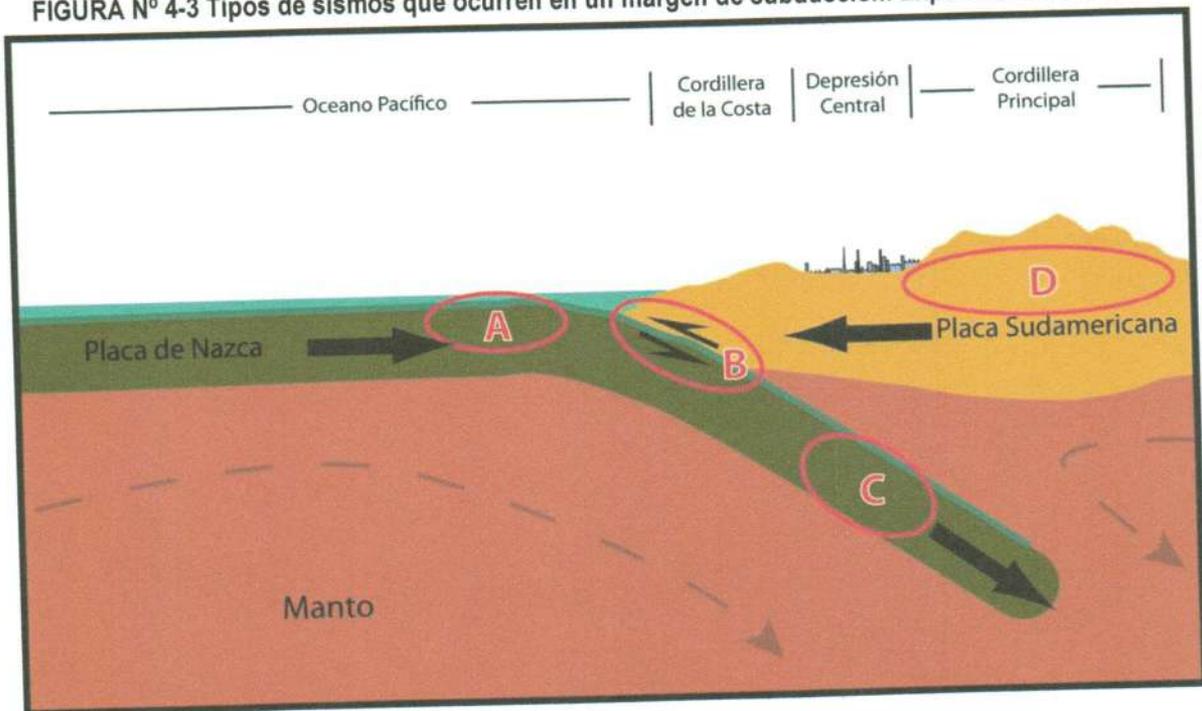
ZONA A) Sismos "Costa afuera", que se producen por los esfuerzos extensivos por abombamiento en la placa subductante antes de la zona de contacto. A pesar de llegar a tener magnitudes cercanas a $M_w = 6$, prácticamente no causan efectos significativos en áreas pobladas debido a su ocurrencia en zonas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

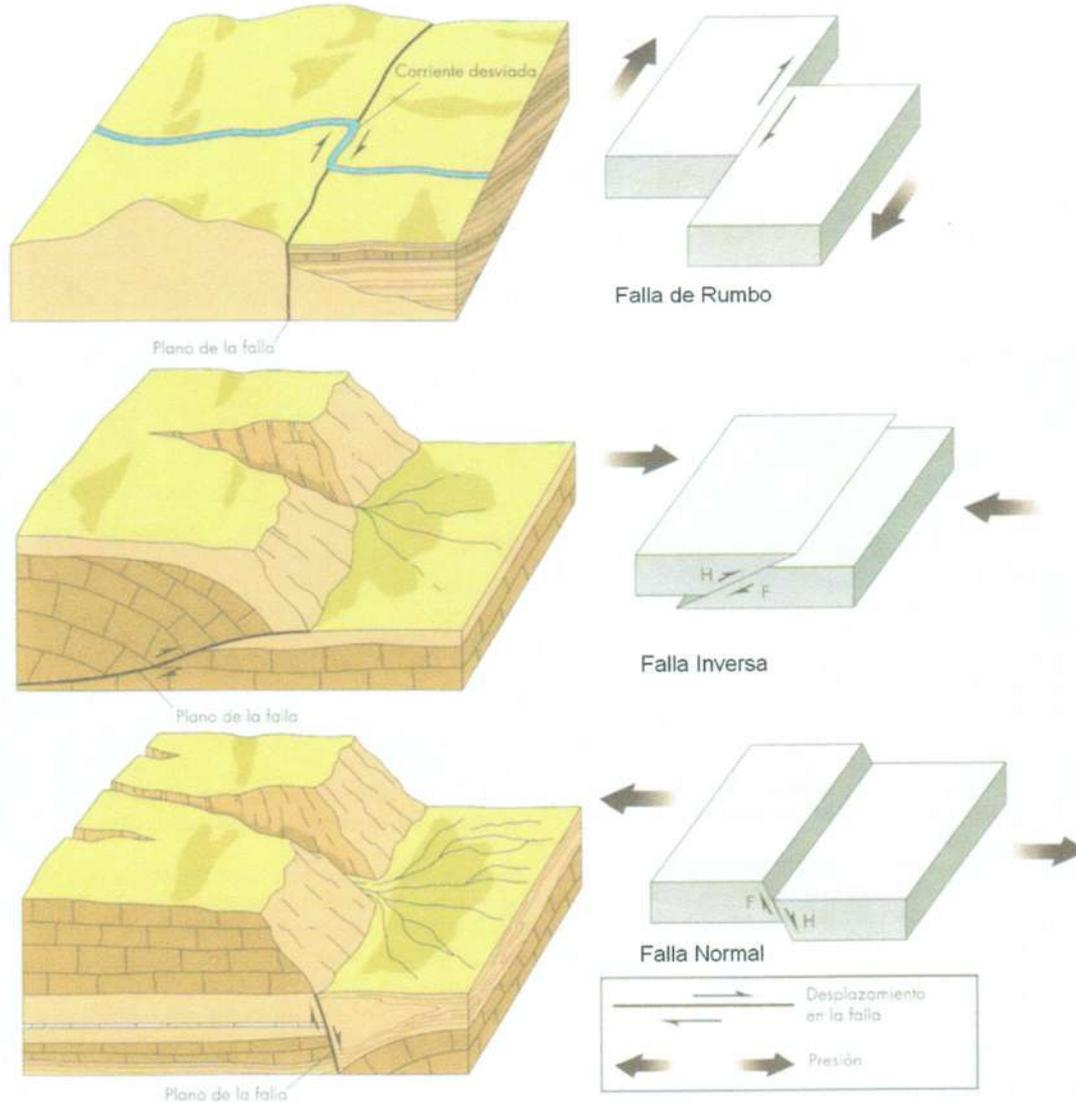
FIGURA N° 4-3 Tipos de sismos que ocurren en un margen de subducción. Explicación en el texto



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.

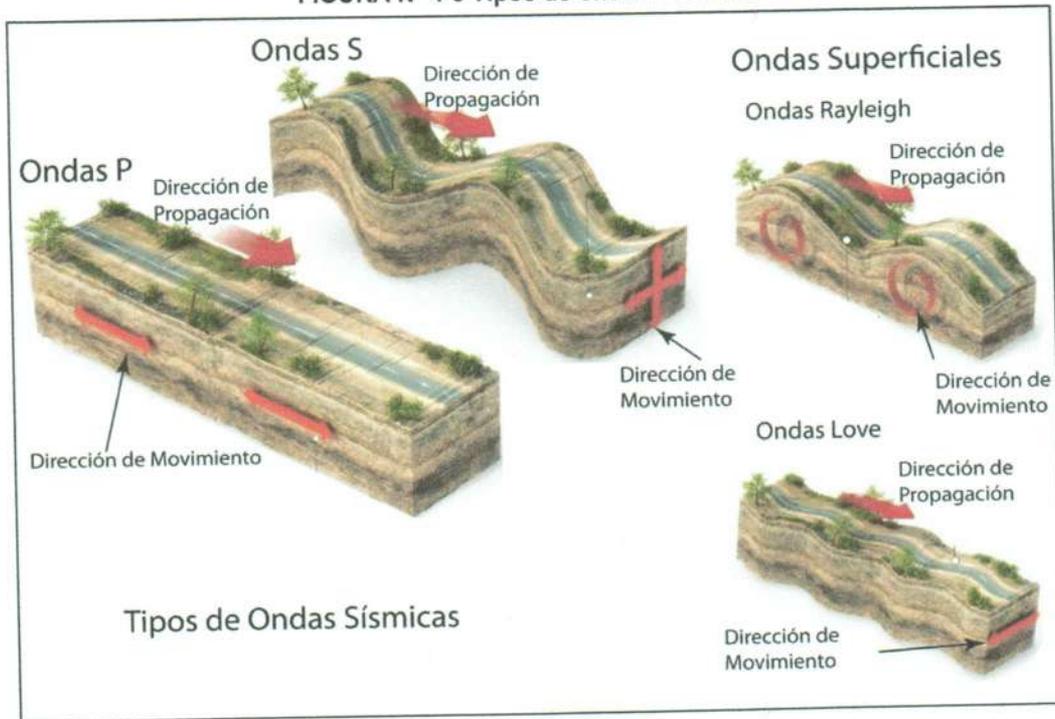
FIGURA N° 4-4 Tipos de falla y esfuerzos asociados



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 tienden a tener movimientos de mayor frecuencia, ambos tipos corresponden a los de carácter 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 N° 4-5 Tipos de ondas sísmicas



Fuente: Modificado de Enciclopedia Britannica (2008).

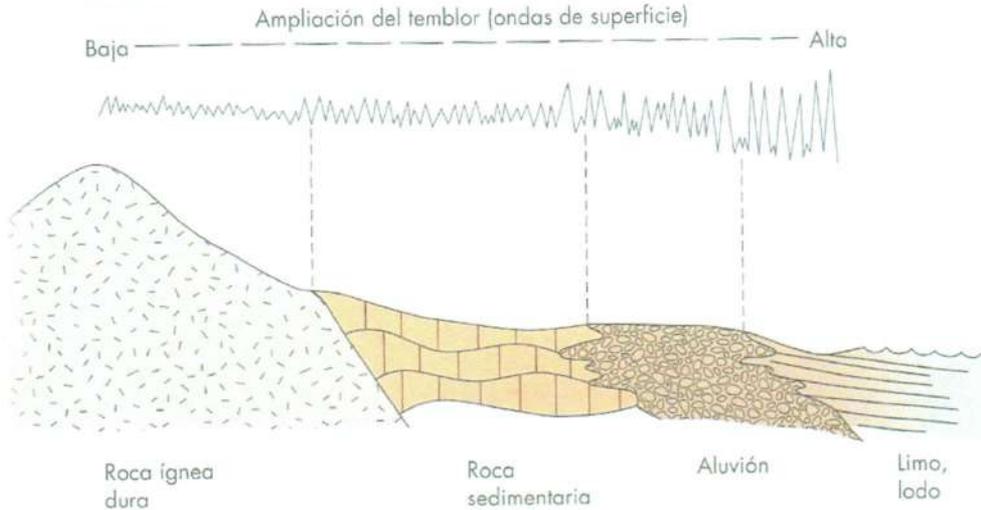
Para medir los sismos se utilizan, principalmente, dos escalas: *magnitud* e *intensidad*. La *magnitud* es una medida única y objetiva, que normalmente se relaciona con la escala de RICHTER (M_s). Actualmente para grandes sismos se utiliza la escala de magnitud de momento (M_w) que se calcula a partir 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 N° 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".

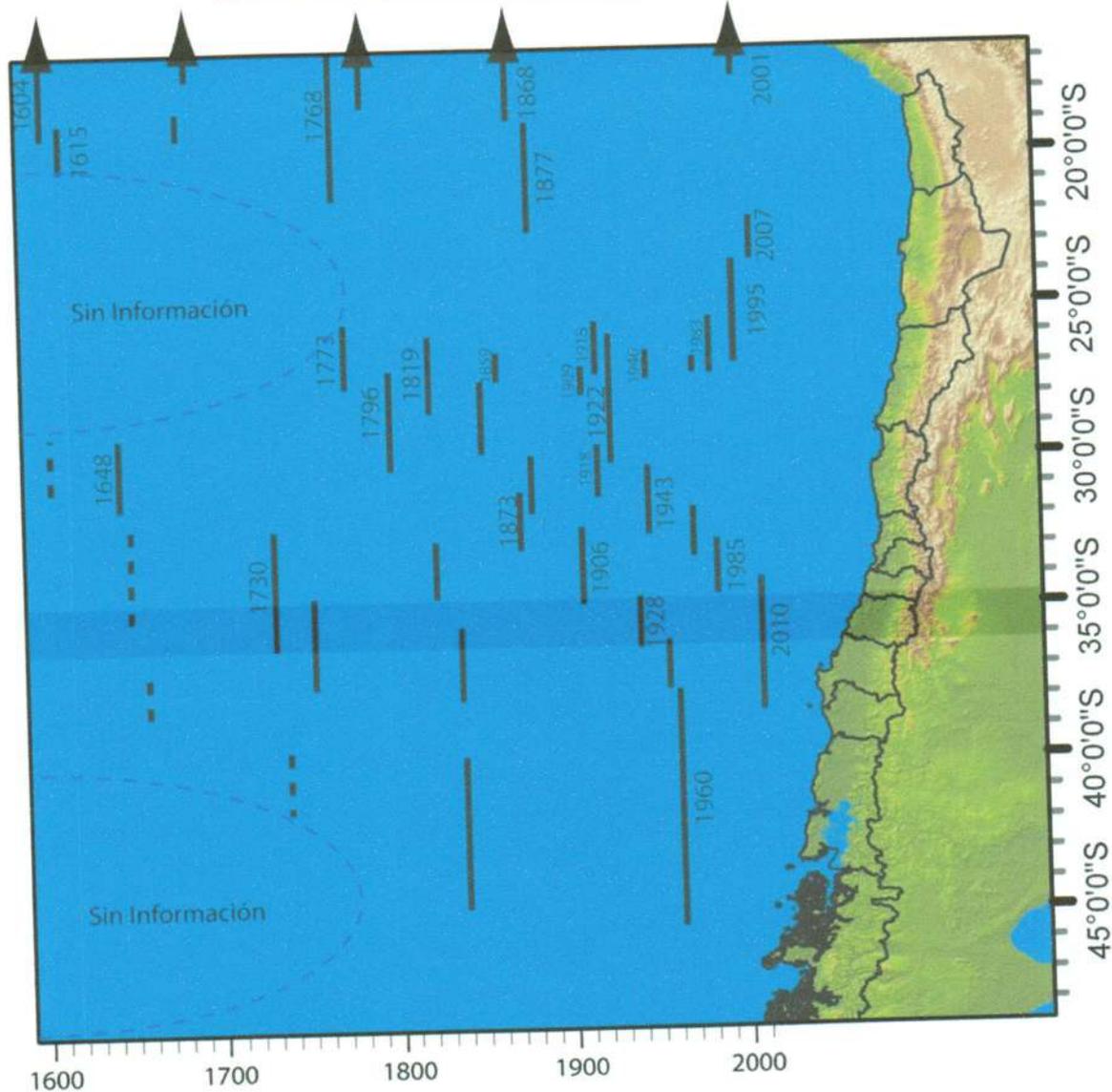
4.1.2.1 Antecedentes Históricos de Terremotos en Chile entre los 33° y 40°S.

