

ESTUDIO DE RIESGOS

PLAN REGULADOR COMUNAL DE MOLINA



RODRIGO RAULD PLOTT
GEÓLOGO
UNIVERSIDAD DE CHILE

RESUMEN

El presente estudio de riesgos naturales, se realiza en el marco del Plan Regulador Comunal de Molina, contratado por la Secretaría Regional Ministerial de Vivienda y Urbanismo Región del Maule a Habiterra S.A. Consultores. Para su desarrollo se han revisado antecedentes, incorporando información posterior al sismo del 27/02/2010. Todo esto realizado en el área interior al límite urbano de Molina, Lontué, Itahue y Radal.

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 históricos a partir de publicaciones científicas, y analizando los factores condicionantes y desencadenantes de los peligros analizados. A partir de esta información se generaron mapas de susceptibilidad para cada uno de los peligros zonificables a escala 1:5.000.

Debido a que la Comuna de Molina está ubicada frente al 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 Molina 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, las localidades de Itahue, Molina y Lontué están ubicadas a menos de 70 km de distancia del arco volcánico actual, por lo que son susceptibles a ser afectadas por flujos piroclásticos y lahares, los que se encauzan en los valles principales, y también por caída de tefra. La localidad de Radal se ubica a sólo 30 km de centros volcánicos activos como el volcán Descabezado Grande, Descabezado Chico y Quizapu, por lo cual, además de los peligros antes mencionados puede ser afectada por coladas de lava.

Se reconocieron además, los peligros de deslizamientos y caída de bloques, los cuales son prácticamente nulos para las áreas urbanas de Molina y Lontué debido a las bajas pendientes del sector ($< 15^\circ$). En la localidad de Itahue el peligro de deslizamientos se asocia al retroceso de los escarpes fluviales. Se determinó que la ocurrencia de estos peligros en el área de Radal, se asocia a zonas de altas pendientes, y principalmente al alto nivel de fracturamiento de las coladas de lava que rellenan el valle.

Los peligros de inundación por desborde de cauces naturales se asocian a los ríos Claro y Lontué, y a esteros y quebradas afluentes de los mismos. Peligro de Anegamiento se reconoce en sectores deprimidos en la localidad de Lontué, principalmente de origen natural. 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. Además, la presencia de canales artificiales genera suelos saturados en agua en su cauce y los sectores aledaños, dando origen a suelos con un mal comportamiento geotécnico, que presentan menor resistencia en caso de ser afectados por sismos.

Las principales recomendaciones son restringir la localización de actividades humanas permanentes en zonas de susceptibilidad muy alta y alta de generación y alcance de deslizamientos y caída de bloques y las zonas de susceptibilidad alta de retroceso de escarpes, además de capacitar a la población con respecto a los peligros geológicos. Complementariamente, se debe implementar un sistema de alerta temprana y planes de evacuación ante eventos de erupciones de volcanes activos (Descabezado Grande, Descabezado Chico y Quizapu) y de precipitaciones intensas que puedan generar inundaciones; así mismo se recomienda controlar el escumamiento de aguas superficiales, su intercepción, captación, conducción y descarga controlada hacia cauces establecidos, garantizando que tengan un diseño adecuado.

INDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	7
1.1	Ubicación Área de Estudio.....	7
1.2	Objetivos.....	7
1.3	Alcance y limitaciones.....	9
1.4	Marco Jurídico.....	9
1.5	Aspectos Metodológicos.....	10
1.5.1	Elaboración de la línea de base geológica y geomorfológica.....	11
1.5.2	Visita técnica al área de estudio.....	11
1.5.3	Catastro de información relevante para los Peligros Geológicos en el área de estudio.....	14
2	MARCO CONCEPTUAL.....	16
2.1	Peligros Geológicos en Chile.....	16
2.2	Conceptos de Susceptibilidad, Peligros Geológicos y Riesgo.....	16
3	MARCO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO.....	18
3.1	Marco Geodinámico.....	18
3.2	Marco Geomorfológico.....	19
3.3	Marco Geológico.....	27
3.3.1	Unidades de Roca.....	29
3.3.2	Depósitos No Consolidados.....	34
4	DESCRIPCIÓN Y CATASTRO DE INFORMACIÓN HISTÓRICA Y PREHISTÓRICA DE LOS PELIGROS GEOLÓGICOS ANALIZADOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	37
4.1	Procesos Internos o Endógenos de la Tierra – SISMICIDAD.....	38
4.1.1	Descripción del Peligro Geológico.....	38
4.1.2	Resultados del Catastro de Información Histórica de Sismicidad.....	44
4.2	Procesos Internos o Endógenos de la Tierra – VOLCANISMO.....	54
4.2.1	Descripción del Peligro Geológico.....	54
4.2.1	Resultados del Catastro de Información Histórica de Volcanismo.....	57
4.3	Procesos Exógenos o Externos de la Tierra - INUNDACIONES.....	62
4.3.1	Descripción del Peligro Geológico.....	62
4.3.2	Resultados del Catastro de Información Histórica de Inundaciones.....	64
4.4	Procesos Externos o Exógenos de la Tierra – REMOCIONES EN MASA.....	74
4.4.1	Descripción del Peligro Geológico.....	74
4.4.1	Resultados del Catastro de Información Histórica de Remociones en Masa.....	78
5	Diagnóstico y Zonificación de Susceptibilidad a los Peligros Geológicos que pueden afectar el área de estudio.....	80
5.1	Peligros No Zonificables.....	80
5.1.1	Peligro Sísmico.....	80

5.1.2	Peligro Volcánico	81
5.2	Peligros Zonificables	83
5.2.1	Peligro de Inundaciones	83
5.2.2	Peligro de Remociones en Masa	87
6	SÍNTESIS DE LOS PELIGROS Geológicos ANALIZADOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	96
7	RECOMENDACIONES.....	104
8	REFERENCIAS	108

INDICE DE FIGURAS

FIGURA Nº 1-1	Ubicación del área de estudio.....	8
FIGURA Nº 1-2	Puntos de control visita técnica del 08 de Marzo del 2011, para las localidades de Lontué, Molina e Itahue	12
FIGURA Nº 1-3	Puntos de control visita técnica del 08 de Marzo del 2011, para las localidades de Radal	13
FIGURA Nº 2-1	Etapas de la evaluación de un evento geológico peligroso	18
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	19
FIGURA Nº 3-2	Carta de elevaciones y principales unidades morfoestructurales en el área de estudio.....	20
FIGURA Nº 3-3	Carta de elevaciones del área urbana de Itahue	21
FIGURA Nº 3-4	Carta de elevaciones del área urbana de Radal.....	22
FIGURA Nº 3-5	Carta de pendientes para el área urbana de Itahue.....	23
FIGURA Nº 3-6	Carta de pendientes para el área urbana de Radal	24
FIGURA Nº 3-7	Carta de exposición de ladera para el área urbana de Itahue	25
FIGURA Nº 3-8	Carta de exposición de ladera para el área urbana de Radal	26
FIGURA Nº 3-9	Mapa Geológico de la Comuna de Molina	28
FIGURA Nº 3-10	Mapa Geológico del área urbana de Itahue.....	31
FIGURA Nº 3-11	Mapa Geológico del área urbana de Molina y Lontué.....	32
FIGURA Nº 3-12	Mapa Geológico del área urbana de Radal.....	33
FIGURA Nº 3-13	Terraza inferior y llanura de inundación actual en la localidad de Itahue.....	35
FIGURA Nº 3-14	Cauce y Llanura de inundación actual del río Claro en la localidad de Itahue. En el fondo se observa el escarpe de roca de Loma Seca	36
FIGURA Nº 3-15	Depósito de remoción en masa antiguo en la localidad de Radal	37
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	38
FIGURA Nº 4-2	Contexto geodinámico y margen de subducción de Chile	39
FIGURA Nº 4-3	Tipos de sismos que ocurren en un margen de subducción. Explicación en el texto	40
FIGURA Nº 4-4	Tipos de falla y esfuerzos asociados	41
FIGURA Nº 4-5	Tipos de ondas sísmicas.....	42
FIGURA Nº 4-6	Amplificación de la vibración generada por un terremoto	43
FIGURA Nº 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.....	45

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 Molina está indicada por el círculo rojo	50
FIGURA N° 4-9 Profundidad de todos los sismos ocurridos entre los 34° 30' y 36° 30' Latitud Sur, desde el año 1973 a febrero de 2011 (la estrella indica el epicentro del terremoto del 27 de febrero de 2010).....	51
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. La línea discontinua indica la ubicación del perfil de la FIGURA N° 4-11	51
FIGURA N° 4-11 Ubicación espacial de epicentros en profundidad a la latitud 35° S. Fuentes sísmicas que afectan al área de estudio	53
FIGURA N° 4-12 Fallas activas e Hipocentros próximos a la Comuna de Molina	54
FIGURA N° 4-13 Peligros volcánicos asociados a la erupción de un volcán	55
FIGURA N° 4-14 Principales centros volcánicos y depósitos volcánicos entre los 33° S y 36° S	59
FIGURA N° 4-15 Mapas de Isópacas que indican el espesor de ceniza acumulada en centímetros para las erupciones del volcán Quizapú (1932) y el volcán Planchón (1991)	61
FIGURA N° 4-16 Clasificación de los tipos de inundaciones.....	62
FIGURA N° 4-17 Catastro de inundaciones informado por la Dirección de Obras de la Comuna de Molina	66
FIGURA N° 4-18 Áreas de Inundación y Periodo 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.....	73
FIGURA N° 4-19 Clasificación de tipos de remoción en masa en relación al movimiento que lo origina y el material constituyente de la ladera	75
FIGURA N° 4-20 Ejemplos de deslizamientos. A. Deslizamiento Rotacional, B. Deslizamiento traslacional....	76
FIGURA N° 4-21 Depósito de remoción en masa ocurrido durante el terremoto del 27 de febrero 2010 en la localidad de Radal. La línea segmentada muestra el alcance del depósito, que represó el río Claro.....	79
FIGURA N° 4-22 Remoción en masa antigua en la localidad de Radal, reactivada durante el terremoto del 27 de febrero del 2010	79
FIGURA N° 4-23 Remoción en masa generada por retroceso de ladera en el río Claro, Itahue.....	80
FIGURA N° 5-1 Mapa de distribución de Peligros Volcánicos.....	82
FIGURA N° 5-2 Zonas de susceptibilidad de inundaciones para la localidad de Itahue.....	84
FIGURA N° 5-3 Zonas de susceptibilidad de inundaciones para el sector de Molina y Lontué.....	85
FIGURA N° 5-4 Zonas de susceptibilidad de inundaciones para la localidad de Radal	86
FIGURA N° 5-5 Frecuencia de deslizamientos en función de la pendiente del terreno.....	87
FIGURA N° 5-6 Zonas de susceptibilidad de generación de remociones en masa en el área urbana de Itahue	88
FIGURA N° 5-7 Zonas de susceptibilidad de generación de remociones en masa en el área urbana de Radal	89
FIGURA N° 5-8 Zonas de susceptibilidad de retroceso de laderas en el área urbana de Itahue	91
FIGURA N° 5-9 Zonas de susceptibilidad de retroceso de laderas en el área urbana de Radal.....	92
FIGURA N° 5-10 Zonas de susceptibilidad de alcance remociones en masa en el área urbana de Radal.....	94
FIGURA N° 5-11 Zonas de susceptibilidad de remociones en masa, considerando retroceso de laderas y generación y alcance de deslizamientos en el área urbana de Radal.....	95
FIGURA N° 6-1 Zonas susceptibles a ser afectadas por los peligros geológicos reconocidos en el área urbana de Itahue y zonificables a escala local	101
FIGURA N° 6-2 Zonas susceptibles a ser afectadas por los peligros geológicos reconocidos en el área urbana de Molina y Lontué y zonificables a escala local	102
FIGURA N° 6-3 Zonas susceptibles a ser afectadas por los peligros geológicos reconocidos en el área urbana de Radal y zonificables a escala local	103

INDICE DE CUADROS

CUADRO N° 4-1 Peligros asociados al volcanismo	56
CUADRO N° 4-2 Principales volcanes en sectores cercanos al área de estudio.....	58
CUADRO N° 4-3 Catastro histórico de eventos pluviométricos extremos que causaron inundaciones en la Comuna de Molina	67
CUADRO N° 4-4 Catastro histórico de eventos pluviométricos extremos entre 1953 y 2000. Datos específicos sobre sectores afectados, damnificados y superficies afectadas	71
CUADRO N° 4-5 Sectores críticos afectados por inundaciones en la Comuna de Molina.....	73
CUADRO N° 5-1 Valores de Alcance utilizados en el modelo considerando la litología, pendiente y curvatura	93
CUADRO N° 6-1 Síntesis de los peligros geológicos analizados para el área de estudio, descripción, catastro, metodología y zonificación	96
CUADRO N° 7-1 Resumen de Peligros Geológicos del área urbana de Itahue y criterios utilizados para definir la zonificación de susceptibilidad y la zonificación urbana propuesta para cada caso.....	105
CUADRO N° 7-2 Resumen de Peligros Geológicos del área urbana de Molina y Lontué y criterios utilizados para definir la zonificación de susceptibilidad y la zonificación urbana propuesta para cada caso.....	106
CUADRO N° 7-3 Resumen de Peligros Geológicos del área urbana de Radal y criterios utilizados para definir la zonificación de susceptibilidad y la zonificación urbana propuesta para cada caso.....	107

INDICE DE MAPAS FUERA DE TEXTO

Carta de Riesgos Peligros Geológicos Área Urbana de Itahue
Carta de Riesgos Peligros Geológicos Área Urbana de Molina y Lontue
Carta de Riesgos Peligros Geológicos Área Urbana de Radal

1 INTRODUCCIÓN

A raíz del sismo que afecta a nuestro país el 27 de Febrero de 2010, 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), encarga el ESTUDIO PRC MOLINA solicitando la realización de un Estudio Fundado de Riesgos Geológicos, con el objetivo de sistematizar información reciente para la toma de decisión con respecto a la identificación de zonas restringidas al desarrollo urbano, y en definitiva al establecimiento de la norma urbanística que considera usos de suelo y condicionantes de subdivisión y edificación, en las áreas urbanas de la comuna de Molina

El objetivo es determinar cuáles son las áreas vulnerables a ser consideradas en la propuesta de planificación.