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. 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 Chiloé 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, Hawai, 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 Hawai, 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 horas. 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 Hawai, 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

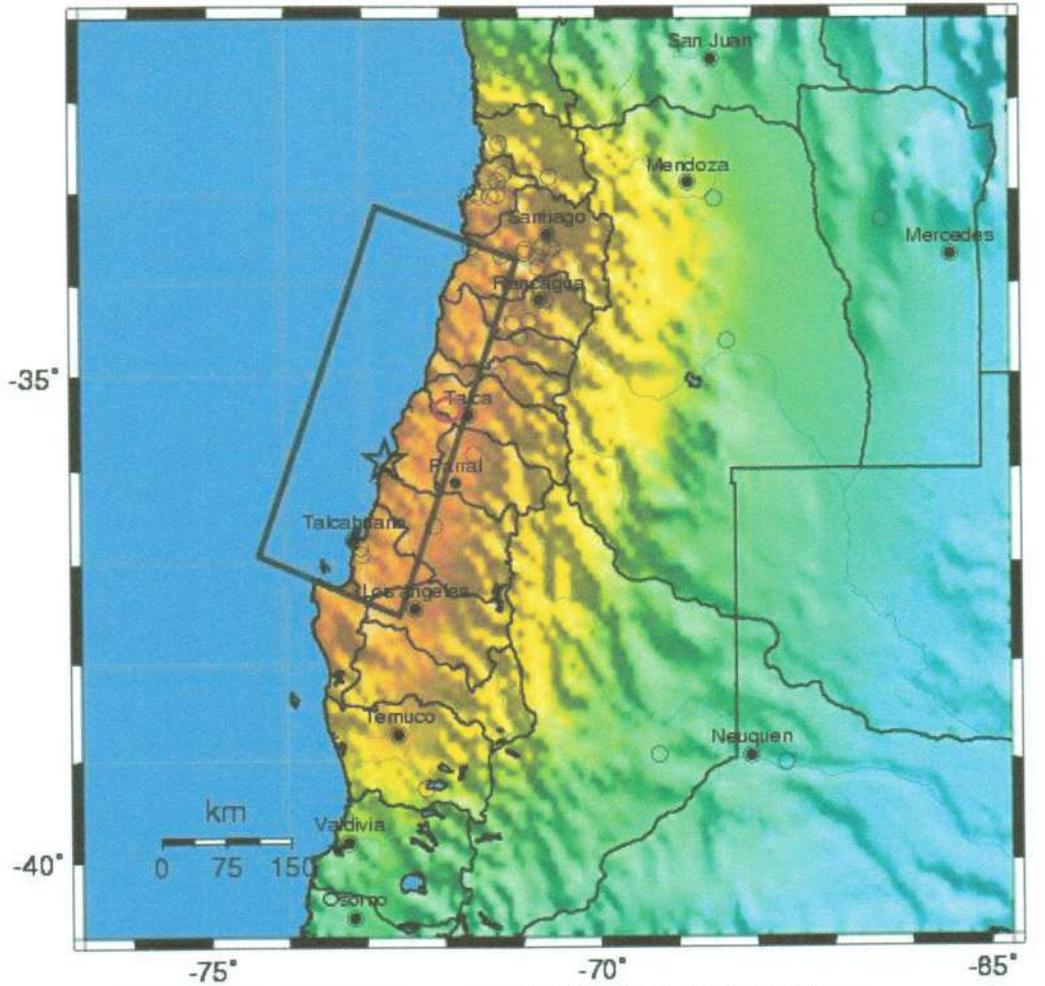
Terremoto del 3 de Marzo de 1985. Terremoto en Valparaíso. Extenso daño en Valparaíso y pueblos aledaños. Hubo 177 muertos y miles de heridos. Se produjo un pequeño maremoto que no produjo daños, pero fue registrado a lo largo de la costa de Chile.

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.

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 Pencahue está indicada por el círculo rojo.



Map Version 7 Processed Fri Mar 5, 2010 03:00:13 AM MST -- NOT REVIEWED BY HUMAN

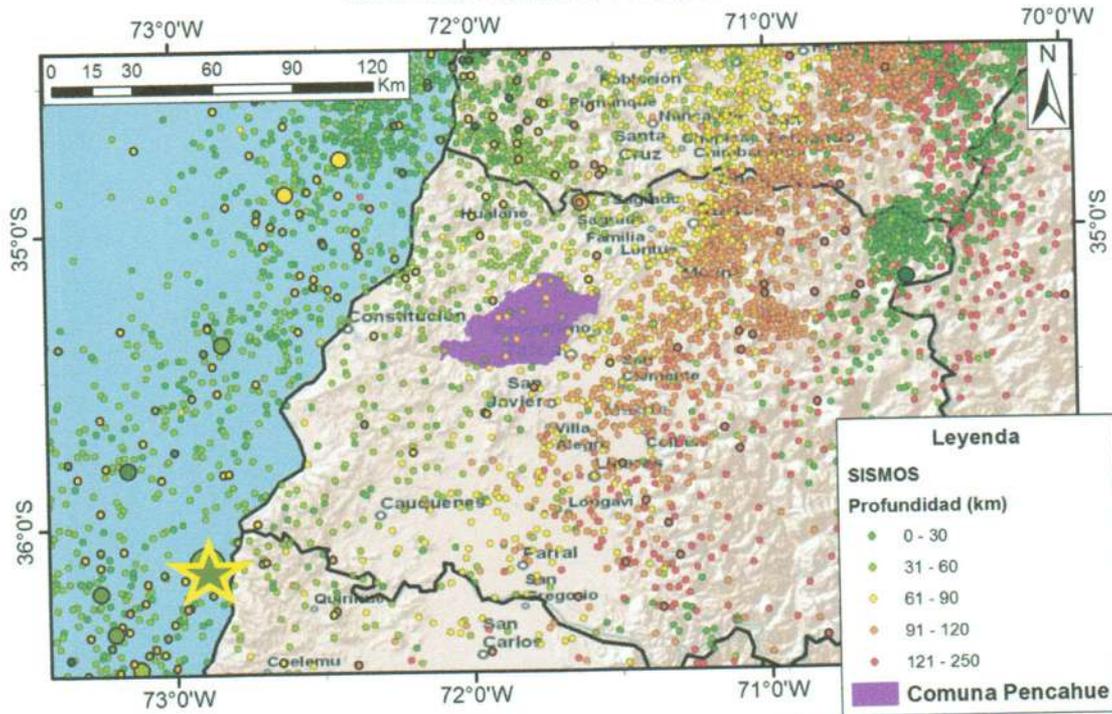
PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC.(%g)	<.17	.17-1.4	1.4-3.9	3.9-9.2	9.2-18	18-34	34-65	65-124	>124
PEAK VEL.(cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-16	16-31	31-60	60-116	>116
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/2010tfan/>

4.1.2.2 Fuentes Sísmicas en el área de estudio

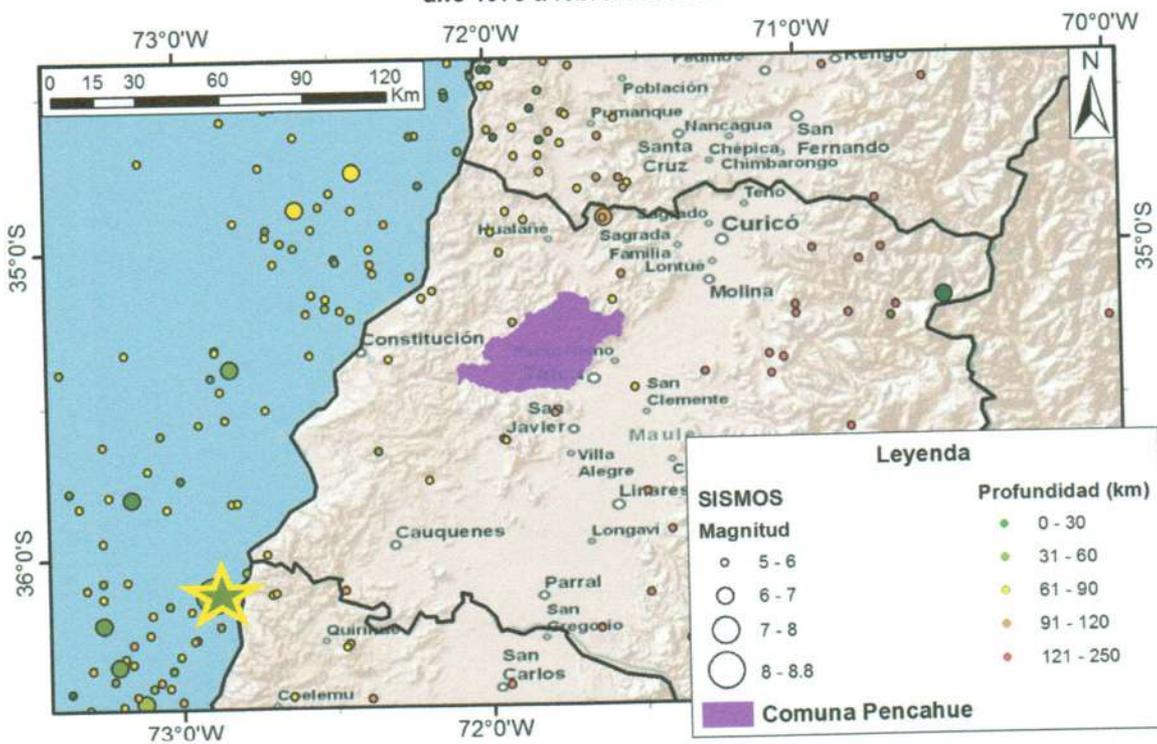
En la FIGURA N° 4-9 se muestran los todos sismos ocurridos entre 1973 y febrero de 2011 en el área de estudio y sectores cercanos, recopilados a partir del Catálogo NEIC del Servicio Geológico Estadounidense (USGS) y en la FIGURA N° 4-10 se detallan sólo los sismos de magnitud mayor a 5.

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/neic>)

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

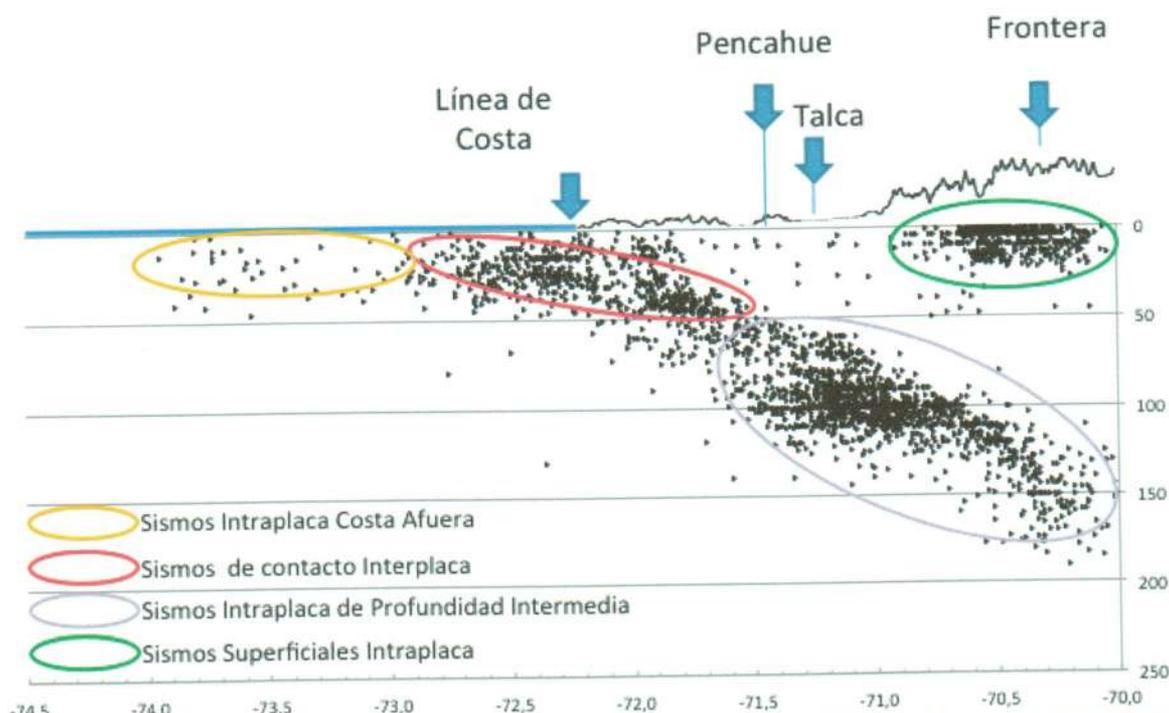


Fuente: Elaboración propia en base al Catálogo NEIC 1973-2011 del USGS (disponible en <http://earthquake.usgs.gov/regional/neic>)

En el área de estudio, se reconocen las siguientes fuentes sísmicas, destacadas en la FIGURA N° 4-11:

- **Sismos Intraplaca Costa Afuera:** 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, por lo que no es una fuente sísmica que pueda afectar potencialmente a la comuna de Pencahue.
- **Sismos Interplaca o de Subducción:** Corresponden a aquellos eventos que se producen en el contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana (ver). Se extienden desde la fosa hasta unos 50 km de profundidad, límite máximo del contacto en la zona de estudio. Este tipo de eventos alcanzan grandes magnitudes, como el gran terremoto de Valdivia de 1960 ($M_w=9.5$) y del 27 de febrero reciente (Maule 2010, con $M_w=8.8$), por lo que se considera una fuente activa que puede generar terremotos destructivos en la zona.

FIGURA N° 4-11 Ubicación espacial de epicentros en profundidad a la latitud 35° S. Fuentes sísmicas que afectan al área de estudio



Fuente: Elaboración propia en base al Catálogo NEIC 1973-2011 del USGS (disponible en <http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/>) y Modelo de elevación SRTM

- **Sismos Intraplaca de Profundidad Intermedia:** Esta fuente está compuesta por sismos que ocurren dentro de la placa de Nazca, después de la zona de contacto; ellos poseen profundidades mayores de 50 km y llegan hasta los 150-200 km. Recientemente, se ha puesto en evidencia que este tipo de eventos poseen notorias diferencias con los de

contacto interplaca en las características de la fuente, reflejándose en mayores daños producidos en la zona epicentral y altas aceleraciones máxima reportadas. Este tipo de fuente se caracteriza por tener una magnitud máxima creíble de $M_S=8.0$, similares al terremoto de Chillán de 1939. Se considera como una fuente posible para generar terremotos en la zona.

- **Sismos Superficiales Intraplaca:** Corresponde a sismos producidos por fallas superficiales, cuyos focos se encuentran a una profundidad menor a 30 km, y están asociados a fallas geológicas activas en superficie, pudiendo generar sismos de magnitud $M_w = 7$, similares al terremoto del Teno del año 2004. Sin embargo,

4.1.2.3 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, 2003; PMA, 2008) y no se han reconocido fallas activas o evidencias de fallas a partir del trabajo en terreno.

† Millones de años

‡ Miles de años

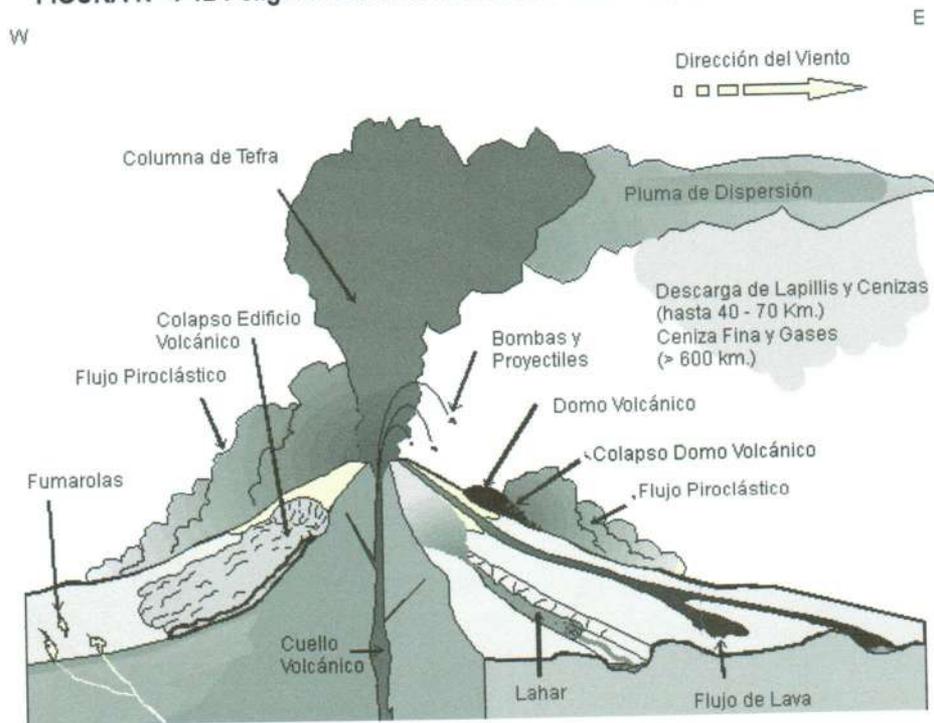
4.2 *Procesos Internos o Endógenos de la Tierra – VOLCANISMO*

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° 4-12.

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 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.

FIGURA N° 4-12 Peligros volcánicos asociados a la erupción de un volcán



Fuente: Myers y Brantley (1995)

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.

CUADRO N° 4-1 Peligros asociados al volcanismo

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

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

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.

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 Quizapú en el año 1932, cuya pluma de ceniza alcanzó la ciudad de Johannesburgo, Sudáfrica.

4.2.2 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, así como cuales fueron las áreas afectadas por los productos de la erupción. 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 120 km de distancia del arco volcánico actual (FIGURA N° 4-13), por lo que se considera que la influencia del peligro volcánico es más bien indirecta, sin embargo no se descarta peligro producto de caída de cenizas. Entre 33° y 37° de Latitud Sur, los centros volcánicos con registros de actividad histórica son: el complejo volcánico Planchón-Peteroa, el grupo Descabezado-Azul-Quizapú y los centros volcánicos asociados a la Laguna del Maule (CUADRO N° 4-2).

Al Norte del área de estudio, destacan los volcanes Planchón, Peteroa y Azufre, de los cuales el único activo durante el Holoceno corresponde al Peteroa, que muestra actividades desde 1.660 hasta la actualidad. Destacan la erupción de 1.762, donde ocurrieron violentas erupciones acompañadas del colapso del edificio volcánico, provocando 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

umentaron 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 último con violencia un nuevo camino e inundó todos aquellos campos" (Urrutia y Lanza, 1993).

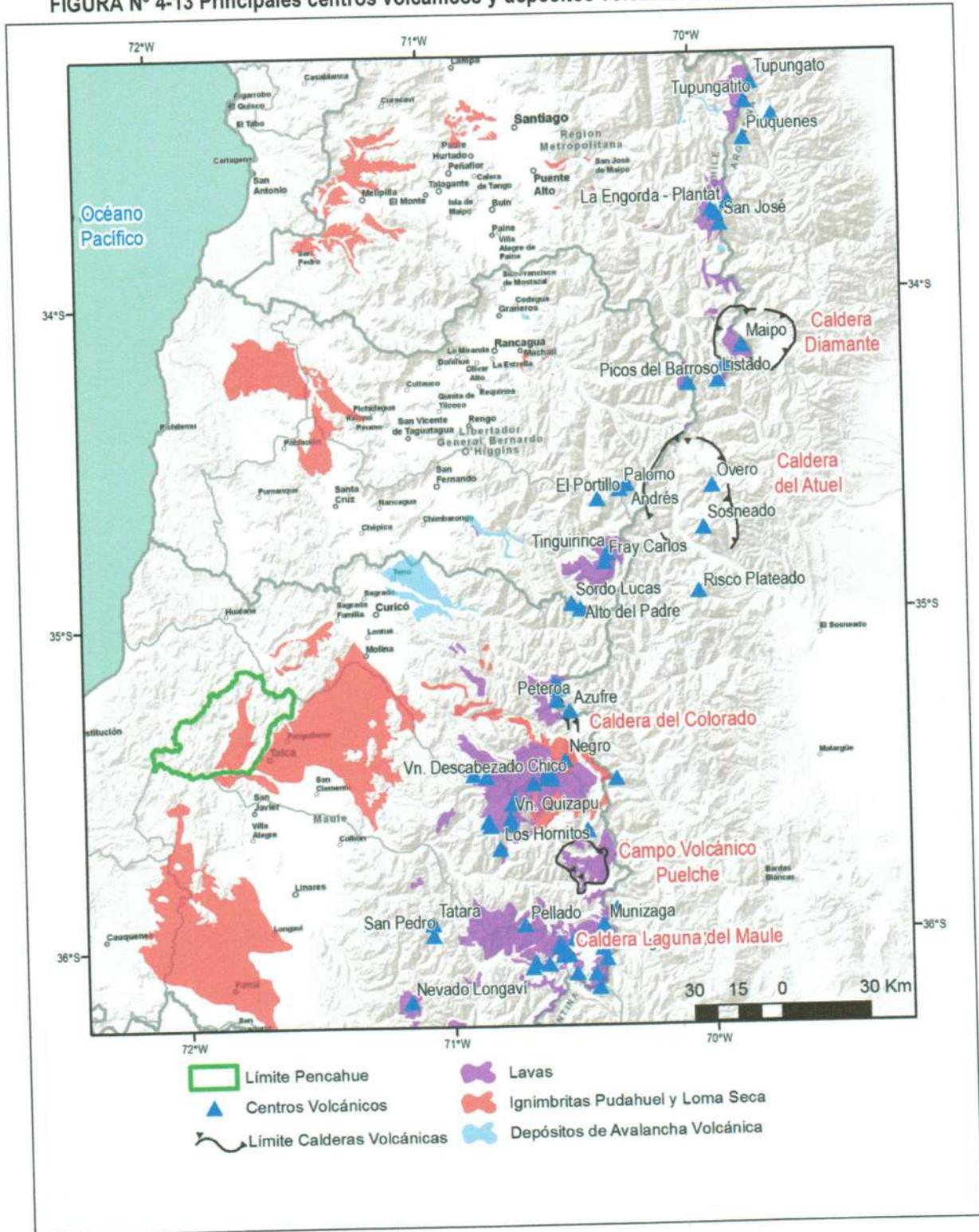
CUADRO N° 4-2 Principales volcanes en sectores cercanos al área de estudio

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 – Quizapú	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.

Las erupciones posteriores del complejo Planchón - Peteroa (1.835, 1.837, 1.869, 1.878, 1.894, 1.937, 1.959, 1.960, 1.962, 1.967, 1.985, 1.986, 1.987, 1.991), han sido de carácter explosivo, con generación de lahares, columnas de tefra y caída de cenizas en la depresión Central y Argentina, lo cual sumado a la constante presencia de fumarolas durante este año sugiere que el volcán Planchón-Peteroa es muy activo. El mayor peligro de este complejo es la generación de lahares, pues dada la configuración de la red hidrográfica, estos se movilizarían grandes distancias aguas abajo hacia la depresión central, abriéndose camino por los ríos Teno y Claro de acuerdo a lo expuesto por González-Ferrán (1995).

FIGURA N° 4-13 Principales centros volcánicos y depósitos volcánicos entre los 33° S y 36° S



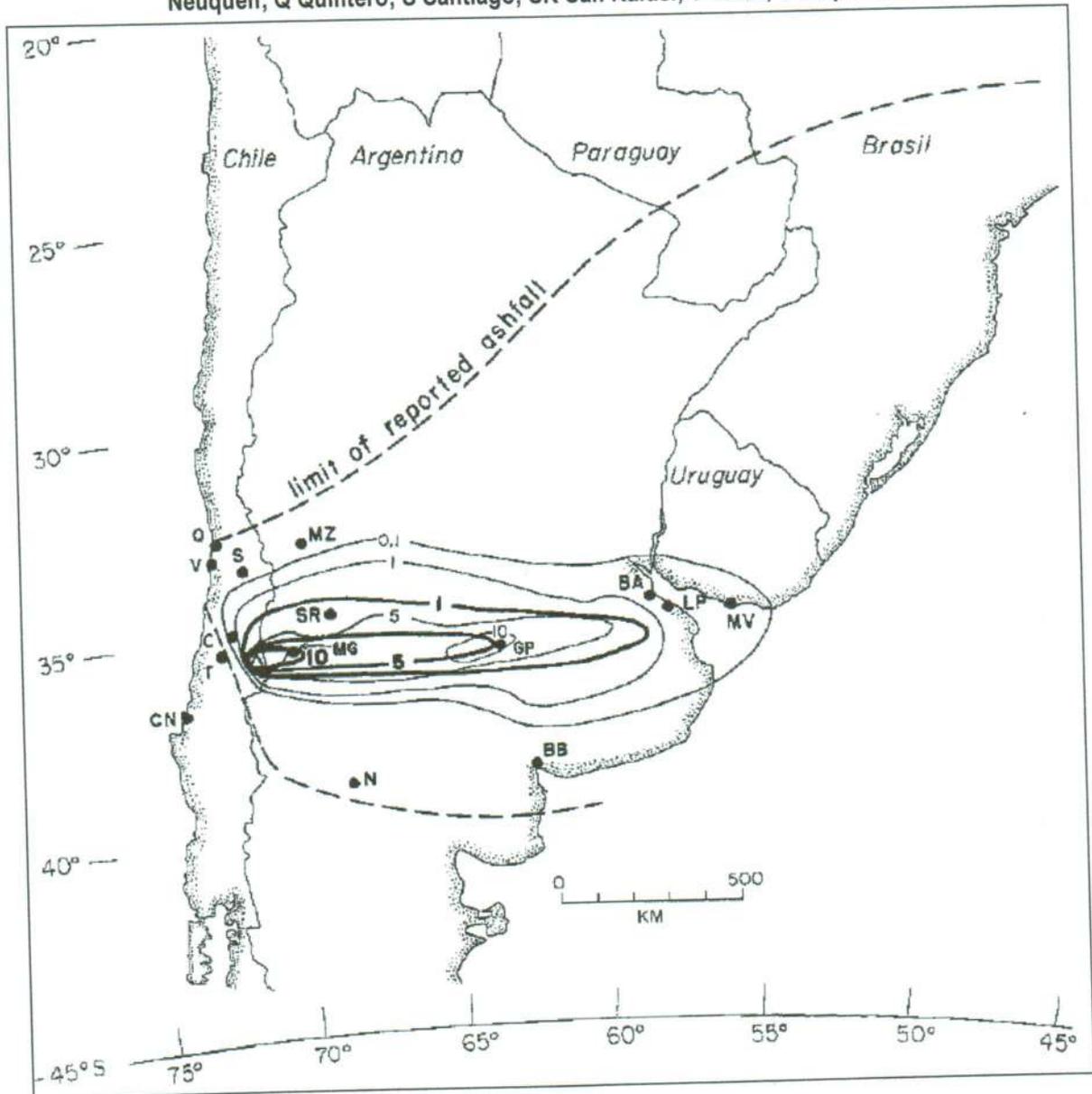
Fuente: Elaboración propia a partir de González-Ferrán (1995), SERNAGEOMIN (2003) y Eyquem, (2009).