Conforme a lo anterior, este estudio delimita las áreas de riesgos que han de ser incorporadas en el Plan Regulador Comunal de Molina a fin de enfrentar la reconstrucción, mitigando los eventuales peligros naturales, de acuerdo a lo señalado por el artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones.

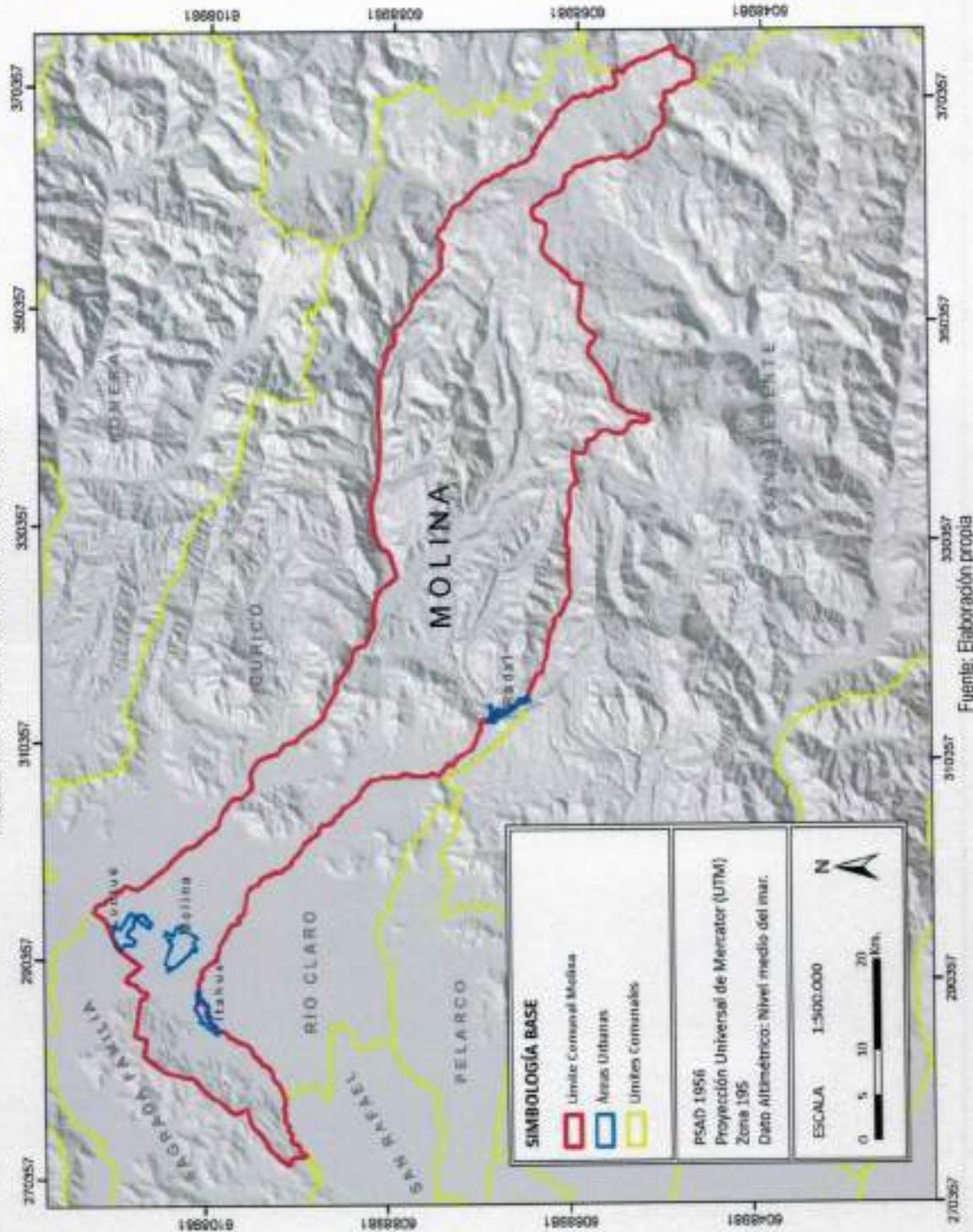
1.1 Ubicación Área de Estudio

La Comuna de Molina está ubicada en la provincia de Curicó, entre 35°01' y 35°37' Latitud Sur y 70°22' y 71°29' de Longitud Oeste en la VII Región del Maule. En su límite Sur colinda con la comuna de San Clemente, mientras que por el Norte limita con la comuna de Curicó. En el sector Oeste limita con las comunas de Río Claro y Pelarco, mientras que por el Este limita con Argentina. El área de estudio del presente trabajo corresponde a los sectores urbanos de Molina, capital de la comuna, Itahue, Lontué y Radal (FIGURA N° 1-1). El principal acceso al área de estudio corresponde a la ruta 5 Sur, desde la cual se accede directamente a la localidad de Lontué, y a través de las rutas K-157 y K-165 se accede a las localidades de Molina e Itahue, respectivamente. La localidad de Radal se encuentra al pie de los Andes, se accede desde la ruta 5 Sur a través de los caminos K-175 y K-275 (FIGURA N° 1-1).

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 el Plan Regulador Comunal de Molina, 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 Molina.

FIGURA Nº 1-1 Ubicación del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

Dentro de este estudio, como productos, deberán elaborarse cartas de peligro por efectos de terremotos, inundaciones causadas por desbordes de ríos y activación de líneas de quebradas, remoción en masa -en sus diferentes manifestaciones- (aluviones, derrumbes de rocas, deslizamiento de tierra, licuefacción de suelos u otros relevantes).

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

1.3 Alcance y limitaciones

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

Por otro lado, no se llevo a cabo ningún análisis riguroso de 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 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.

Conforme al marco jurídico expuesto, el presente informe corresponde al estudio fundado para la definición de las "áreas de riesgo" en el área urbana sujeta a planificación de la comuna de Molina, toda vez que se identifican y evalúan las zonas susceptibles a ser afectadas por un peligro geológico. En consecuencia, y de acuerdo a la OGUC, las "áreas de riesgo" que se determinarán como resultado del presente estudio con las siguientes conforme al origen natural del peligro:

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 t3pico que se explica conceptualmente en el capitulo 4.3 "Procesos Ex3genos o Externos de la Tierra - INUNDACIONES", y el diagn3stico de estos peligros en el 3rea de estudio es presentado en el capitulo 4.3.2 "Resultados del Catastro de Informaci3n Hist3rica de Inundaciones".

2. Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas.
Corresponde a los peligros geol3gicos de remociones en masa, caida de bloques y flujos de barro y detritos. Estos se explican conceptualmente en el capitulo 4.4 "El diagn3stico de estos peligros en el 3rea de estudio se presenta en el capitulo 4.4.1 "Resultados del Catastro de Informaci3n Hist3rica de Remociones en Masa".
3. Zonas con riesgo de ser afectadas por actividad volc3nica, rios de lava o fallas geol3gicas.
Dentro de este apartado definido por la OGUC se analizan conceptualmente los procesos end3genos internos de la tierra, descritos en los capitulos 4.1 "Procesos Externos o Ex3genos de la Tierra - REMOCIONES EN MASA" y 4.2 "Procesos Internos o End3genos de la Tierra - VOLCANISMO". El diagn3stico y zonificaci3n de estos peligros en el 3rea de estudio se presenta en los capitulos 4.1.2 "Resultados del Catastro de Informaci3n Hist3rica de Sismicidad" y 4.2.1 "Resultados del Catastro de Informaci3n Hist3rica de Volcanismo".

En sntesis, el presente estudio fundamentar3 la delimitaci3n de las 3reas de riesgo de origen natural. En estas 3reas, el plan regulador establecer3 las normas urbanisticas aplicables a los proyectos una vez que cumplan con los requisitos establecidos en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (Art. 2.1.17).

A su vez, para autorizar proyectos a emplazarse en 3reas de riesgo, se requerir3 que se acompa3e a la respectiva solicitud de permiso de edificaci3n un estudio fundado, elaborado por profesional especialista y aprobado por el organismo competente, que determine las acciones que deber3n ejecutarse para su utilizaci3n, incluida la Evaluaci3n de Impacto Ambiental correspondiente conforme a la Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, cuando corresponda. Este tipo de proyectos podr3n recibirse parcial o totalmente en la medida que se hubieren ejecutado las acciones indicadas en el referido estudio.

1.5 Aspectos Metodol3gicos

El objetivo del Estudio de Riesgos de Molina es generar mapas de susceptibilidad para las 3reas urbanas de Itahue, Lontu3, Molina y Radal.

Como parte del proceso para generar los mapas de susceptibilidad para un peligro geol3gico dado, se realizaron las siguientes tareas durante el desarrollo de la etapa de recopilaci3n de informaci3n:

1. Elaboraci3n de una lnea de base geol3gica y geomorfol3gica: El objetivo de este punto es identificar los distintos dep3sitos sedimentarios producto de procesos de remoci3n en masa e inundaciones, esto es, dep3sitos aluviales activos e inactivos, dep3sitos fluviales activos e inactivos, dep3sitos coluviales y las zonas de generaci3n de coluvio.
2. Visitas t3cnicas de terreno al 3rea de estudio.
3. Catastro de Peligros Geol3gicos Hist3ricos: En esta tarea se recopilaron los distintos peligros geol3gicos que han afectado los sectores urbanos de la Comuna de Molina, con la finalidad de identificarlos y ordenarlos cronol3gicamente.
4. Catastro de Factores Condicionantes: se reuni3 informaci3n acerca de los factores intrinsecos (propios del medio fisico) que condicionan la ocurrencia de un peligro geol3gico.

5. Estudio de Factores Desencadenantes: se reunió información histórica acerca de los factores desencadenantes de un peligro geológico dado, con el objetivo de realizar una estimación preliminar de la recurrencia de un evento a través de métodos estadísticos.

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

1.5.1 Elaboración de la línea de base geológica y geomorfológica

La caracterización geológica y geomorfológica se realizó simultáneamente. Para el área de estudio, no existen trabajos geológicos de detalle, siendo las únicas fuente de información geológica, el trabajo de Varela y Moreno (1982), Geología y Peligros Volcánicos del Complejo Volcánico Planchón - Peteroa, elaborado por Naranjo et al. (1999) a una escala 1:100.000, y el mapa geológico de Chile a escala 1:1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2002). Esta información se aumentó a una escala adecuada a partir de visitas a terreno, interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales. Los mapas geológico y geomorfológico producidos para el área urbana son de 1:5.000. Para obtener estos mapas la escala de trabajo fue de 1:2.500.

La interpretación de fotografías aéreas e imágenes satélites permitió delimitar los principales contactos entre el basamento rocoso, la y depósitos no consolidados, tales como depósitos fluvio-aluviales activos, depósitos fluviales activos, depósitos coluviales, 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, con énfasis en los siguientes objetivos:

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

La salida a terreno se realizó el 08 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 Molina y se recorrieron los sectores urbanos de la comuna, identificando sectores susceptibles de ser afectados por remociones en masa e inundaciones de cauces naturales y artificiales (canales), entre otros peligros geológicos.

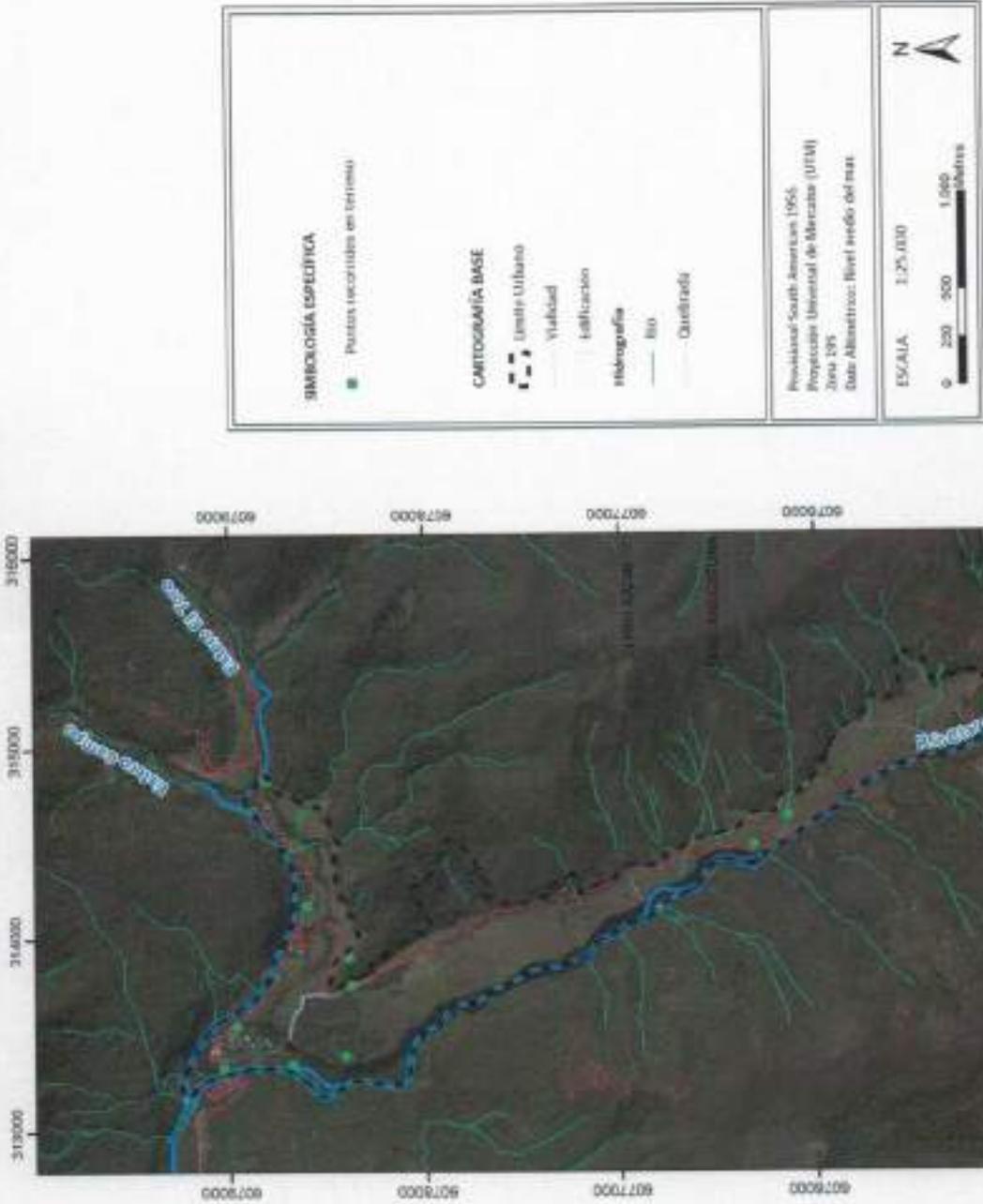
Si bien los desbordes de canales artificiales no constituyen un peligro geológico en sentido estricto, si fueron considerados en este estudio. Esto debido a que personal de la Dirección de Obras de la Municipalidad informó que los desbordes de canales son uno de los problemas más frecuentes y que mayores daños causan en la comuna. Los puntos controlados durante la visita técnica al área de estudio se encuentran ubicados en las FIGURA Nº 1-2 y FIGURA Nº 1-3.

FIGURA N° 1-2 Puntos de control visita técnica del 08 de Marzo del 2011, para las localidades de Lontué, Molina e Itahue



Fuente: Elaboración propia

FIGURA Nº 1-3 Puntos de control visita técnica del 08 de Marzo del 2011, para las localidades de Radal



Fuente: Elaboración propia

1.5.3 Catastro de información relevante para los Peligros Geológicos en el área de estudio
A partir de una revisión bibliográfica y mapeo geológico se creó el catastro de peligros geológicos.

1.5.3.1 Revisión histórica y bibliográfica

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

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

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

Para dicho efecto se revisaron los antecedentes históricos de publicaciones científicas. El trabajo de Ortlieb (1994) muestra que hay cierta correlación entre los años más lluviosos en Chile Central y los eventos ENSO (El Niño Southern Oscillation) de intensidad fuerte (F) a muy fuerte (MF++). La información recolectada es complementada con los trabajos científicos de Urrutia y Lanza. (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. Considerando lo anterior, se recopiló datos de los procesos de remoción en masa a partir de la revisión bibliográfica de los eventos generadores.

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

La generación del catastro de eventos sísmicos se realizó en base a recopilaciones históricas y de publicaciones científicas (Nishenko, 1985; Comte et al., 1986; Comte y Pardo, 1991; Comte et al., 2002; Lara y Rauld, 2003; Urrutia 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 United States Geological Survey (USGS)*. 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/>

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

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:

5. 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 Molina.
6. Elevación, pendiente, curvatura y dirección de drenaje de la ladera (exposición) para la Comuna de Molina: Generados a partir del modelo de elevación ASTER GDEM, con una resolución espacial de 30 metros por pixel.
7. Litología: Modificado a partir de Naranjo et al. (1999), el mapa geológico de Chile (SERNAGEOMIN, 2003) y observaciones en terreno.

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

2 MARCO CONCEPTUAL

2.1 Peligros Geológicos en Chile

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

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

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

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

$$R = A \times C$$

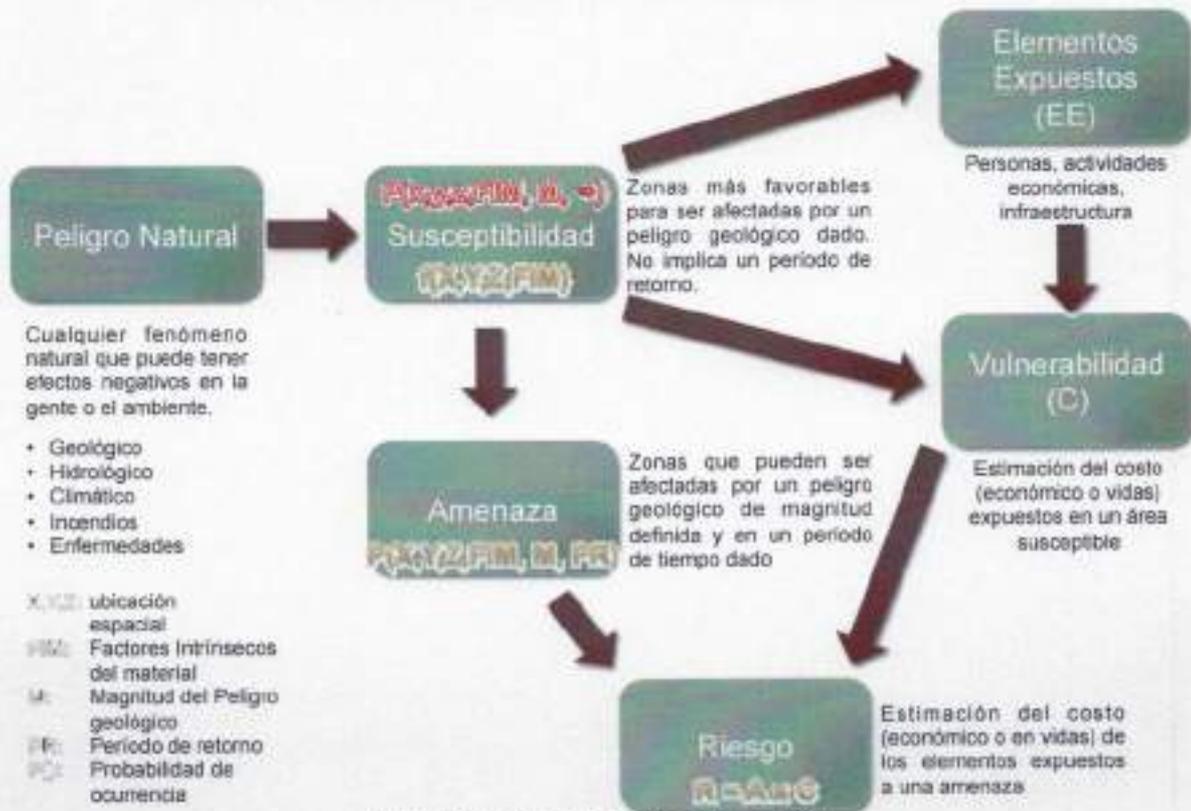
Donde A corresponde a la amenaza o peligrosidad (probabilidad de que ocurra un evento dado en un período de tiempo) y C corresponde al costo (ya sea en vidas, valoración económica, metros de caminos, etc.). La FIGURA N° 2-1 muestra la relación entre el conocimiento y la estimación de la susceptibilidad,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

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).

* 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

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 Océánica de Nazca subducta a la Placa Continental Sudamericana bajo su margen occidental (Uyeda, 1979). Esta subducción, cuya tasa actual de convergencia se estima en 8 cm/año (Demets et al., 1994), se reconoce activa desde, al menos, el Jurásico (Mpodozis y Ramos, 1989) y ha tenido variaciones en la tasa de convergencia durante el Eoceno – Mioceno que van desde 5 a 15 cm/año (Somoza, 1998).

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

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 (E). 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 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



FUENTE: Elaboración propia

3.2 Marco Geomorfológico

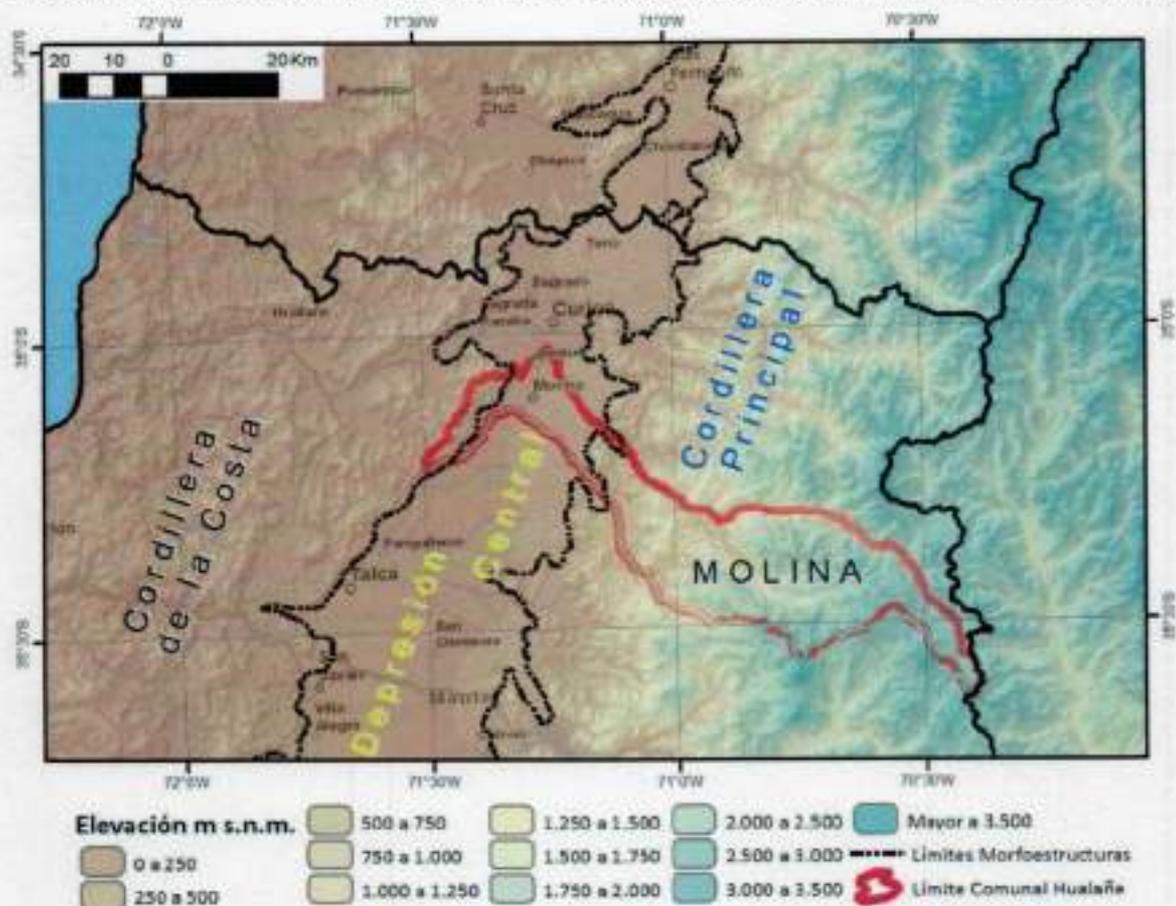
El segmento andino chileno al Sur de los 33° S, muestra 3 unidades morfoestructurales principales (FIGURA Nº 3-2), dispuestas en franjas orientadas Norte – Sur. De Oeste a Este estas son: Cordillera de la Costa, Depresión Central y Cordillera Principal (que comparten Chile y Argentina). La Comuna de Molina se ubica casi en su totalidad en el segmento morfoestructural de la Cordillera Principal, sin embargo, en dicho sector sólo se encuentra la zona urbana de Radal. El sector occidental de la comuna se ubica en la Depresión Central, donde se encuentran las localidades de Lontué, Molina e Itahue (FIGURA Nº 3-2 y FIGURA Nº 1-1).