En la parte oriental del área de estudio, el principal agente de peligro volcánico es el cordón de los Descabezados – Azul – Quizapú. 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 Quizapú, ha presentado varias erupciones históricas, donde destacan la erupción de 1.846, el ciclo eruptivo de 1.907 a 1.932 que finaliza con una gran erupción en 1.932, y pequeños ciclos eruptivos posteriores. La erupción de 1932 del Quizapú es una de las más explosivas reportadas en Chile Central. Se inició a las 8:00 horas 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° 4-14) 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 perdida de hectáreas cultivables (González-Ferrán, 1995).

Las características de las erupciones históricas muestran que el volcán Quizapú 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 ríos Blanquillo, Lircay, y Lontué, que corresponde a un afluente del río Mataquito.

En la FIGURA N° 4-13 y FIGURA N° 4-13 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 reconoce la "Ignimbrita Pudahuel" de 440 Ka (Stern et al., 1984) asociada a la erupción de la Caldera El Diamante, y también las "Cenizas de Loma Seca", las cuales afloran en gran parte de la Depresión Central. Este depósito corresponde en realidad a tres grandes flujos piroclásticos de 800.000, 300.000 y 150.000 mil años de antigüedad (Sruoga, 2002), asociados al colapso de la caldera volcánica "Loma Seca". Los flujos piroclásticos se originan producto de erupciones explosivas, poseen altas temperaturas y velocidades, por lo que se trasladan grandes distancias. Es por esto que el peligro volcánico puede existir en una región aún cuando esta se encuentre muy alejada de los centros volcánicos.

Figura N° 4-14 Mapa de Isópacas de erupción de 1.932 del Quizapú, 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.

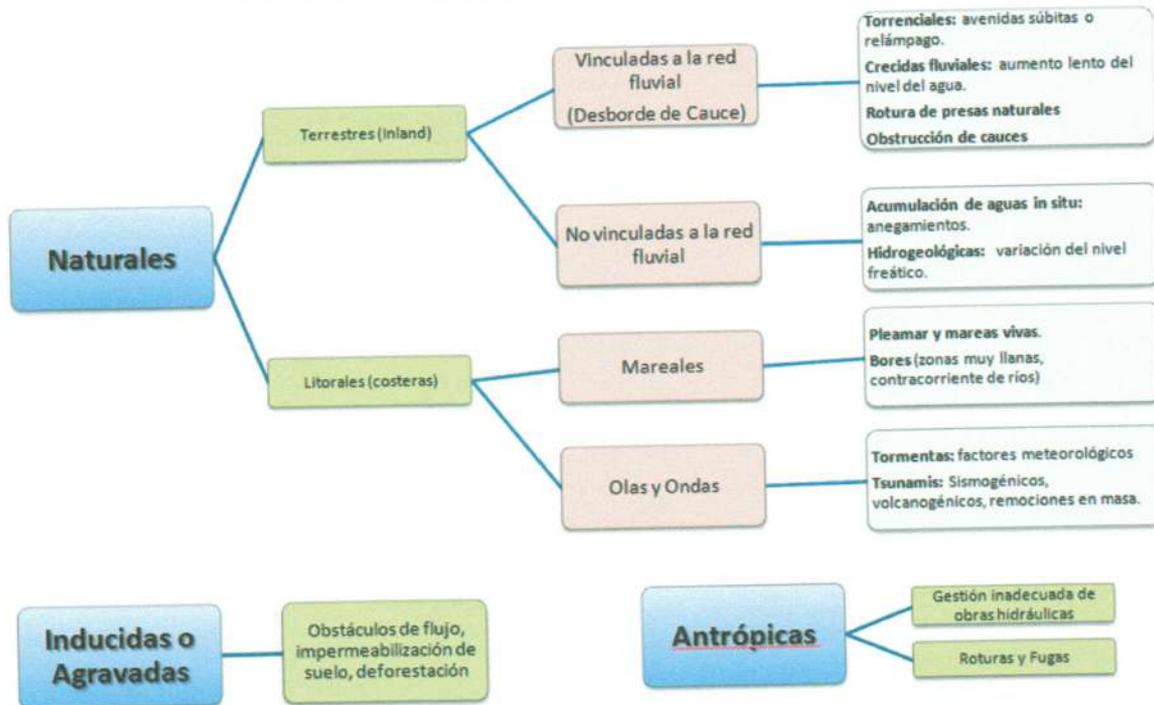
4.3 Procesos Exógenos o Externos de la Tierra – INUNDACIONES

4.3.1 Descripción del Peligro Geológico

Las inundaciones, sin considerar aquellas generadas por causas antrópicas, pueden ser de dos tipos (FIGURA N° 4-15): (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.

FIGURA N° 4-15 Clasificación de los tipos de inundaciones



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

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.

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

1. 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.
2. La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno
3. 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.

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:

1. 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.
2. La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno
3. 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

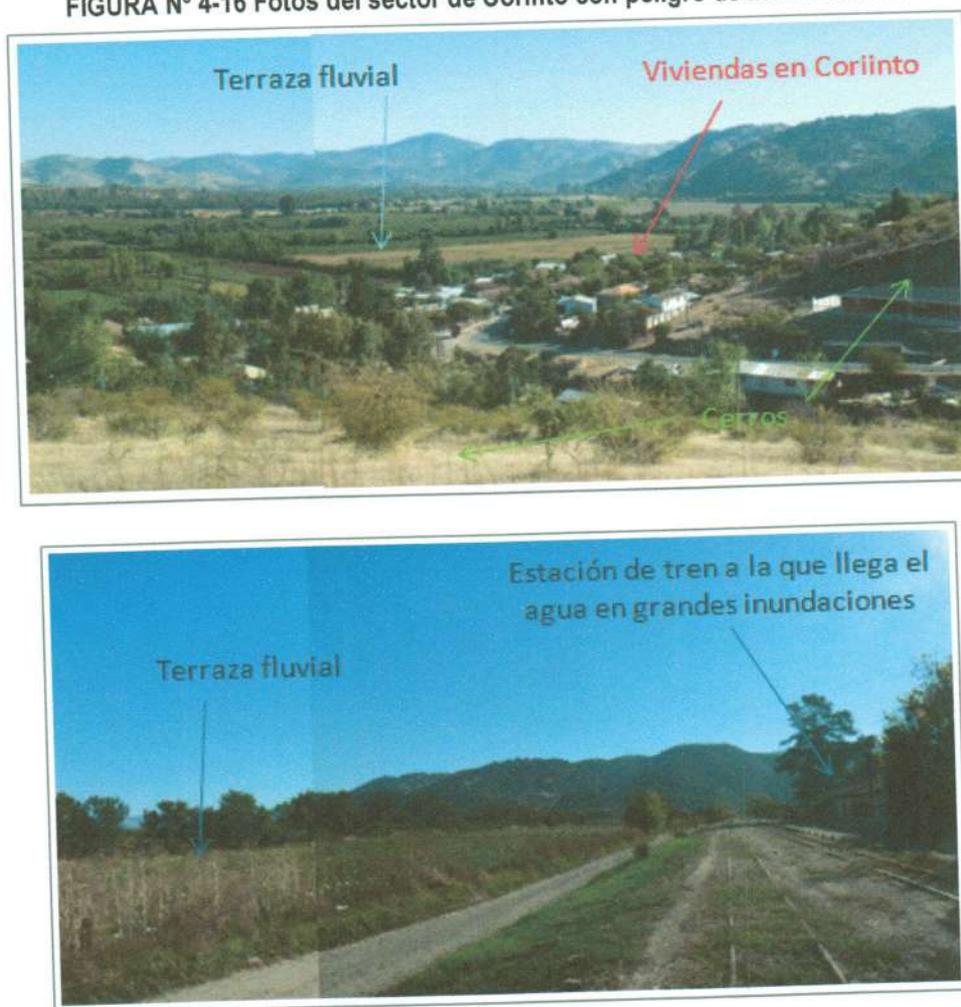
Para el caso de este peligro, se ubicaron los puntos donde ocurren con mayor frecuencia las inundaciones tanto por desborde de cauce como por anegamiento. Se describen los mayores eventos reportados, así como su ubicación espacial, alcance y daños reportados. En base a la recopilación realizada, se diagnosticó y describió la susceptibilidad para el peligro geológico reconocido en el subcapítulo 5.2.1 “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 en la duración de la estación seca y la precipitación total anual. La estación lluviosa en esta región es principalmente durante 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, llanuras de inundación y terrazas de los cursos fluviales principales. Además, personal de la Dirección de Obras de la Municipalidad de Pencahue informó cuáles son los sectores que más frecuentemente se ven afectados por inundaciones. En el caso de Corinto (FIGURA N° 4-16 Fotos del sector de Corinto con peligro de inundaciones) éstos sectores corresponden a la llanura de inundación del río Claro, donde se han reportado inundaciones por desborde de cauce donde las aguas han alcanzado hasta la estación de trenes de Corinto (FIGURA N° 4-16 Fotos del sector de Corinto con peligro de inundaciones). Para el sector de Pencahue no se encontraron reportes de inundaciones por desborde de Cauce y/o anegamientos.

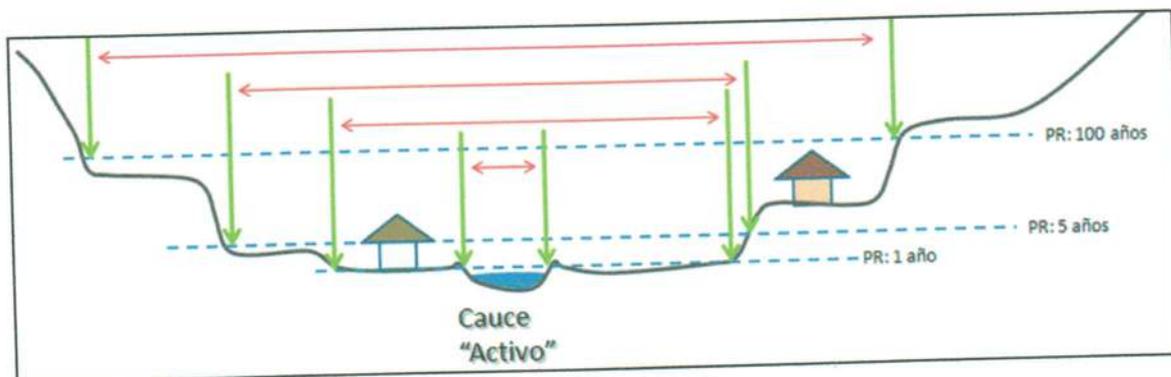
FIGURA N° 4-16 Fotos del sector de Corinto con peligro de inundaciones



Fuente: Elaboración propia

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° 4-17 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).

FIGURA N° 4-17 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

4.4 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° 4-18). 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.

4.4.1.2 Deslizamientos

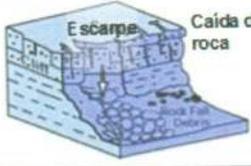
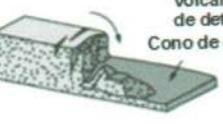
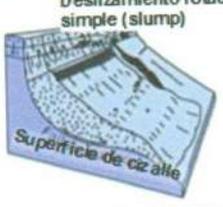
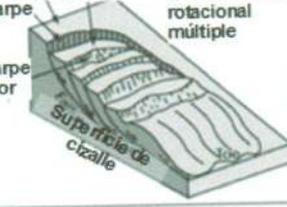
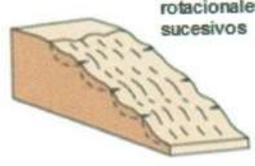
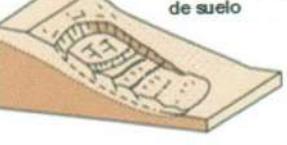
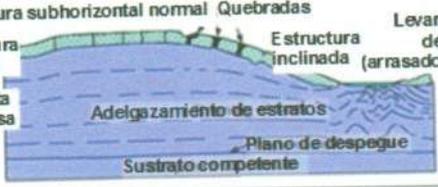
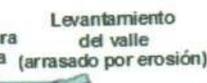
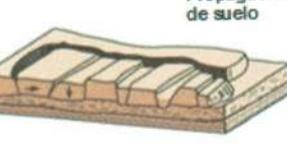
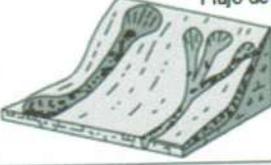
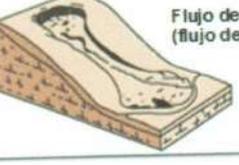
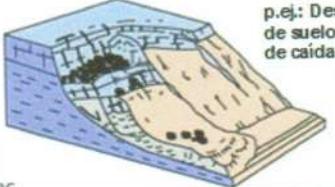
Los deslizamientos son remociones en masa en las cuales las masas de suelo o roca se deslizan principalmente a lo largo de superficies de ruptura, al superarse la resistencia al corte, generando el movimiento del material en su conjunto (Hauser, 2000). Los volúmenes incluidos en estas remociones varían 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° 4-19). 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.