La Cordillera de la Costa se presenta como un cordón montañoso y accidentado ubicado al Oeste del área de estudio, y con una orientación general Norte – Sur. Está compuesta por cerros que rara vez sobrepasan los 700 m s.n.m. y cuyas pendientes se concentran entre los 10° y 20°, rara vez sobrepasando los 30°. Está formada principalmente por granitoides y metamorfitas del Paleozoico Superior en su flanco occidental y rocas mesozoicas en su flanco oriental, como indica la cartografía geológica disponible.

La Depresión Central se presenta como una franja alargada en dirección Norte-Sur, la cual corresponde a una extensa llanura levemente inclinada hacia el Oeste, la cual se ve ocasionalmente interrumpida por pequeños cerros islas, cuyas alturas no superan los 250 m con respecto a la Depresión Central. En las cercanías de las localidades de Lontué, Molina e Itahue, la elevación fluctúa entre 200 y 235 m s.n.m. (FIGURA N° 3-3), con pendientes que no superan los 15° (salvo en los escarpes de ríos principales, FIGURA N° 3-5) inclinadas preferentemente hacia el Oeste (FIGURA N° 3-7).

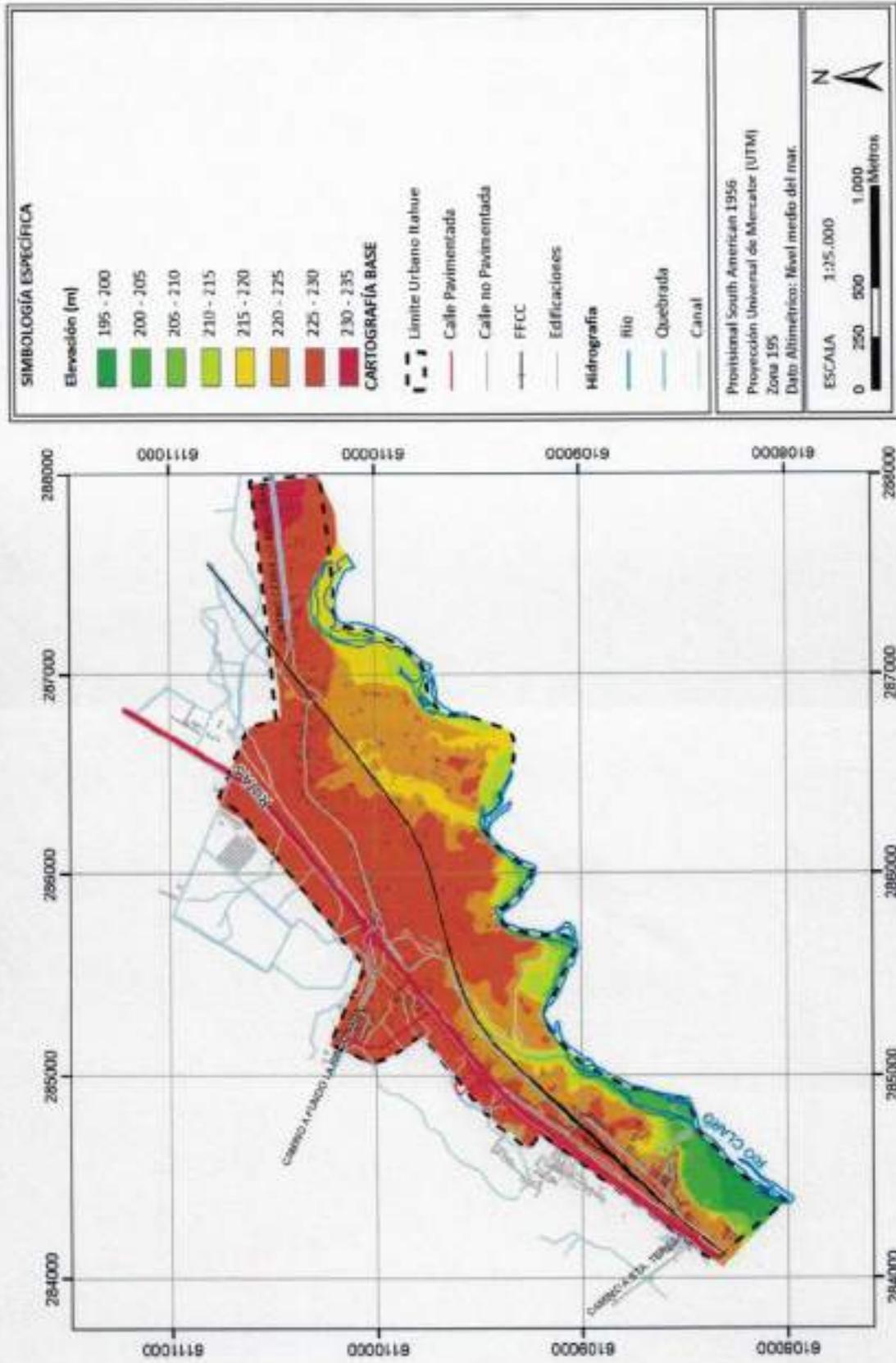
La Cordillera Principal, está conformada por rocas estratificadas volcánicas y volcanoclásticas, cuyas edades van desde el Eoceno hasta el Mioceno Superior, cubiertas por el arco volcánico actual. Está compuesta por cerros que en promedio se ubican sobre los 2.000 m s.n.m., donde las mayores cumbres se asocian a los principales volcanes del área de estudio (llegando casi a los 4.000 m s.n.m.). El sistema cordillerano configura una sucesión regular de quebradas y valles, las cuales son las vías naturales de evacuación de aguas hacia el mar. En general, en quebradas y valles tienden a formarse abanicos aluviales, de forma lobular y de baja pendiente. La localidad de Radal se ubica en el valle del río Claro, y su topografía difiere considerablemente de las demás áreas urbanas de la comuna. Posee una elevación bastante mayor, entre 600 y 1350 m s.n.m. (FIGURA N° 3-4), y las pendientes usualmente superan los 35°, estas se ubican en las riberas de los principales ríos del área de estudio, asociadas a la incisión fluvial, y en las altas cumbres de la Cordillera (FIGURA N° 3-6).

FIGURA N° 3-2 Carta de elevaciones y principales unidades morfoestructurales en el área de estudio



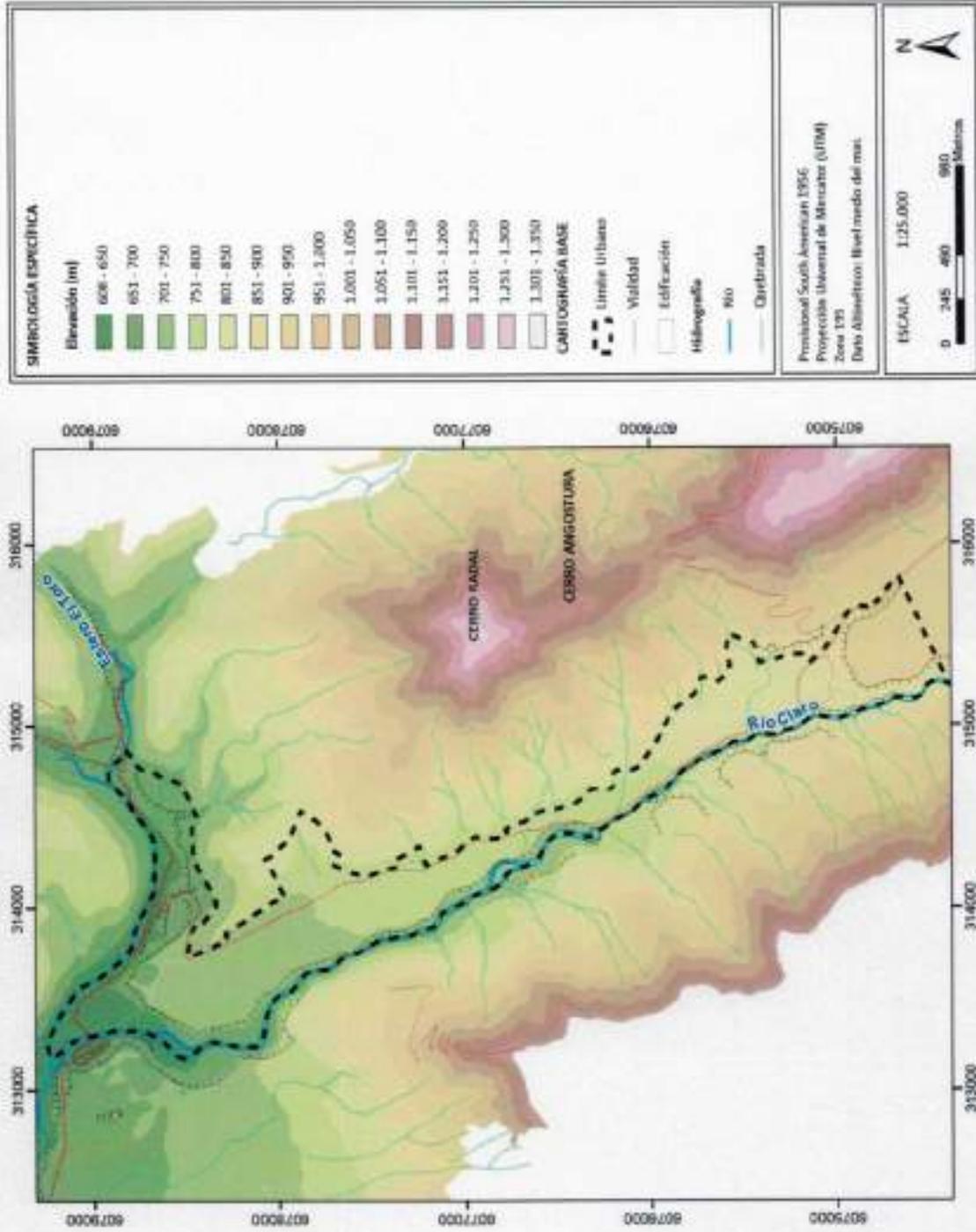
FUENTE: Elaboración propia a partir de: a) Shuttle Radar Topography Mision (SRTM) para mayor detalle ver Farr et al. (2007)

FIGURA N° 3-3 Carta de elevaciones del área urbana de Itahue



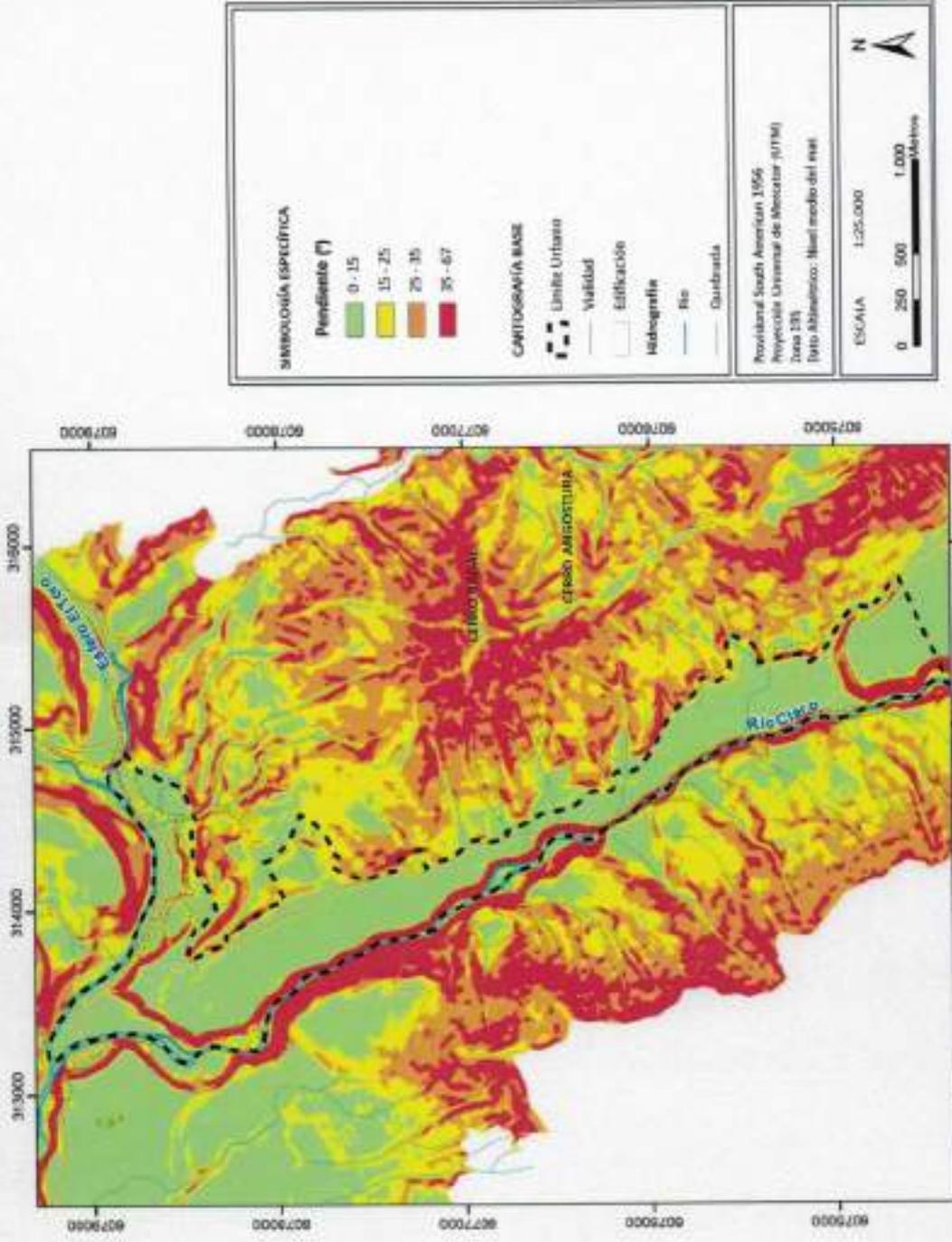
FUENTE: Elaboración propia a partir de modelo de elevación ASTER GDEM

FIGURA N° 3-4 Carta de elevaciones del área urbana de Radal



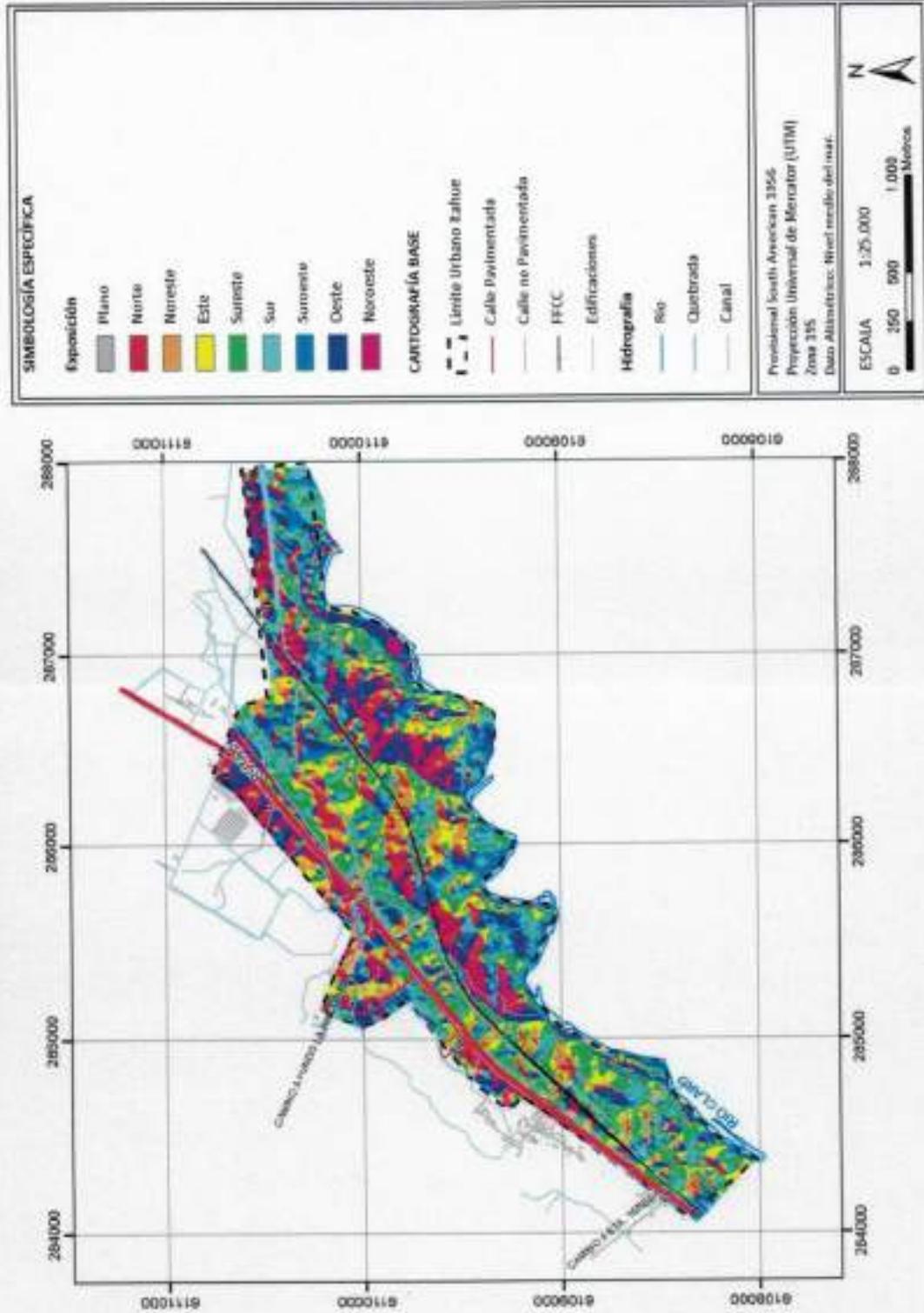
FUENTE: Elaboración propia a partir de modelo de elevación ASTER GDEM

FIGURA Nº 3-6 Carta de pendientes para el área urbana de Radal



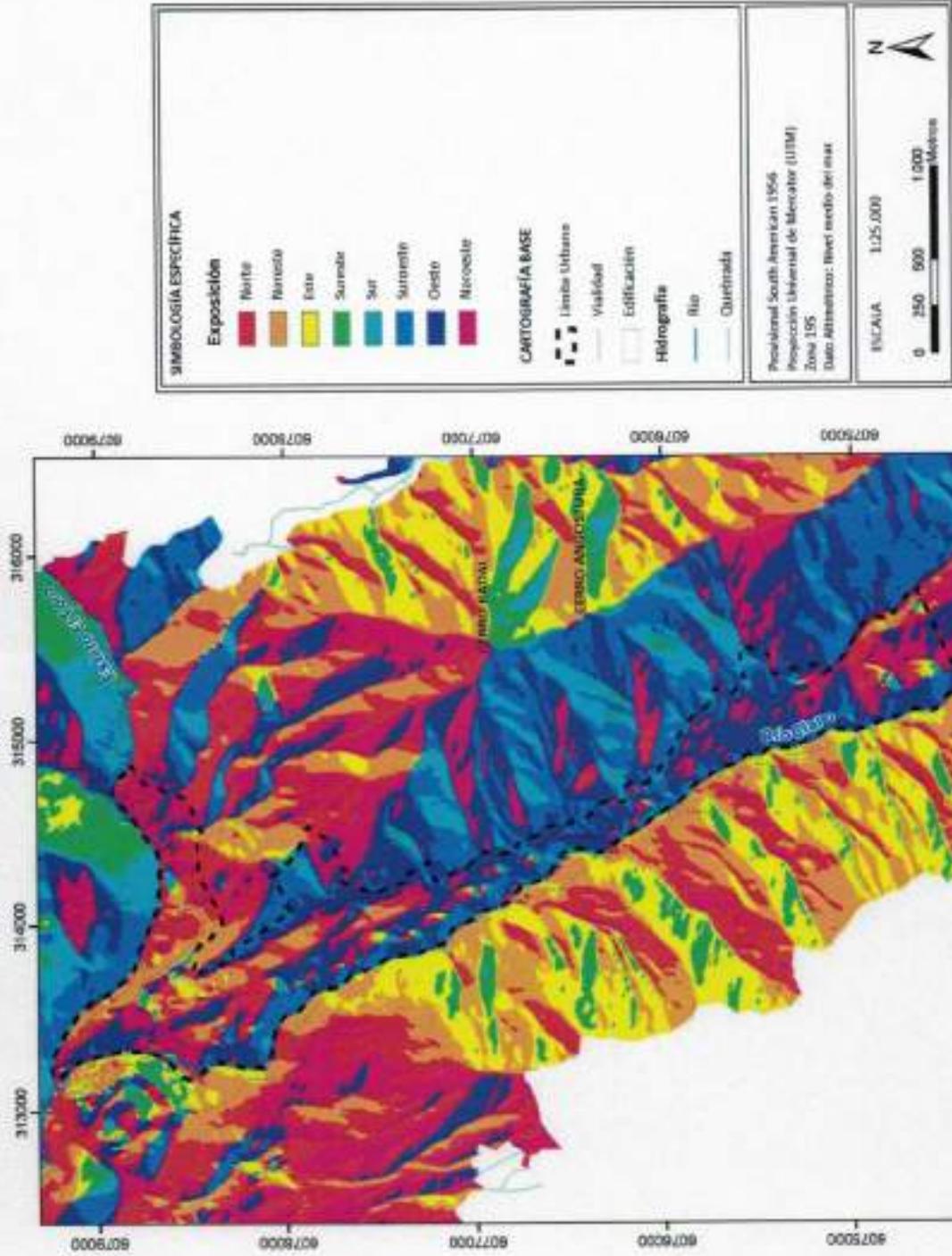
FUENTE: Elaboración propia a partir de modelo de elevación ASTERDEM

FIGURA Nº 3-7 Carta de exposición de ladera para el área urbana de Itahue



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

FIGURA Nº 3-8 Carta de exposición de ladera para el área urbana de Radal



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

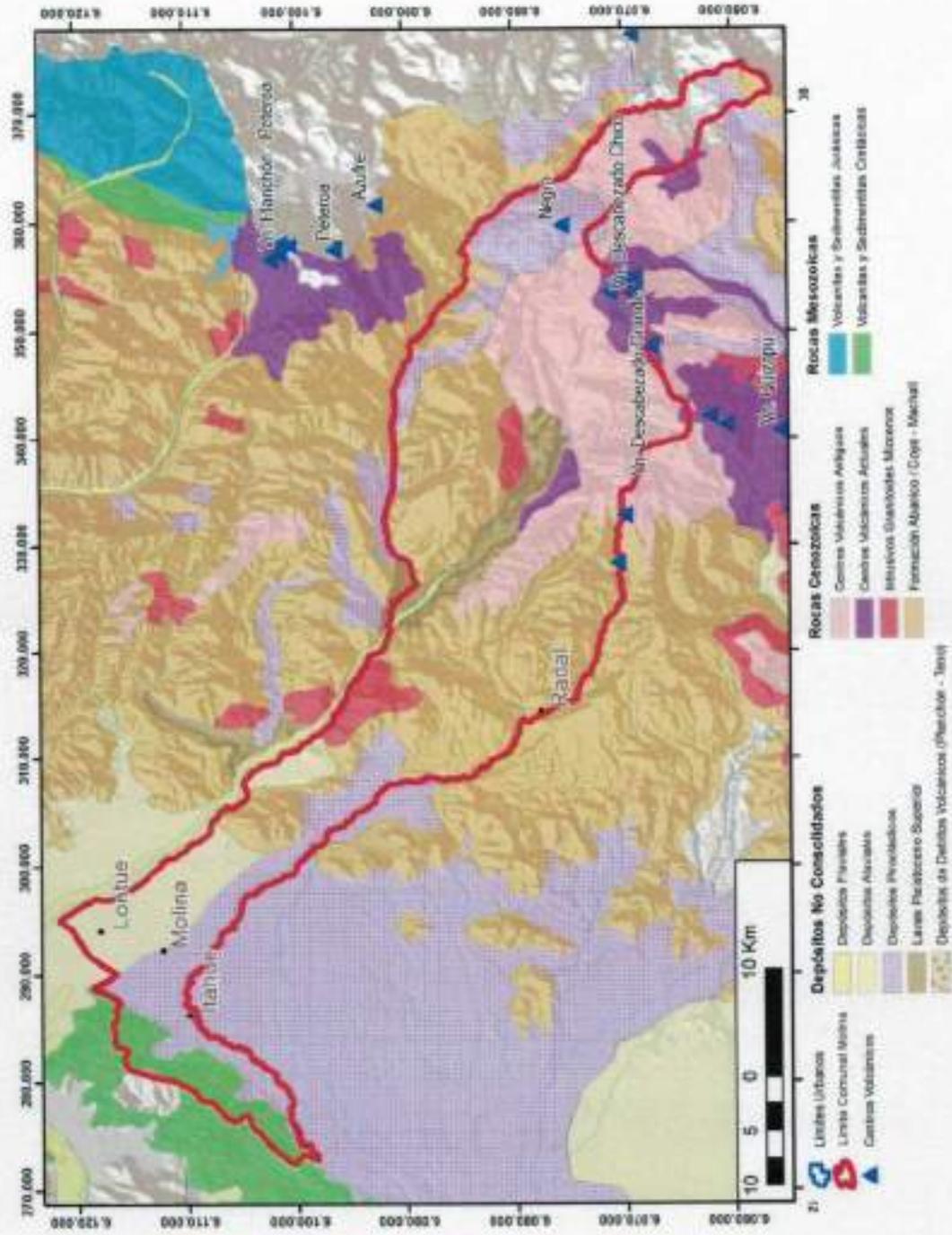
3.3 Marco Geológico

Para el área de estudio, no existen trabajos geológicos de detalle (Escala <1:25.000), siendo las únicas fuente de información geológica, la Geología y Peligros Volcánicos del Complejo Volcánico Planchón - Peteroa, elaborado por Naranjo et al. (1999) a una escala 1:100.000, el mapa geológico de Chile a escala 1:1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2002) y trabajos científicos a escala local (por ejemplo, Varela y Moreno, 1982).