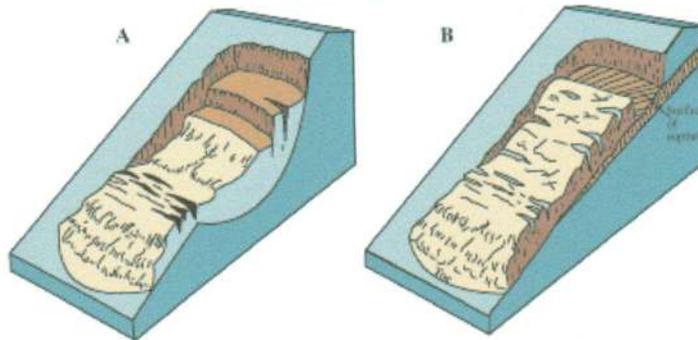
Los factores condicionantes de un deslizamiento corresponden principalmente a: los factores intrínsecos del suelo y la roca, las características geológicas (litología, estructuras, grado de alteración y meteorización, etc.), los factores geomorfológicos (pendiente, aspecto, curvatura, elevación, entre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

FIGURA N° 4-18 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 Coluvio Cono de detrito
	VOLCAMIENTO	 Volcamiento de roca	 Volcamiento de detrito Cono de detrito	 Volcamiento de tierra Cono de detrito
DESPLAZAMIENTO	Rotacional	 Deslizamiento rotacional simple (slump) Superficie de cizalle	 Cima Cabeza Escarpe Escarpe menor Superficie de cizalle Deslizamiento rotacional múltiple	 Deslizamientos rotacionales sucesivos
	Traslacional (planar)	 Deslizamiento de roca	 Deslizamiento de detrito	 Deslizamiento de suelo
PROPAGACION	 <p>Estructura subhorizontal normal Quebradas Cobertura de roca Estructura inclinada Limolita arcillosa Adelgazamiento de estratos Plano de despegue Sustrato competente</p>		 Levantamiento del valle (arrazado por erosión)	 Propagación de suelo
FLUJO	 Soliflucción (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° 4-19 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>

Por otro lado, estos fenómenos pueden ser generados por factores externos, denominados factores desencadenantes, 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:

1. 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.
2. La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno: En general, dado que estos procesos son de alta velocidad los daños potenciales son altos.
3. 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.
4. 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.

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:

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.

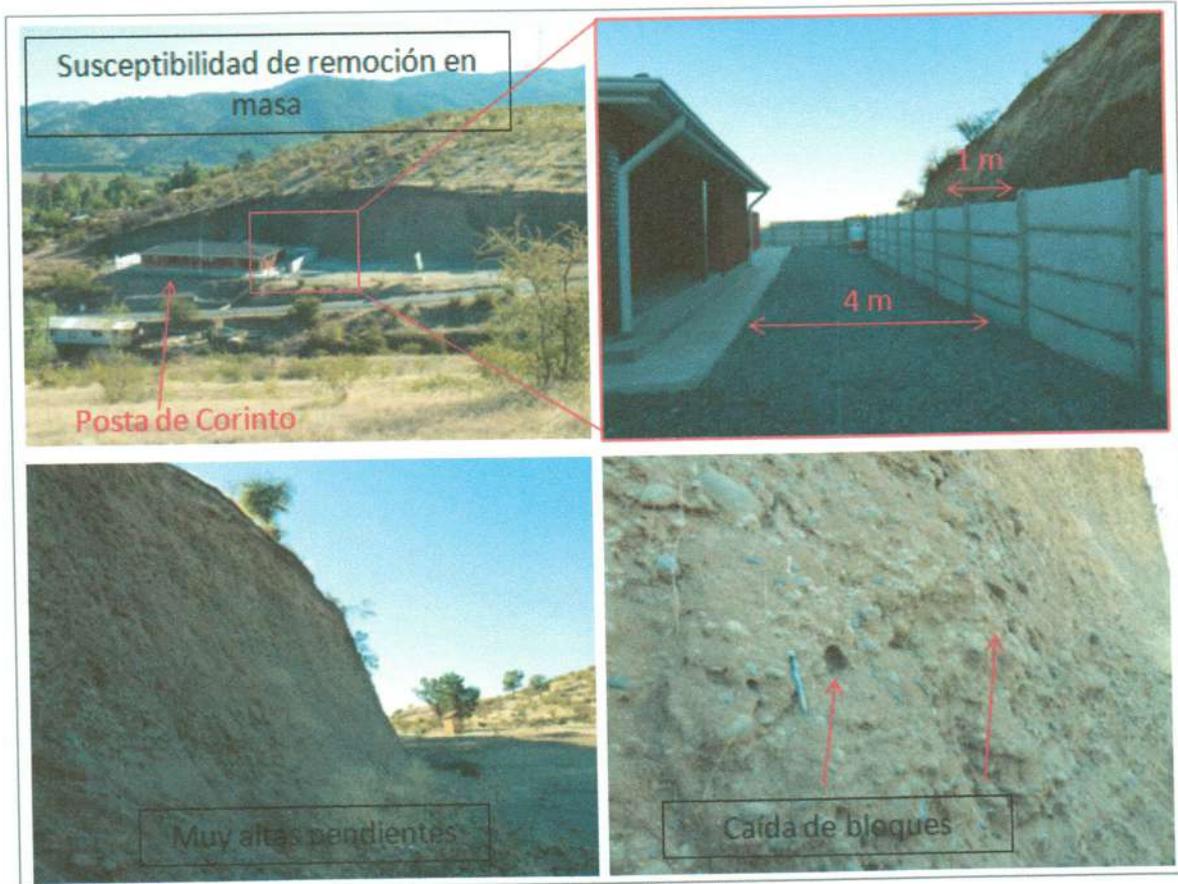
Este peligro geológico será tratado en conjunto con el peligro de inundación por desborde de cauce, ya que estos dos eventos comparten una serie de características comunes que permiten estudiarlos como un mismo proceso.

4.4.2 Resultados del Catastro de Información Histórica de Remociones en Masa

Para el caso de las remociones en masa, se analizaron las fotografías aéreas e imágenes satelitales de la zona, así como sectores donde existen depósitos antiguos de remociones en masa. 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 5.2.2 "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 sólo se identificó depósitos coluviales, asociados al peligro de caída de bloques en el sector de Corinto, principalmente (FIGURA N° 4-20).

FIGURA N° 4-20 Fotos del sector de Corinto con peligro de remociones en masa.



Fuente: Elaboración propia

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 menor 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 de gran magnitud, al igual que casi todo Chile. Luego de un fenómeno de la magnitud del terremoto del 27 de Febrero de 2010, es esperable que se generen sismos superficiales de baja magnitud (réplicas) durante varios años después del evento principal. Tal como se ilustra en la FIGURA N° 4-9, la densidad de sismos superficiales de baja magnitud es alta en la Comuna de Péncahue. Sin embargo, 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.

Los sismos de profundidad intermedia y los sismos corticales (en color amarillo, naranja y rojo en FIGURA N° 4-9 y FIGURA N° 4-10) 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.

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 encausamiento de lahares producidos por la erupción volcánica.

La Comuna de Péncahue se encuentra a una distancia de más de 120 Km del arco volcánico actual (Cordillera de los Andes), por lo cual el peligro de ser afectada directamente por la actividad volcánica es muy bajo. Para concluir lo anterior, se definieron las áreas susceptibles al peligro volcánico a mayor escala (FIGURA N° 5-1), se diferenciaron 3 tipos de zonificación: Peligro

Volcánico directo por erupción volcánica, sectores por donde se encauzarían lahares y flujos piroclásticos, y zona de caída de cenizas.

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 (previa y post erupción), caída de bombas piroclásticas, además de caída de cenizas y tefra. Además, en este sector el derretimiento de hielos puede generar lahares e inundaciones.

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, donde estos entren 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 cual, al momento del colapso se transformará en energía cinética.

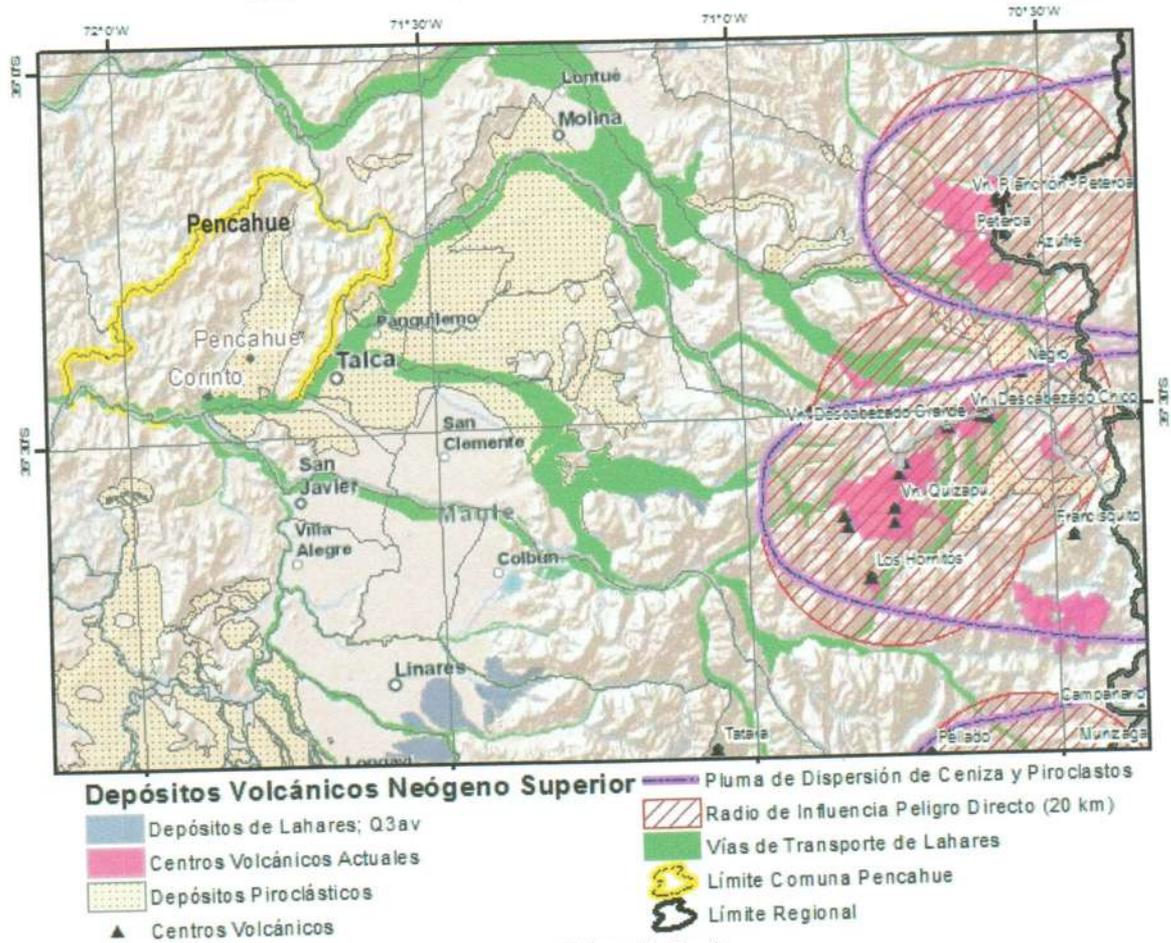
Cabe destacar que los flujos piroclásticos y lahares son capaces de remontar el relieve, por lo que la zonificación planteada solo demarca las vías de flujo preferencial y no considera la colmatación del cauce.

Resumiendo lo anterior, puede concluirse que la probabilidad de que la Comuna de Penuhue sea afectada directamente por coladas de lava o flujos piroclásticos es muy baja, pues ésta se encuentra a casi 100 km de distancia de centros eruptivos activos.

Por otro lado, con respecto a la caída de tefra, se define una parábola para indicar el sector hacia donde se dispersarían principalmente las cenizas en función de los datos de erupciones históricas (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 Quizapú en 1932). La probabilidad de que pequeñas cantidades de ceniza alcancen la Comuna de Penuhue es muy baja.

No obstante lo anterior, existen consecuencias indirectas asociadas a una gran erupción volcánica. Luego de una erupción, los grandes volúmenes de material volcánico son transportados por los ríos y pueden rellenar el cauce actual rápidamente, produciendo cambios drásticos en el régimen hidrológico. Un ejemplo de lo anterior es la Terraza Superior del Claro, donde se reconocen las cenizas de Loma Seca, los cuales son producto de una gran erupción ocurrida cientos de miles de años atrás (ver sección 3.3 "Marco Geológico"). 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



5.2 Peligros Zonificables

5.2.1 Peligro de Inundaciones

5.2.1.1 Pencahue

Esta localidad se localiza en los suaves faldeos de lomajes pedemontanos transicionales, entre los cordones de cerros locales, ubicados al costado oriente del valle del Estero Los Puercos, y el fondo del valle. Estos relieves forman una rinconada abierta en la que el poblado, emplazado a unos 75 m.s.n.m., ocupa la parte superior de una pequeña cuenca de drenaje. Esta corresponde a las nacientes de un sistema de drenaje menor, el cual atraviesa la planta urbana en dirección de sur a norte, hasta confluir con el Estero Las Candongas, afluente del Estero Los Puercos.

Uno de los principales problemas que presenta la localidad de Pencahue, se relaciona los diversos drenes naturales que cruzan el área urbana hacia el Estero Las Candongas. Este dren local presenta un cauce poco incidido en el terreno que ocupa el sector urbano: una sección transversal

muy suave en algunos sectores y una notoria reducción de la pendiente al abandonar el sector de los cerros.

Estas condiciones, sumadas a la baja permeabilidad de los suelos, la baja pendiente y la alta compacidad de la cabecera de la microcuenca, determina una fuerte y rápida concentración de las aguas, con un reducido tiempo de respuesta frente a la ocurrencia de precipitaciones. Esto provoca aceleradas elevaciones del nivel de las aguas y su desborde hacia los terrenos bajos adyacentes.

Lo anterior se ve agravado por las soluciones llevadas a cabo por lugareños con el objetivo de evitar la inundación por desborde de cauce: la construcción de terraplenes en el borde del cauce adyacente a su sitio con tierra y escombros, disminuye la sección transversal del estero y tiende a provocar mayores inundaciones en la ribera opuesta.

Por otra parte, algunos afluentes menores que drenan las aguas de los cerros del sector oriental de Pencahue durante los eventos pluviométricos, parecen presentar su cauce obstruido o con alcantarillas de diámetro insuficiente (razón por que fácilmente se tapan), lo que producto de los terraplenes de las calles que los atraviesan lleva a generar terrenos inundables.

5.2.1.2 Corinto

La localidad de Corinto se encuentra ubicada en los faldeos de la ladera sur de un cordón de cerros menores, por lo que se encuentra atravesado por una serie de cauces menores. Las pequeñas cuencas de drenaje asociadas a estos cauces se encuentran parcialmente obstruidas por casas, obras de arte mal calculadas y vegetación, lo que ha provocado el ingreso de aguas durante los inviernos más lluviosos a propiedades.