La geología de la Comuna de Molina, se muestra a grandes rasgos en la FIGURA N° 3-9. De manera general, el área se caracteriza por la existencia de la Formación Abanico (también conocida como Coya - Machali), que aflora a lo largo de la Cordillera Principal. Esta formación cubre en discordancia de erosión a rocas volcánicas y sedimentarias, marinas y continentales del Cretácico Superior, las que afloran próximas a la frontera con Argentina, y se encuentra intruida por rocas miocenas. Cerca del arco volcánico actual, las unidades de roca previamente definidas se encuentran cubiertas por lavas y cenizas asociadas al volcanismo de los centros volcánicos actuales (por ejemplo, el complejo Planchón - Peteroa). Finalmente, las formaciones rocosas corresponden a la superficie de erosión actual, por lo que se encuentran cubiertas por depósitos no consolidados, tales como depósitos fluviales, aluviales y de remoción en masa.

A continuación se presenta una descripción en detalle de las unidades geológicas reconocidas en el área de estudio, a escala regional y con énfasis en las localidades de Lontué, Molina, Itahue y Radaí, las que se muestran en las FIGURA N° 3-10, FIGURA N° 3-11 y FIGURA N° 3-12, y en el PLANO N° 1, PLANO N° 2 y PLANO N° 3 fuera de texto.

FIGURA N° 3-9 Mapa Geológico de la Comuna de Molina



FUENTE: Modificado a partir de: Naranjo et al. (1999), Hauser (2005) y SERNAJECOMIN (2003)

3.3.1 Unidades de Roca

3.3.1.1 Volcanitas y Sedimentitas Jurásicas y Cretácicas

Corresponde a una secuencia volcanosedimentaria, plegada y fallada, de ambiente marino y continental cuyas edades van desde el Bathoniano hasta el Hauteriviano, que afloran en el límite oriental de la comuna. Dentro de estas unidades se encuentran:

Formación Colimapu (Albiano - Hauteriviano): Corresponde a una secuencia continental con una predominante coloración rojiza de areniscas y lutitas, conglomerados de matriz arenosa, con intercalaciones de tobas, lavas andesíticas y calizas, en capas lateralmente discontinuas. Se asume un contacto concordante en su base con la Formación Baños del Flaco, y discordante con la sobreyacente formación Abanico. (Khlon, 1960)

Formación Baños del Flaco (Tithoniano Superior - Hauteriviano): sedimentos marinos, principalmente calizas, calizas fosilíferas, calcilutitas, lutitas y areniscas calcáreas de color gris-verdoso. La base y el techo de esta formación son concordantes con las Formaciones Río Damas y Colimapu, respectivamente (Khlon, 1960).

Formación Río Damas (Kimmeridgiano): Potente secuencia continental de casi 3.000 de conglomerados y brechas conglomerádicas gruesas a medianas, con intercalaciones de areniscas, limonitas, lavas andesíticas y pequeños niveles de yesos, expuestos en la parte oriental de la Cordillera Principal. Se le asigna al Kimmeridgiano, por estar apoyada concordantemente sobre la Formación Río Colina (Oxfordiano) y subyacer concordantemente, a las capas marinas del Tithoniano pertenecientes a la Formación Lo Valdés (Khlon, 1960).

Formación Nacientes del Teno (Bathoniano - Caloviano): Secuencia de areniscas finas a medias con intercalaciones de pelitas negras, limolitas y en forma subordinada niveles de brechas en su base, con una serie rítmica de niveles gruesos de areniscas gruesas y niveles delgados de limolitas en los niveles superiores (Álvarez et al., 1997; Charrier et al., 2002b). En el área de estudio aflora en el cercano a la frontera con Argentina). En base al material paleontológico encontrado se le asigna una edad Bathoniano - Caloviano Temprano (Álvarez et al., 1997).

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

Corresponde a una secuencia de rocas volcanoclásticas que afloran en el flanco oriental de la Cordillera de la Costa. De Norte a Sur presenta variaciones laterales de facies y está constituida principalmente por lavas andesíticas y riolíticas, ignimbritas y brechas con intercalaciones locales de tufitas y areniscas. A esta unidad se le asigna una edad Cretácico Superior - Paleógeno (Hauser, 1995). Aflora en sector Noroeste del área urbana de Molina y Lontué (FIGURA N° 3-11), el límite occidental de la Depresión Central.

3.3.1.3 Formación Abanico

Formación constituida por lavas básicas a intermedias, rocas piroclásticas ácidas, e intercalaciones sedimentarias continentales (fluviales, aluviales y lacustres), formando lentes de hasta 500 m de espesor. Esta formación se encuentra plegada y es afectada por un pervasivo metamorfismo de muy bajo grado. El espesor del conjunto se estima en ~ 3.000 m, aún cuando se acepta que éste aparece aumentado por las numerosas intrusiones de filones-manto y lacolitos andesíticos. De acuerdo a diversas dataciones radiométricas y estudios de fauna fósil se le asigna una edad Eoceno Superior - Mioceno (Charrier et al., 2002).

La franja occidental de la Formación Abanico se encuentra, ya sea en contacto por falla con la Formación Lo Valle, o concordante con un hiatus de 35 Ma. El margen oriental de la Formación Abanico está limitado por depósitos mesozoicos (Volcanitas y Sedimentitas Jurásicas y Cretácicas, ver FIGURA N° 3-9), puestos en contacto principalmente a través de grandes fallas regionales (Charrier et al., 2002).

A menudo, La Formación Abanico aflora en altos cerros, cubiertos o rodeados por depósitos volcánicos posteriores (los que han colmatado los valles del sector). Tal es el caso de la localidad de Radal, donde la Formación Abanico aflora al Norte del río Claro, en contacto con secuencias de lavas del Pleistoceno Superior y con la Formación Cola de Zorro (ver Mapa Geológico del área urbana de Radal, FIGURA N° 3-12).

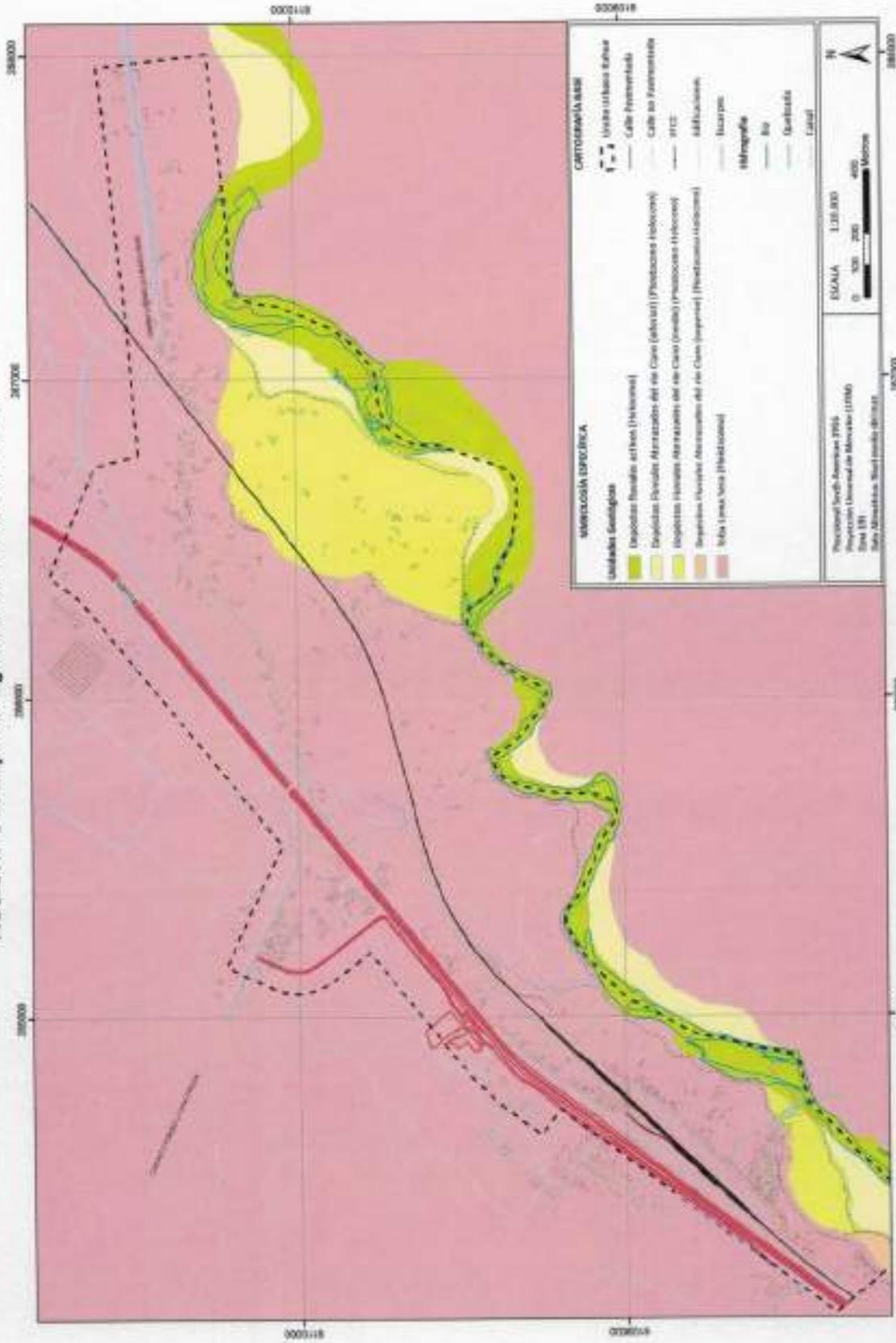
3.3.1.4 Intrusivos Granitoides Miocenos

Corresponden a granitos, granodioritas y monzodioritas que intruyen principalmente a la Formación Abanico.

3.3.1.5 Formación Cola de Zorro

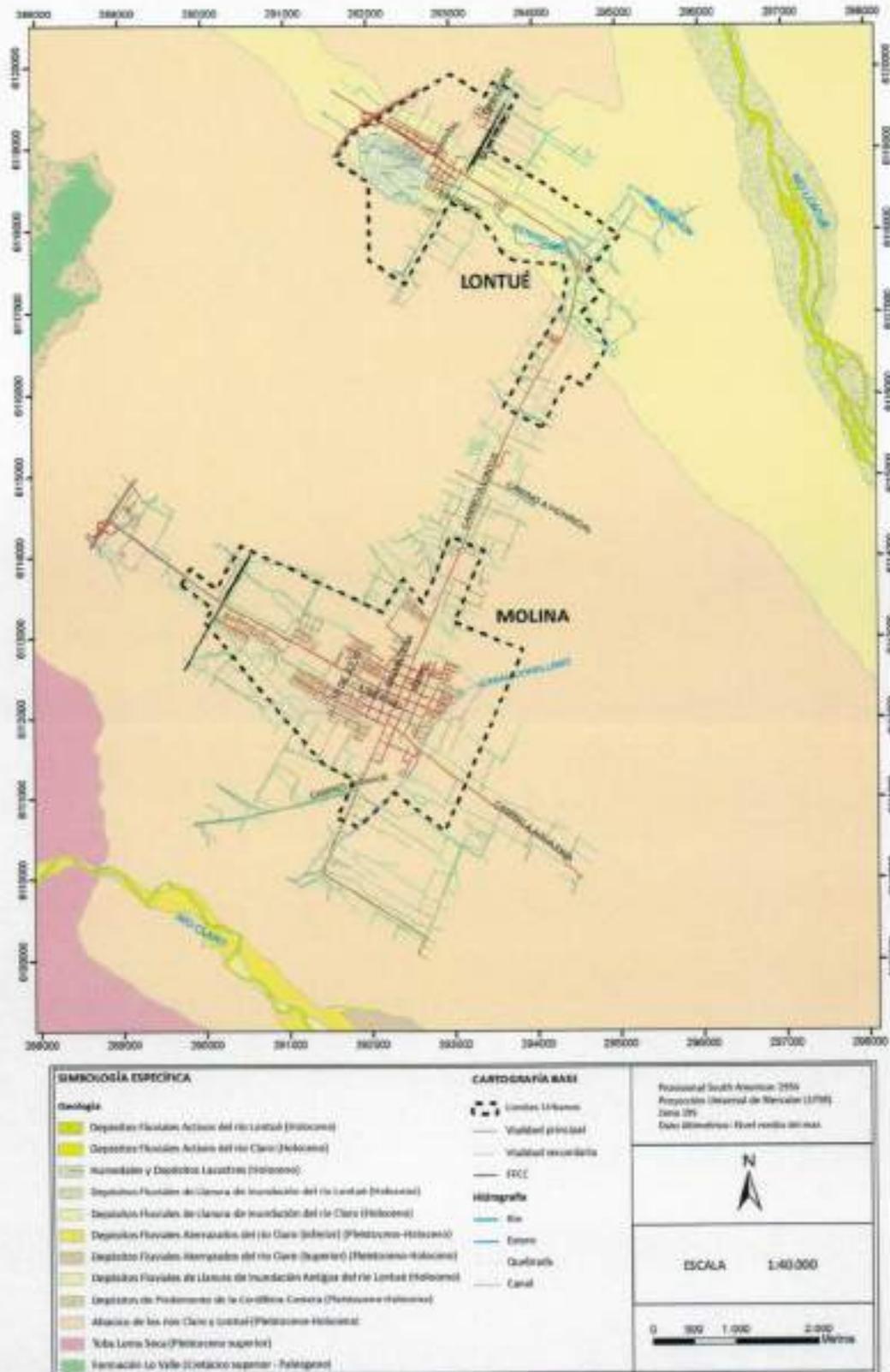
Corresponden a secuencias de lavas andesíticas a riolíticas con intercalaciones de rocas piroclásticas que se depositan en discordancia sobre rocas de la Formación Abanico. Poseen una edad Plioceno – Pleistoceno Inferior. Se encuentran ampliamente extendidas en la Cordillera Principal, afloran desde el río Teno por el Norte, hasta el río Maule por el Sur, y desde la frontera con Argentina hasta el límite Oeste de la Cordillera. Las rocas de la Formación Cola de Zorro rellenaron el relieve de la Cordillera Principal, formando un alto plateau volcánico, el que luego fue erodado por las glaciaciones pleistocenas y también por la acción fluvial, creando amplios valles. Tal es el ejemplo del valle del río Claro, en donde se encuentra la zona urbana de Radal (FIGURA N° 3-12).