Hacia el sector oriental del pueblo, se observan drenajes de mayor desarrollo a escala local, con fondos de valle estrechos unos y algo más amplios otros, los cuales escurren hacia el sur, hacia el Río Claro. Su mayor superficie de captación y, por lo tanto, los mayores caudales que pueden generar establecen escenarios de mayor posibilidad de desborde, principalmente en aquellos que presentan un cauce bien encajonado antes de salir al plan y cruzar el poblado. El manejo de los cauces y el adecuado dimensionamiento de puentes y alcantarillas en estos casos es fundamental como medida de prevención. Dadas las condiciones expuestas, los cauces y terrenos inmediatos de estos drenes son calificados con un alto nivel de riesgo.

Hacia el poniente, y fuera del área urbana, en el sector del cruce del Estero Los Puercos con el camino local se reconocen condiciones de alto riesgo por desborde, así como la presencia de terrenos de terrazas bajas fácilmente inundables. En este sentido, el lecho mayor del estero presenta condiciones de alto riesgo, y la terraza baja adyacente riesgo medio a sufrir inundaciones. Finalmente, un canal de riego recorre el límite sur del pueblo, bajo el cual sólo unas pocas familias habitan. Aunque la mayor parte del poblado se encuentra altimétricamente por sobre el canal, las familias mencionadas podrían resultar perjudicados de producirse desbordes de este sistema de riego, no siendo este el caso para los terrenos agrícolas inmediatos y sus cultivos, ya que se trata de una terraza fluvial que, aunque con mínima pendiente, posee suelos y sustrato con buena permeabilidad.

Finalmente, la llanura de inundación del río Claro a sido afectada en numerosas ocasiones por inundaciones por desborde de cauce, donde las aguas han alcanzado la línea del ferrocarril con facilidad.

5.2.1.3 Zonificación Peligro de Inundaciones

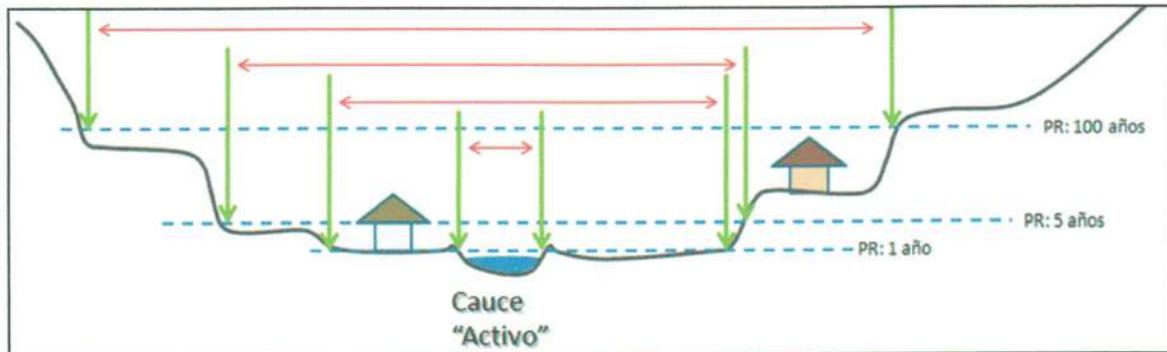
Las principales inundaciones que han afectado al área de estudio tienen relación con desbordos de cauces, ya sean naturales o artificiales, y generalmente se manifiestan con una frecuencia anual. A partir del análisis de fotografías aéreas e imágenes satelitales, el mapeo geológico y la información proporcionada por la Dirección de Obras de la Municipalidad, se identificaron los siguientes peligros de inundación:

- 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 de anegables correspondientes a humedales y/o zonas deprimidas, ya sean naturales o de origen antrópico.

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 este tipo de fenómenos son frecuentes y causa daños 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.

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° 5-2 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).

FIGURA N° 5-2 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

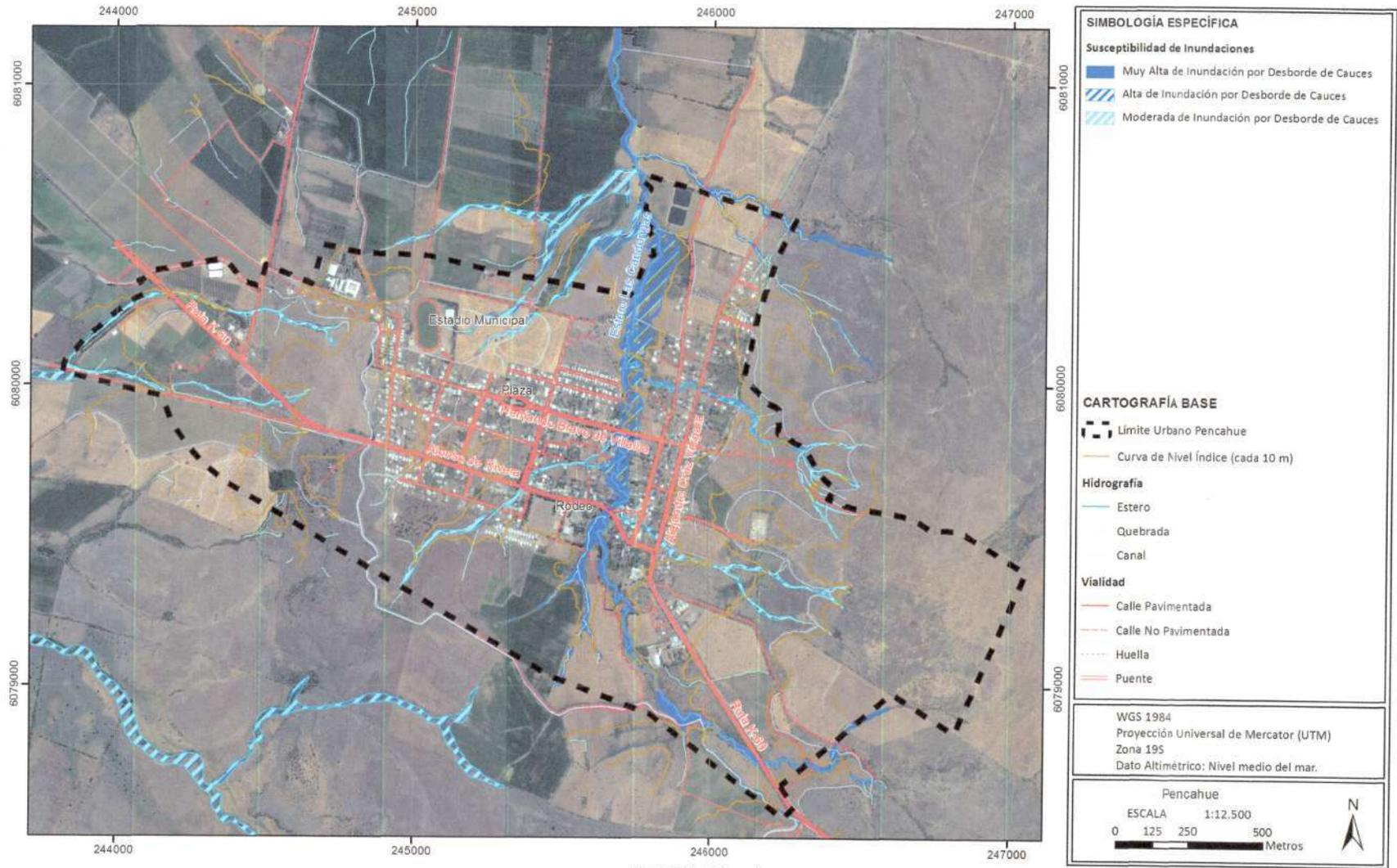
En este estudio no se realizaron modelos hidrológicos debido a la falta de series de precipitación y caudales. Por ello, no se realizaron mapas de peligrosidad o amenaza de inundaciones considerando el período de retorno y analizando el alcance máximo lateral del área de inundación sino que se tuvieron en cuenta, en el caso de los cauces naturales, las expresiones geomorfológicas y los depósitos asociados a cauces fluviales.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, se zonificó el peligro de inundaciones de la siguiente forma (FIGURA N° 5-3 y FIGURA N° 5-4):

- **Zonas de Moderada Susceptibilidad de Inundación:** Corresponde a los depósitos aluviales de quebrada Activos que se reconocen principalmente en las áreas de Pencahue y Corinto.
- **Zonas de Alta Susceptibilidad Inundación:** Corresponde a las llanuras de inundación del río Claro, Estero Los Puerros y Estero Las Candongas. Estas llanuras han sido inundadas normalmente durante períodos de precipitación extrema.
- **Zonas de Muy Alta Susceptibilidad Inundación:** Corresponde a los cauces activos de los principales cauces hídricos reconocidos en la zona, esto es, el estero Las Candongas, estero Los Puerros y el río Claro. Además considera cauces fluviales antiguos que han sido modificados para actuar como canales de regadío.

En el área de estudio no se identificaron sectores susceptibles de ser afectados por anegamientos.

FIGURA N° 5-3 Zonas de susceptibilidad de inundaciones para las localidades de Pencahue.



Fuente: Elaboración propia

FIGURA N° 5-4 Zonas de susceptibilidad de inundaciones para las localidades de Corinto.



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 asociados a depósitos fluvio-aluviales antiguos o depósitos de roca 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 eventos (sísmicos o de precipitación).

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

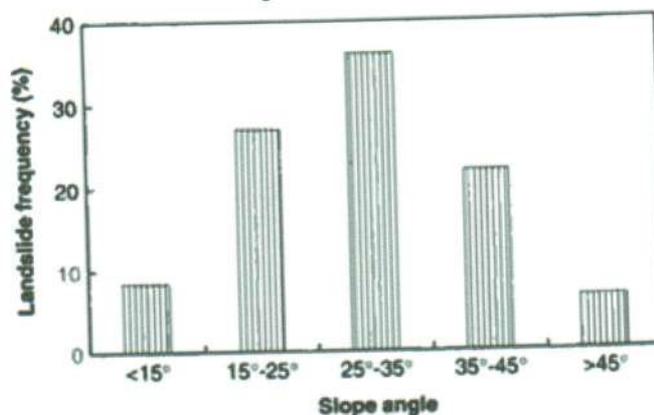
En el área de estudio afloran materiales geológicos que, producto de un intenso proceso de meteorización, se han transformado en suelos con un potente manto de material con poca cohesión. Esta situación provoca que todos los sectores con pendientes elevadas (laderas de cerros y escarpes) constituyen 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° 5-5).

Considerando lo anterior y los antecedentes recopilados, se zonificó la susceptibilidad de generación de deslizamientos y caída de bloques (FIGURA N° 5-6 y FIGURA N° 5-7) 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 (escarpes), es decir, zonas de pendientes sobre 35°.

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



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 y 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° 5-6 y FIGURA N° 5-7) de la siguiente manera:

- **Zonas de baja susceptibilidad de ser alcanzadas por deslizamientos o caídas de bloques generados pendiente arriba:** Corresponden a todas aquellas zonas ubicadas entre 25 y 50 m pendiente abajo de una zona de moderada susceptibilidad de generación de deslizamientos o caídas de bloques.
- **Zonas de moderada susceptibilidad de ser alcanzadas por deslizamientos o caídas de bloques generados pendiente arriba:** Corresponden a todas aquellas zonas ubicadas a menos de 25 m pendiente abajo de una zona de moderada susceptibilidad de generación de deslizamientos o caídas de bloques, o a aquellas zonas ubicadas entre 50 y 100 m pendiente abajo de una zona de alta o muy alta susceptibilidad de generación de deslizamientos o caídas de bloques.
- **Zonas de alta susceptibilidad de ser alcanzadas por deslizamientos o caídas de bloques generados pendiente arriba:** Corresponden a todas aquellas zonas ubicadas a menos de 50 m pendiente abajo de una zona de alta o muy alta susceptibilidad de generación de deslizamientos o caídas de bloques.

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 los depósitos fluvio-aluviales antiguos (Terraza Superior) en la localidad de Corinto, mientras que en Péncahue corresponde a las principales quebradas.

FIGURA Nº 5-6 Zonas de susceptibilidad de deslizamientos y caída de bloques para las localidades de Pencahue

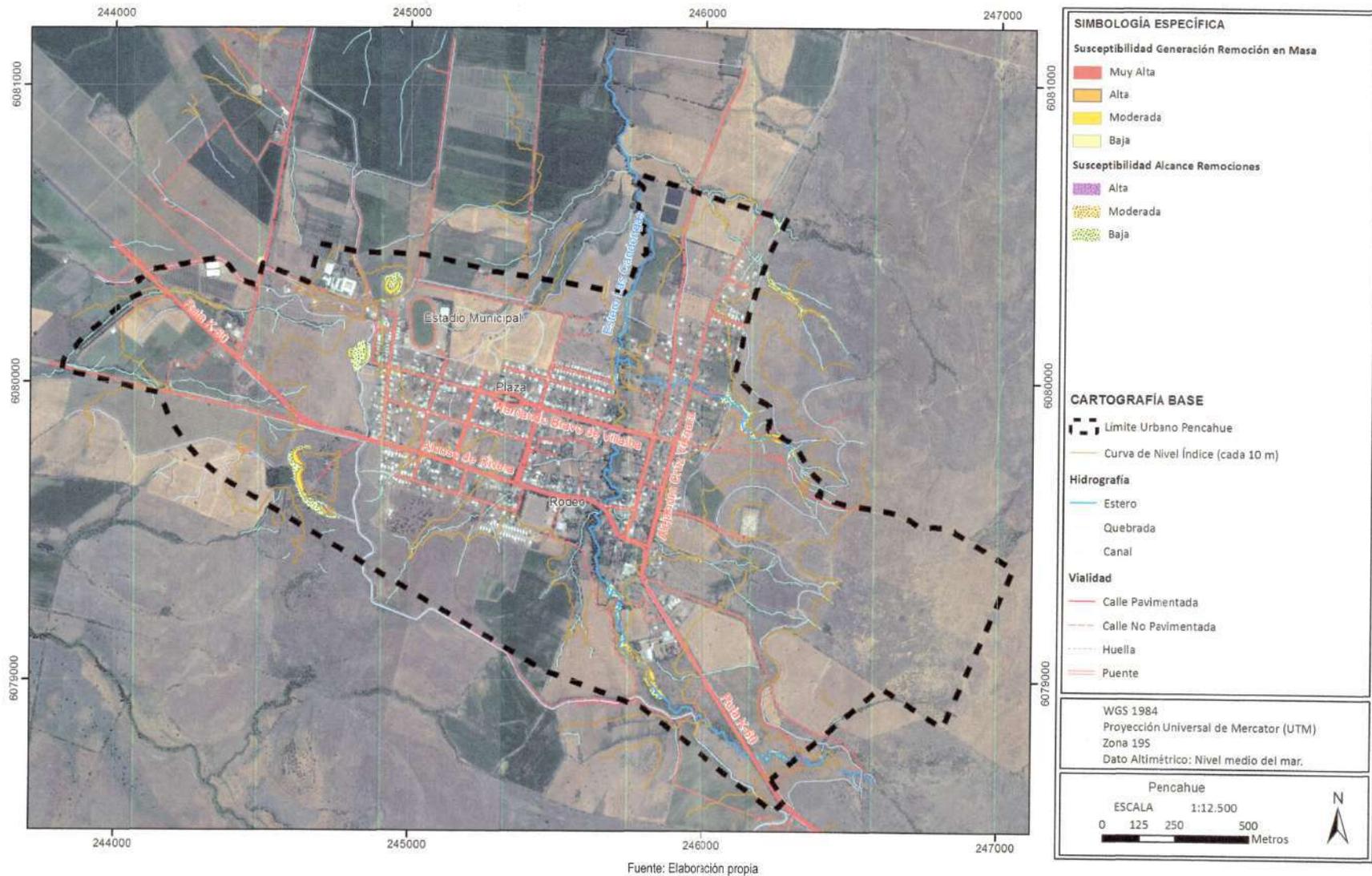
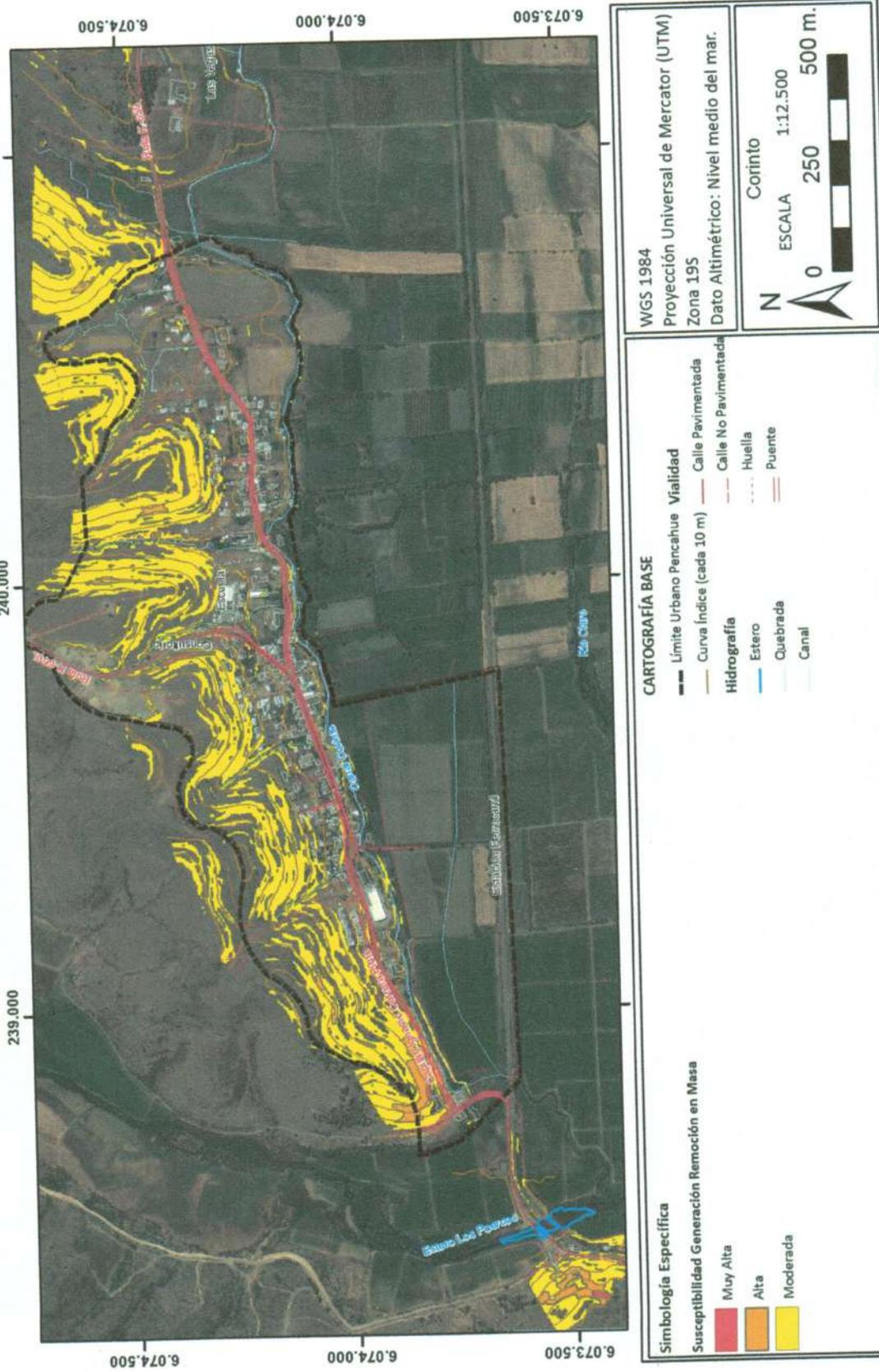


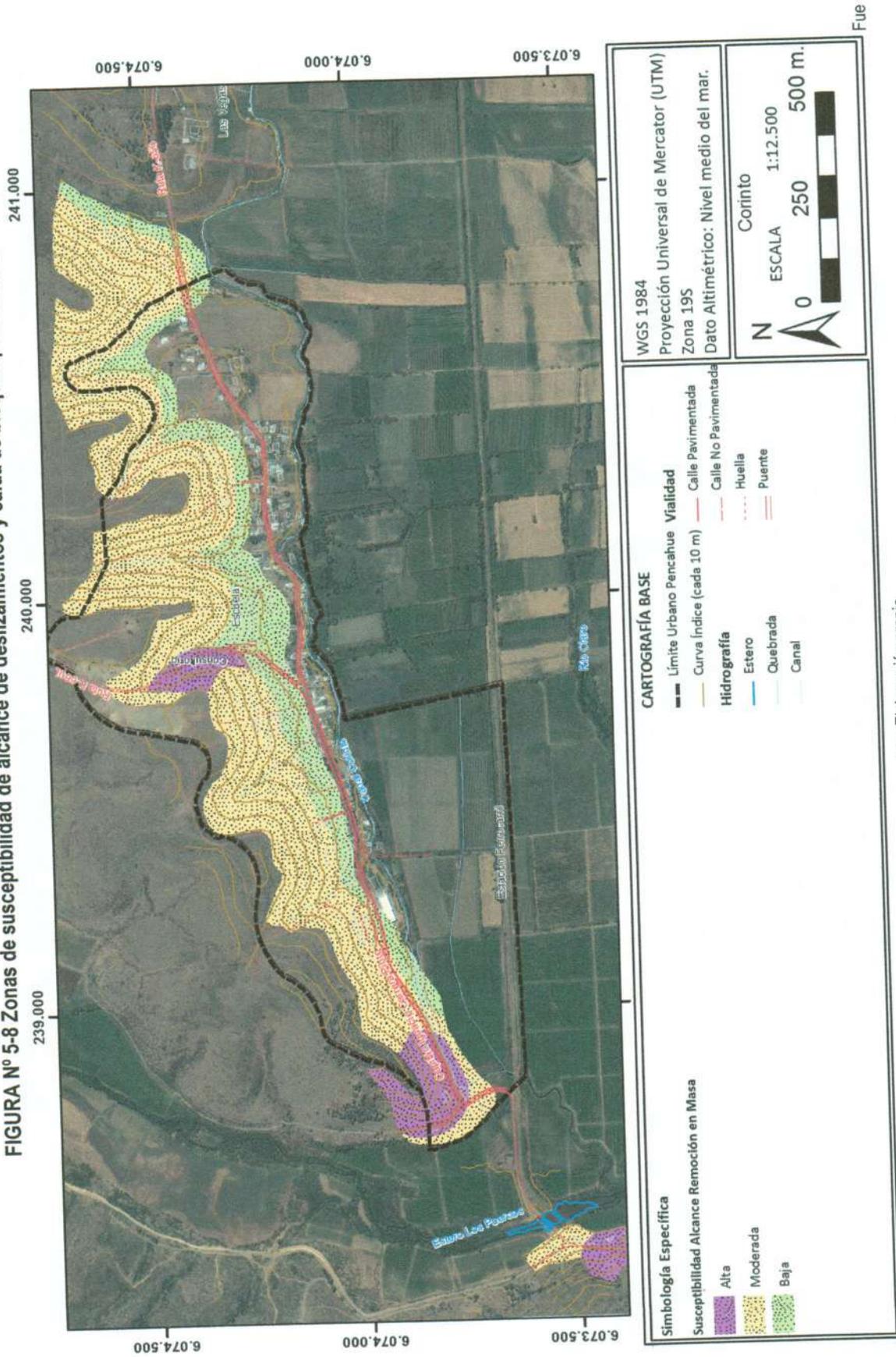
FIGURA N° 5-7 Zonas de susceptibilidad de generación de deslizamientos y caída de bloques para Corinto



Fuente

e: Elaboración propia

FIGURA N° 5-8 Zonas de susceptibilidad de alcance de deslizamientos y caída de bloques para Corinto



nte: Elaboración propia

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

A continuación se presenta el resumen los peligros geológicos analizados en el área de estudio, describiéndolos brevemente, detallando el catastro de los eventos recopilados o reconocidos, describiendo la metodología para la zonificación de susceptibilidad y las zonas susceptibles a cada peligro, los que son presentados en los siguientes Cuadros:

- CUADRO N° 6-1 Síntesis del Peligro Geológico de Sismicidad y Fallas Activas
- CUADRO N° 6-2 Síntesis del Peligro Geológico de Volcanismo
- CUADRO N° 6-3 Síntesis del Peligro Geológico de Inundación
- CUADRO N° 6-4 Síntesis del Peligro Geológico de Remoción en Masa

Por otro lado, las FIGURA N° 6-1 y FIGURA N° 6-2 muestran la síntesis de los peligros geológicos zonificables a una escala local de la localidad de Pencahue y Corinto respectivamente. Fuera de texto se presentan el PLANO N° 3 y PLANO N° 4 que presentan a una escala 1:5.000 la síntesis de peligros geológicos reconocidos en el área urbana y su zonificación de susceptibilidad.

CUADRO N° 6-1 Síntesis del Peligro Geológico de Sismicidad y Fallas Activas

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 eventos históricos de magnitud mayor a 7,2 (FIGURA N° 4-7). 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) y un perfil de los epicentros sísmicos en profundidad cercano al área de estudio (FIGURA N° 4-11). No se identificaron fallas potencialmente activas dentro del límite comunal, pero se observan los sismos de baja profundidad en el sector cordillerano (FIGURA N° 4-11), que podrían generar sismos menores que serían percibidos en la comuna.
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 de los sectores susceptibles a ser afectados por el fenómeno de efecto sitio, sin embargo, en la mayoría de las localidades correspondía a una sola categoría.
Zonas Susceptibles	Tanto para los sismos de profundidad intermedia como los sismos corticales, sus características y recurrencias son poco conocidas. Sin embargo, las evidencias recolectadas apuntan a que la zona puede ser afectada por sismos de ambos tipos. Los sismos de profundidad intermedia se registran en todo el país, la mayor parte corresponde a sismos de magnitud pequeña. Los sismos de baja profundidad que se observan en el sector cordillerano (FIGURA N° 4-11) estarían evidenciando la actividad de estas fallas. Por lo tanto, aunque no se conoce de manera certera la edad del último movimiento de las fallas que pueden ser consideradas estrictamente cómo potencialmente activas, estas deben ser consideradas como activas bajo un enfoque conservador

CUADRO N° 6-2 Síntesis del Peligro Geológico de Volcanismo

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 1.800 y 1.990 (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 centenares 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° 4-13) y un cuadro con las erupciones históricas y prehistóricas cercanas al área de estudio (CUADRO N° 4-2). En la FIGURA N° 4-13 se observa que algunos sectores de la Comuna de Pencahue se encuentran sobre la Ignimbrita Loma Seca, de edad Pleistocena.
Metodología de Zonificación	El volcanismo es zonificable a nivel regional. Se presenta una imagen mostrando los posibles alcances de erupciones, zonas de transporte de lahares y/o flujos piroclásticos y zonas de dispersión de cenizas (FIGURA N° 5-1). La zonificación se realiza en base a antecedentes históricos, mapas de acumulación y geológicos y comparaciones con otras zonas
Zonas Susceptibles	En la FIGURA N° 5-1 se observa que al este del límite comunal de Pencahue se desarrolla el arco volcánico actual. Dada la distancia de las zonas a los centros volcánicos activos se considera baja la probabilidad de que algún peligro volcánico afecte directamente las localidades de Pencahue y Corinto, pudiendo ser afectados por caída de ceniza en ambas localidades y por lahares en Corinto. Eventos como los que generaron los depósitos de Ceniza Loma Seca, son producto de erupciones gran magnitud y recurrencia muy baja y se estima poco probable que ocurra en el corto plazo con los antecedentes disponibles.