FIGURA N° 3-10 Mapa Geológico del área urbana de Itahue



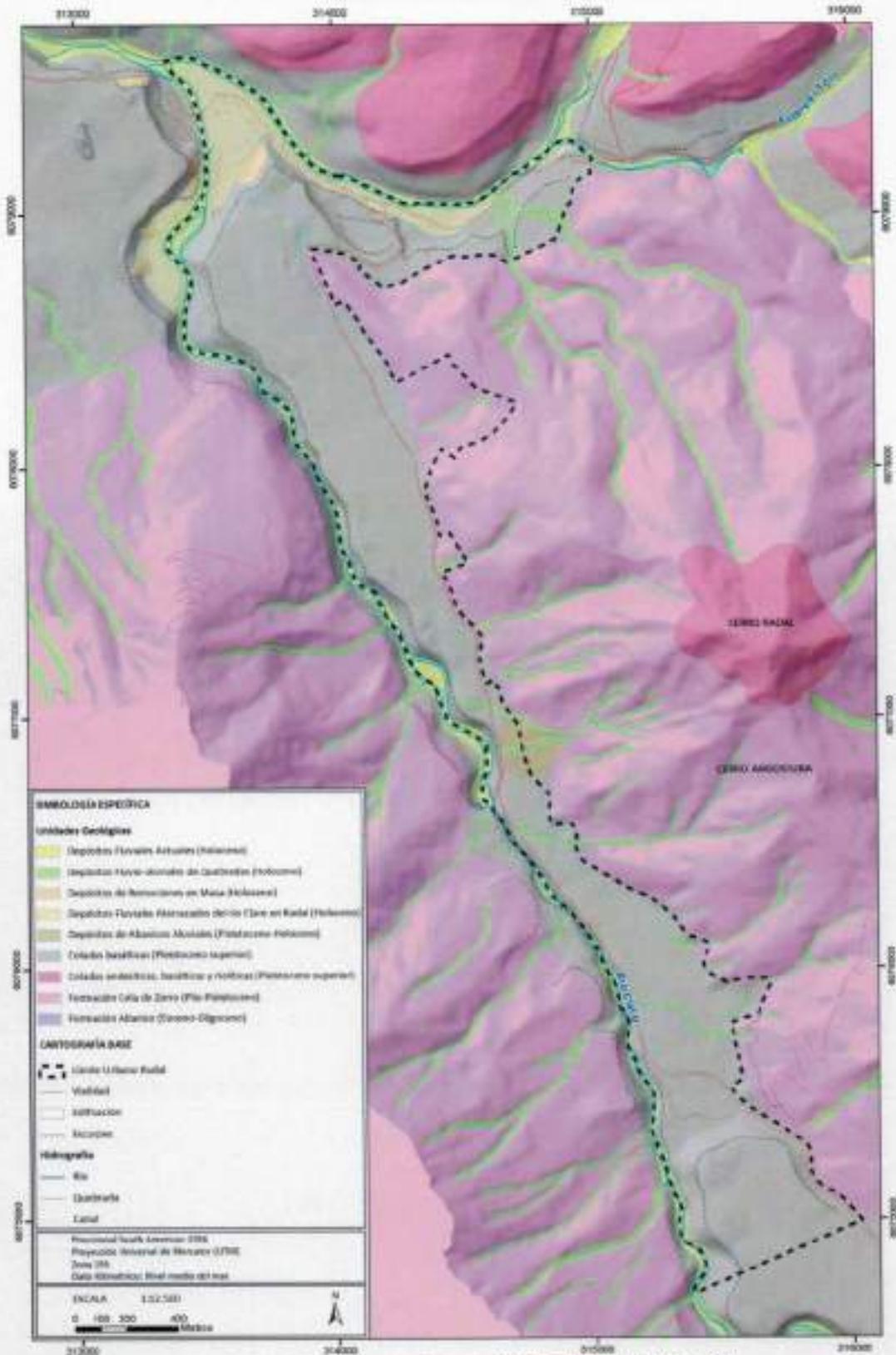
FUENTE: Modificado a partir de Hauser (2005) y SERVAGEOMIN (2003)

FIGURA N° 3-11 Mapa Geológico del área urbana de Molina y Lontué



FUENTE: Modificado a partir de: Hauser (2005) y SERNAGEOMIN (2003)

FIGURA N° 3-12 Mapa Geológico del área urbana de Radal



FUENTE: Modificado a partir de: Baroslo (1985) y SERNAGEOMIN (2003)

3.3.1.6 Depósitos Volcánicos Antiguos (Pleistoceno Superior) y Activos (Holoceno)

En el margen oriental del área de estudio, la secuencia de rocas que van del Eoceno hasta el Mioceno Superior, están cubiertas por los centros volcánicos de edad Pleistocena - Holocena, que constituyen el arco volcánico activo actual o aparatos volcánicos que ya no presentan actividad. Dentro de este último grupo, destacan los volcanes Sordo Lucas y Alto del Padre, que corresponden a estratovolcanes fuertemente erosionados. Además existen muchos otros volcanes extintos, los que afloran como altos topográficos en la cordillera, es frecuente encontrar potentes secuencias de lavas y tobas rellenando los amplios valles del sector (ver "Coladas de lavas basálticas, andesíticas y riolíticas del Pleistoceno Superior" en mapa geológico del área urbana de Radal, FIGURA N° 3-12).

Durante el Pleistoceno Superior destacan también las Cenizas de Loma Seca, las cuales son secuencias de tobas dacíticas y riolitas principalmente, producidas por la erupción de la Caldera Loma Seca, ubicada al Sur del río Colorado, en la parte nororiental de la Comuna de Molina. Los grandes volúmenes de ceniza y piroclastos se depositaron rellenando los valles principales de Chile y Argentina, alcanzando algunas veces la Depresión Central. En el Mapa Geológico del área urbana de Itahue (FIGURA N° 3-9 y FIGURA N° 3-10) se puede observar como las rocas que rodean al pueblo corresponden sólo a ignimbritas de Loma Seca.

Con respecto al volcanismo actual, al Este de la Comuna de Molina destacan los volcanes Descabezado Chico, Descabezado Grande, Azul y Quizapu (y también el complejo Planchón-Peteroa ubicado justo al Norte de la comuna), todos ellos con erupciones históricas (ver capítulo 4.2.1). Asociado a estos volcanes se reconocen lavas, de composición basáltica a riolítica que cubren a rocas de la Formación Abanico, Formación Cola de Zorro y/o rellenan los valles actuales, así como depósitos piroclásticos (cenizas y tobas principalmente, asociadas a flujos piroclásticos o depósitos de caída), que cubren a formaciones más antiguas o rellenan los valles.

3.3.2 Depósitos No Consolidados

3.3.2.1 Depósitos Piroclásticos

Corresponde a depósitos de caída, cenizas, lapillis y tefras asociados a los principales centros eruptivos en la zona. Se ubican en la alta Cordillera, principalmente producidos por la erupción del Volcán Quizapu de 1932 (ver capítulo 4.2.1).

3.3.2.2 Abanico de los ríos Claro y Lontué

En la Depresión Central se reconocen principalmente secuencias de relleno asociadas a los ríos Claro y Lontué, los que conforman abanicos aluviales de valle asociados a cada uno de estos ríos. Estos depósitos se caracterizan por estar conformados por sedimentos de tamaño grueso (principalmente bloques y gravas), con lentes de arenas, limos y arcillas, los que en ocasiones se encuentran dispuestos en una estratificación cruzada. Estos depósitos se asocian a una topografía plana, que se ve interrumpida por terrazas de erosión en las cercanías de los cauces de los ríos principales debido a la disección que por ellos fueran objeto a causa de cambios en el nivel de base. La petrografía de los materiales clásticos se relaciona con las unidades litológicas encontradas aguas arriba, es decir, principalmente de origen volcánico. La mayoría de estos depósitos conforma una secuencia vertical homogénea y una reducción de la granulometría hacia el sector distal (occidental de la Depresión Intermedia), lo cual implica una mayor predominancia de las fracciones más finas, resultando en un sedimento bien seleccionado, pero débilmente compactado, lo cual determina una alta porosidad y buena permeabilidad, lo que permite un adecuado drenaje de las aguas superficiales.

3.3.2.3 Depósitos Fluviales Antiguos Aterrazados

Corresponden a las terrazas fluviales de los ríos Claro y Lontué, las que se encuentran encajonadas en los valles, disectando a la geología más antigua, rocas volcánicas en el caso de Radal e Itahue, y abanicos aluviales antiguos en el caso de Molina y Lontué.

Existen dos sistemas de depósitos fluviales antiguos, asociados a los dos ríos principales, el río Claro (localidades de Itahue y Radal) y el río Lontué (localidades de Molina y Lontué).

- **Terraza Superior del río Claro:** Fue identificada sólo al Oeste de la localidad de Itahue la cual se encuentra adosada a las rocas de la ribera Norte del río Claro (FIGURA N° 3-10). Se encuentra aproximadamente 3 m sobre la Terraza Media del río Claro.
- **Terraza Media del río Claro:** Corresponde a un depósito compacto, cuya morfología es un manto con una leve pendiente Oeste. Está compuesta de gravas y ripios, con una matriz de arenas, arcillas y limos. También fue identificada en el sector de Itahue, posee una extensión mucho mayor que la Terraza Superior, se ubica en la ribera Norte del río Claro.
- **Terraza Inferior del río Claro:** Constituye el nivel aterrazado más joven, ubicado aproximadamente 1 m sobre la llanura de inundación actual. Está compuesta de gravas redondeadas y arenas finas a gruesas, con escasa matriz de limos y arcillas (FIGURA N° 3-10 y FIGURA N° 3-13). En la ribera Norte la Terraza Inferior está separada por un escarpe de 3 m de la Terraza Media. En la ribera Sur se encuentra en directo contacto con las rocas de Loma Seca.

FIGURA N° 3-13 Terraza inferior y llanura de inundación actual en la localidad de Itahue



Fuente: Elaboración propia

- **Terraza del río Claro en Radal:** Se encuentra en el sector de la confluencia del estero El Toro con el río Claro (FIGURA N° 3-12). Se compone principalmente de gravillas y arenas, pero con intercalaciones de brechas aluviales. No es posible ligar su génesis con la de las terrazas reconocidas río abajo en Itahue, pues se carece de información geológica de detalle o dataciones.

- **Llanura de Inundación Antigua del río Lontué:** Corresponde a una extensa zona de aterrazamiento parcial, donde aún se reconocen paleocauces del río, pero es un área que ha sido abandonada por este, el cual se restringe al área de la llanura de inundación actual (FIGURA N° 3-11).

3.3.2.4 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:** Corresponde a los bancos y barras dispuestos irregularmente en los lechos de los ríos Claro (FIGURA N° 3-14) y Lontué. También incluye las llanuras de inundación de los mismos, las cuales son áreas ubicadas en las riberas de ambos ríos, las que normalmente se inundan durante precipitaciones intensas. Normalmente presentan un nivel de aterrazamiento parcial.