CUADRO N° 6-3 Síntesis del Peligro Geológico de Inundación

Peligro	Inundaciones
Descripción	Este peligro está asociado a eventos pluviométricos extremos, produciendo inundaciones por desborde de cauce o anegamientos. Asociados a estos eventos pueden presentarse flujos de detritos, referidos comúnmente como 'aluviones'
Peligros Asociados	Inundaciones por Desborde de Cauces Inundaciones por Anegamiento Flujos de Detritos
Factores Desencadenantes	Eventos pluviométricos extremos
Catastro	<p>Las inundaciones en la Localidad de Pencahue, se relaciona con los diversos drenes naturales que cruzan el área urbana hacia el Estero Las Candongas. Este dren local presenta un cauce poco incidido en el terreno que ocupa el sector urbano: una sección transversal muy suave en algunos sectores y una notoria reducción de la pendiente al abandonar el sector de los cerros.</p> <p>En Corinto, las inundaciones están condicionadas principalmente por el estero Los Puercos y a desbordes del Río Claro hacia la su llanura de inundación.</p>
Metodología de Zonificación	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 identificaron los siguientes peligros de inundación:
Zonas Susceptibles	<p><u>Zonas de Moderada Susceptibilidad de Inundación:</u> Corresponde a los depósitos aluviales de quebrada Activos que se reconocen principalmente en las áreas de Pencahue y Corinto.</p> <p><u>Zonas de Alta Susceptibilidad Inundación:</u> Corresponde a las llanuras de inundación del río Claro, Estero Los Puerros y Estero Las Candongas. Estas llanuras han sido inundadas normalmente durante periodos de precipitación extrema.</p> <p><u>Zonas de Muy Alta Susceptibilidad Inundación:</u> Corresponde a los cauces activos de los principales cauces hídricos reconocidos en la zona, esto es, el estero Las Candongas, estero Los Puercos y el río Claro. Además considera cauces fluviales antiguos que han sido modificados para actuar como canales de regadío</p>

CUADRO N° 6-4 Síntesis del Peligro Geológico de Remoción en Masa

Peligro	Remociones en Masa		
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	Los procesos de remoción en masa tienden a ubicarse en zonas de altas pendientes y principalmente en la localidad de Corinto (FIGURA N° 4-20).)		
Metodología de Zonificación	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° 5-5 y FIGURA N° 5-6).		
	GENERACIÓN	ALCANCE	
	<u>Susceptibilidad Muy Alta(A):</u> sectores con pendientes mayores a 35°	<u>Susceptibilidad Alta:</u> Zonas a menos de 50 m de distancia pendiente abajo de una zona de muy alta susceptibilidad de Generación de remociones en masa	
	<u>Susceptibilidad Alta (B):</u> sectores con pendientes entre 35° y 25°	<u>Susceptibilidad Moderada:</u> Zonas a menos de 25 m pendiente abajo de una zona de susceptibilidad moderada o entre 50 y 100 metros pendiente debajo de una zona de generación de susceptibilidad Alta.	
<u>Susceptibilidad Moderada (C):</u> sectores con pendientes entre 25° y 15°	<u>Susceptibilidad Moderada:</u> Corresponde a zonas ubicadas entre 25 y 50 m pendiente debajo de una zona de susceptibilidad moderada de generación.		
Zonas Susceptibles	Las principales zonas susceptibles de ser afectadas por deslizamientos y caídas de bloques se encuentran ubicadas principalmente en las laderas de los depósitos fluvio-aluviales antiguos (Terraza Superior) en la localidad de Corinto, mientras que en Pencahue corresponde a las principales quebradas.		

Fuente: Elaboración propia

FIGURA Nº 6-1 Zonas susceptibles a ser afectadas por los peligros geológicos reconocidos en el área urbana de Pencahue y zonificables a escala local

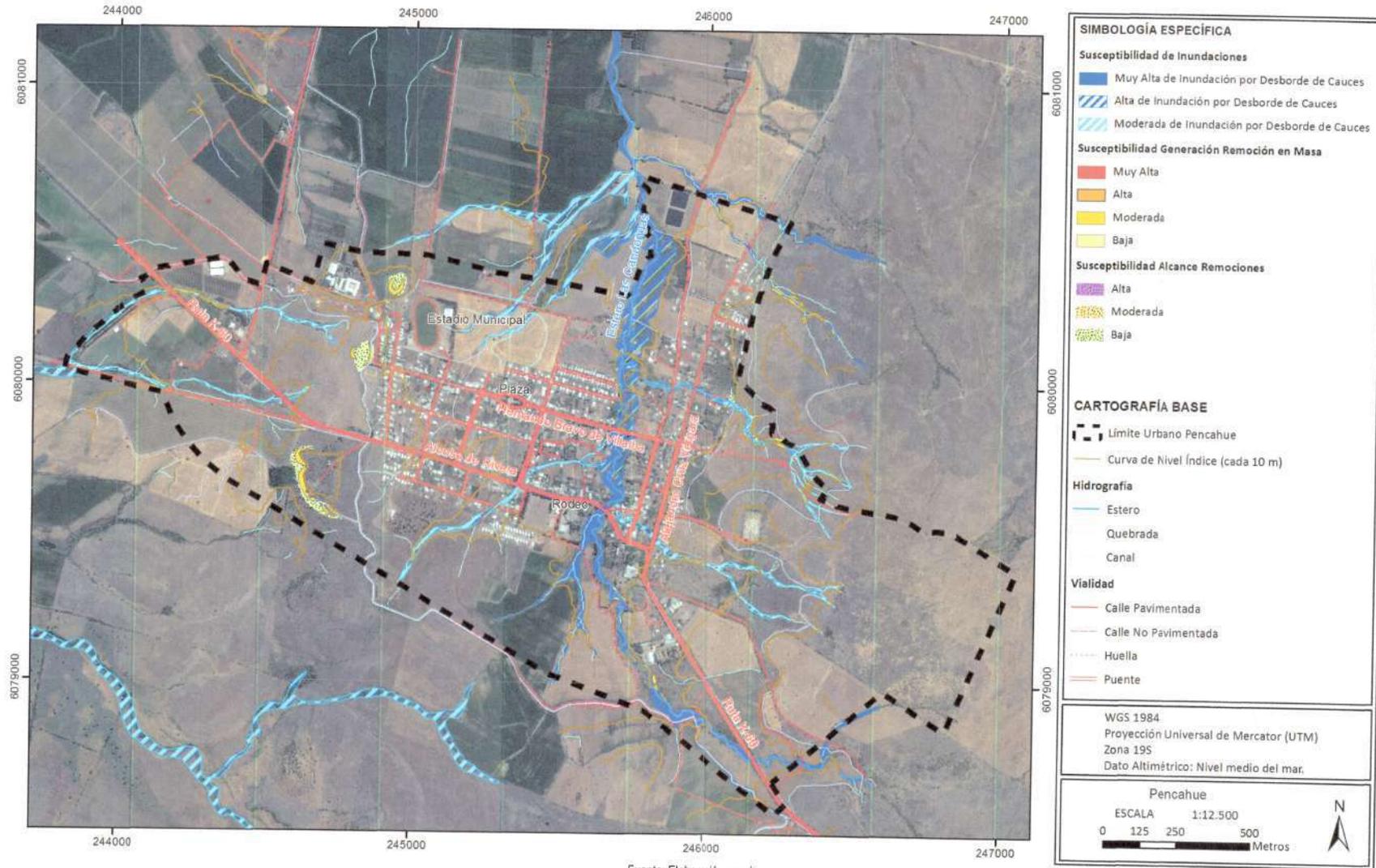
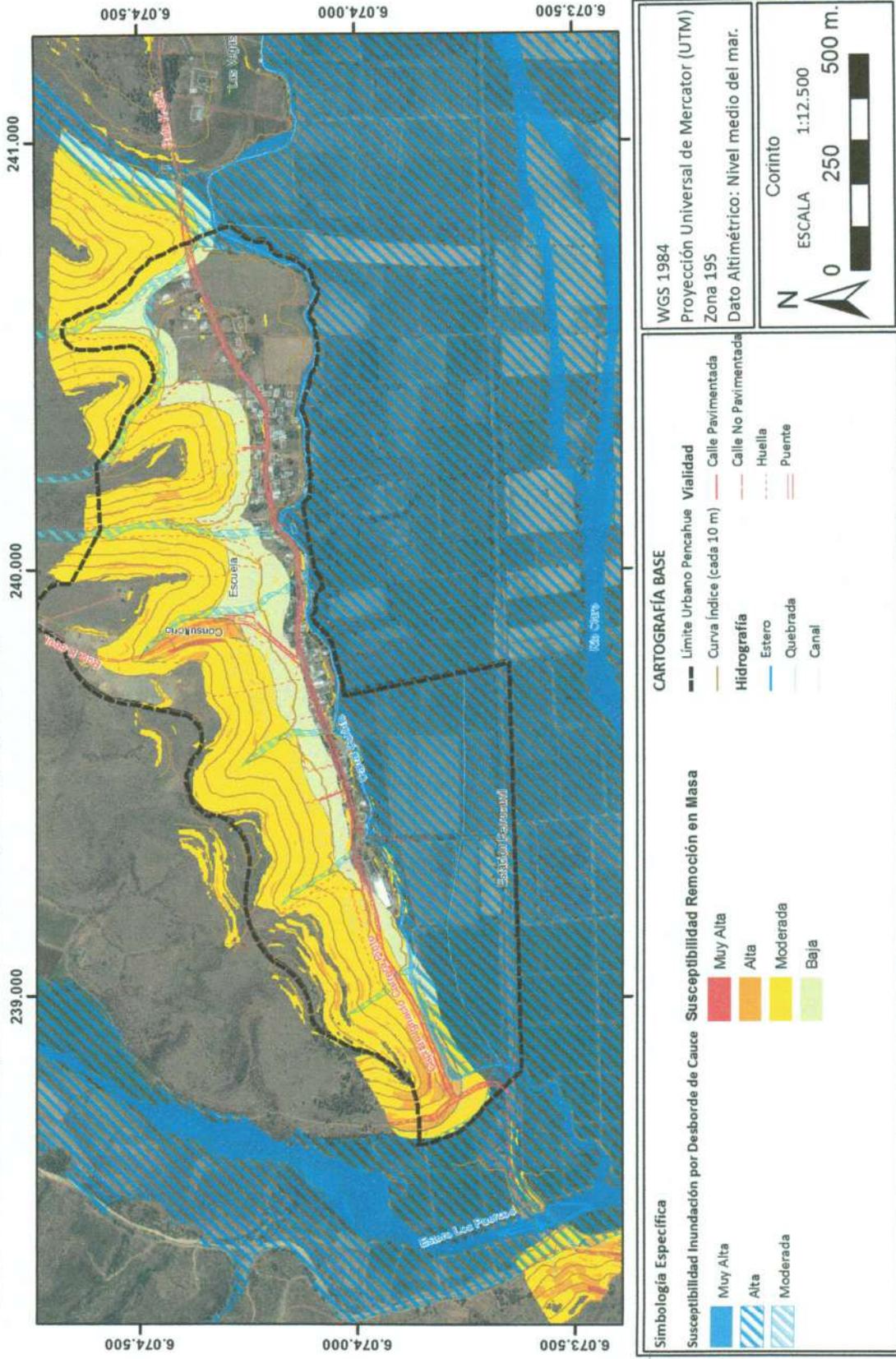


FIGURA Nº 6-2 Zonas susceptibles a ser afectadas por los peligros geológicos reconocidos en el sector de Corinto y zonificables a escala local



Fuente: Elaboración propia

7 RECOMENDACIONES

En el siguiente CUADRO N° 8-1 se presenta una síntesis de los peligros geológicos reconocidos en el área, los criterios utilizados para evaluar la susceptibilidad y las recomendaciones para la zonificación urbana de las áreas susceptibles.

Se recomienda con respecto a los peligros geológicos 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. Sería importante realizar estudios geotécnicos detallados para zonas de remoción en masa a escala 1:500, analizando los parámetros físicos de las rocas en cada sector susceptible. La escala de trabajo de este estudio es 1:2.500, por lo tanto, se entrega un análisis general del área dentro del límite urbano de Pencahue y Corinto que es útil como primer resultado, pero no se considera dentro de los objetivos de este informe una evaluación de detalle como la que sería necesaria para una solución geotécnica o de ingeniería de detalle.

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 generar una cartografía de las zonas susceptibles a ser afectadas por inundaciones, junto con los períodos de retornos asociados, lo que permite definir zonas de riesgo y ajustar la zonificación urbana, así como elaborar medidas de mitigación adecuadas. Para las áreas susceptibles a estos fenómenos 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 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.

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

Peligro	Susceptibilidad	Criterios	Zonificación Urbana
Inundación	Muy Alta	Cauce natural de ríos o esteros. Geológicamente corresponden a depósitos fluviales activos e inactivos del Estero Los Puercos, Estero Las Candongas y el río Claro.	Restricción
	Alta	Áreas de inundación por desborde de cauces. Geológicamente corresponden a las llanuras de inundación del Estero Los Puercos, Estero Las Candongas y el río Claro.	Riesgo (2.1.17)
	Moderada	Áreas de inundación por desborde de cauces. Corresponden a los depósitos aluviales activos de quebradas. A pesar de que no se esperan grandes caudales, se recomienda edificar con medidas de mitigación recomendadas a partir de un estudio fundado de riesgos a escala local.	Riesgo (2.1.17)
Remociones en Masa	Muy Alta de Generación	Pendientes >35°	Restricción
	Alta de Generación	Pendientes entre 25° y 35°	Restricción
	Moderada de Generación	Pendientes entre 15° y 25°	Riesgo (2.1.17)
	Alta 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 de deslizamientos o caídas de bloques.	Restricción
	Moderada de Alcance	Corresponden a todas aquellas zonas ubicadas a menos de 25 m pendiente abajo de una zona de moderada susceptibilidad de generación de deslizamientos o caídas de bloques, o a aquellas zonas ubicadas entre 50 y 100 m pendiente abajo de una zona de alta o muy alta susceptibilidad de generación de deslizamientos o caídas de bloques.	Riesgo (2.1.17)
	Baja de Alcance	Corresponden a todas aquellas zonas ubicadas entre 25 y 50 m pendiente abajo de una zona de moderada susceptibilidad de generación de deslizamientos o caídas de bloques.	Normas Urbanísticas

Fuente: Elaboración propia

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.

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., 1996. 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.

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.

Fariás, 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.

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 Pencahue.

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 N° 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, 2003. Mapa Geológico de Chile: Versión Digital. Publicación Geológica Digital, N°4. 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 rio Maipo and rio 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 Biobío. En *Congreso Geológico Chileno*, 3., Concepción, 8-14 Noviembre, 1982: pp.F280-F306.

Vargas, G., Farías, 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 Principal and Practice*. IAEG Commission on Landslides and Other Mass Movements on Slopes, UNESCO, Natural Hazards, No.3, V11 p

Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes. In *Special report 17VI: Landslides: Analysis and Control*, Transportation Research Board, Washington, D.C.