FIGURA N° 3-14 Cauce y Llanura de Inundación actual del río Claro en la localidad de Itahue. En el fondo se observa el escarpe de roca de Loma Seca



Fuente: Elaboración propia

- **Depósitos Fluviales Activos de Esteros y Quebradas:** Estos depósitos se distribuyen a lo largo de los cauces activos de esteros y quebradas que drenan hacia el río Claro en la localidad de Radal (FIGURA N° 3-12). Normalmente se asocian a cauces angostos y no presentan terrazas asociadas.

3.3.2.5 Depósitos Coluviales y de Piedemonte

Los depósitos coluviales corresponden a brechas heterogéneas, subangulosas a subredondeadas, gravas, arenas y limos. Son sedimentos carentes de estratificación, ubicados al pie de los 'cerros isla' de la Depresión Central, al Oeste del área urbana de Molina-Lontué (FIGURA N° 3-11). Estos depósitos están asociados principalmente a procesos gravitacionales, presentando una morfología de tipo abanico.

3.3.2.6 Depósitos de Remociones en Masa

Se identificaron depósitos de remoción en masa en el área de Radal (FIGURA N° 3-12). Los depósitos se ubican a orillas del río Claro, donde lavas basálticas del Pleistoceno Superior se depositaron sobre sedimentos fluviales antiguos. Los colapsos se producen cuando el río Claro erode los sedimentos fluviales menos competentes de la base de la colada de lava. Son depósitos compuestos de clastos subangulosos, mal seleccionados (de tamaños muy diversos), y de una escasa matriz compuesta de arenas y limos (FIGURA N° 3-15).

FIGURA N° 3-15 Depósito de remoción en masa antiguo en la localidad de Radal



Fuente: Elaboración propia

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.

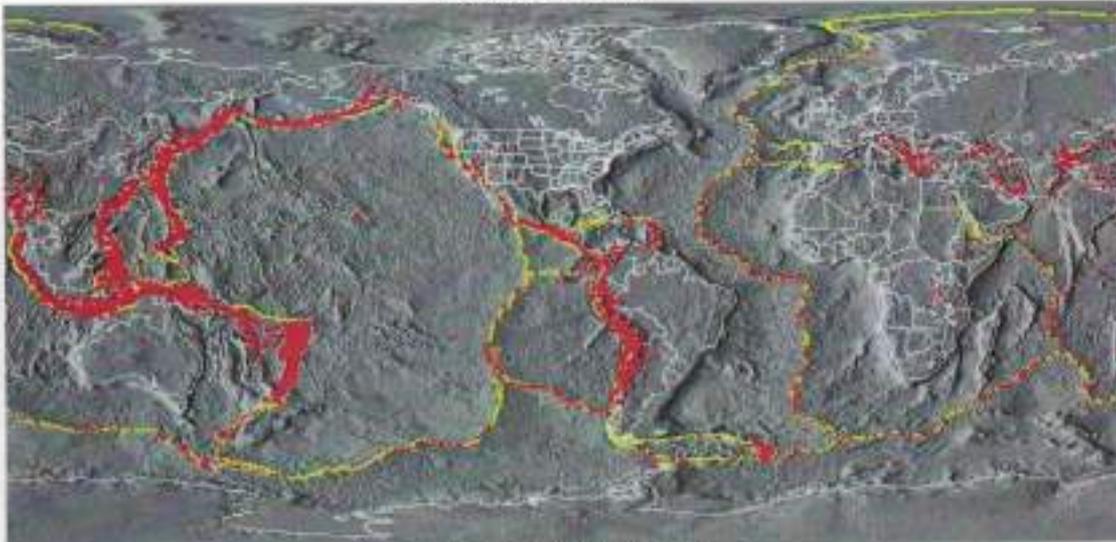
Para cada peligro, se describe en qué consiste, cuáles son sus factores condicionantes, y los principales efectos para la población y sus actividades. El análisis se realiza dividiendo los peligros geológicos en dos grupos, procesos internos o endógenos de la tierra (peligro sísmico y volcánico), y los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

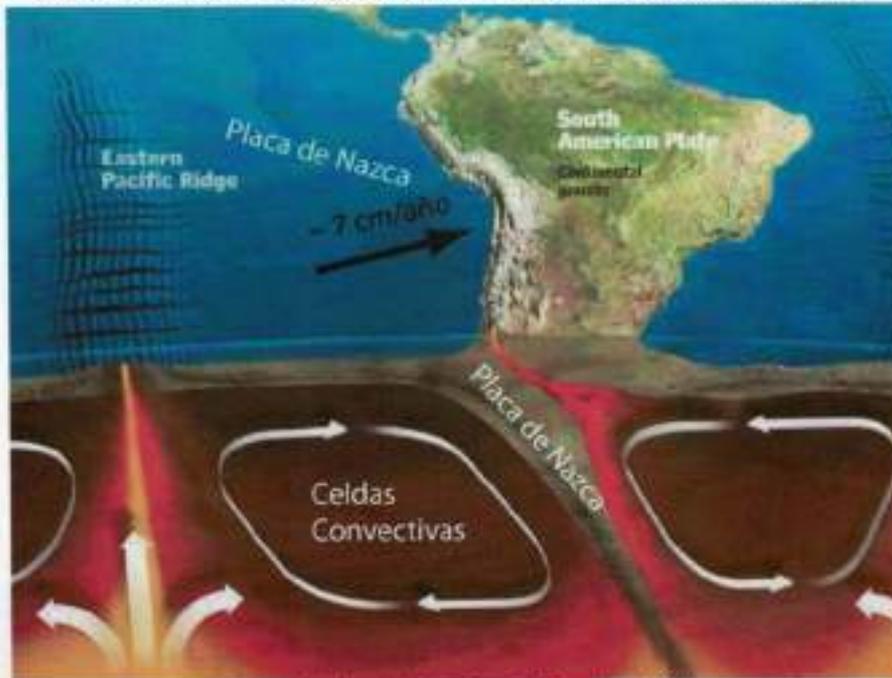


Fuente: Washington University.

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 Británica (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:

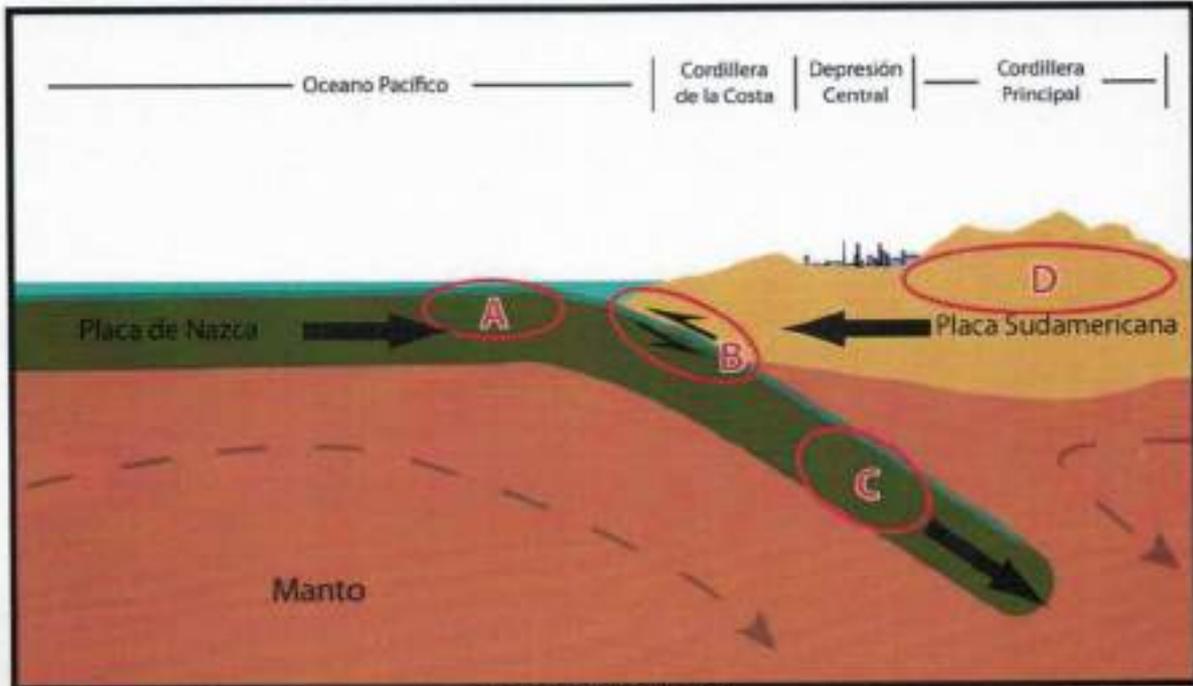
ZONA A) Sismos "Costa afuera", que se producen por los esfuerzos extensivos por abombamiento en la placa subductante antes de la zona de contacto. A pesar de llegar a tener magnitudes cercanas a $M_w = 6$, prácticamente no causan efectos significativos en áreas pobladas debido a su ocurrencia en zonas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

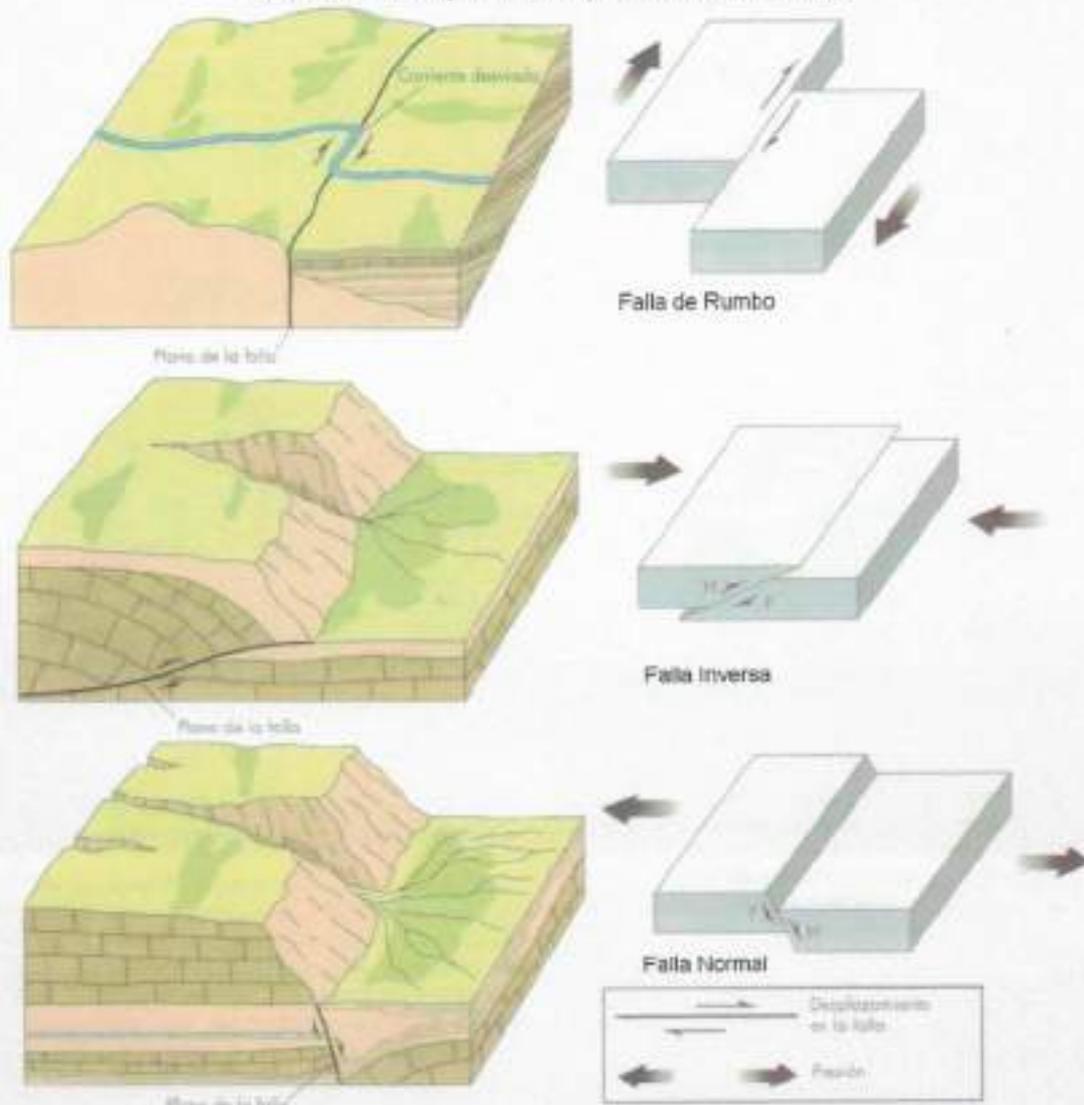
FIGURA N° 4-3 Tipos de sismos que ocurren en un margen de subducción. Explicación en el texto



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.

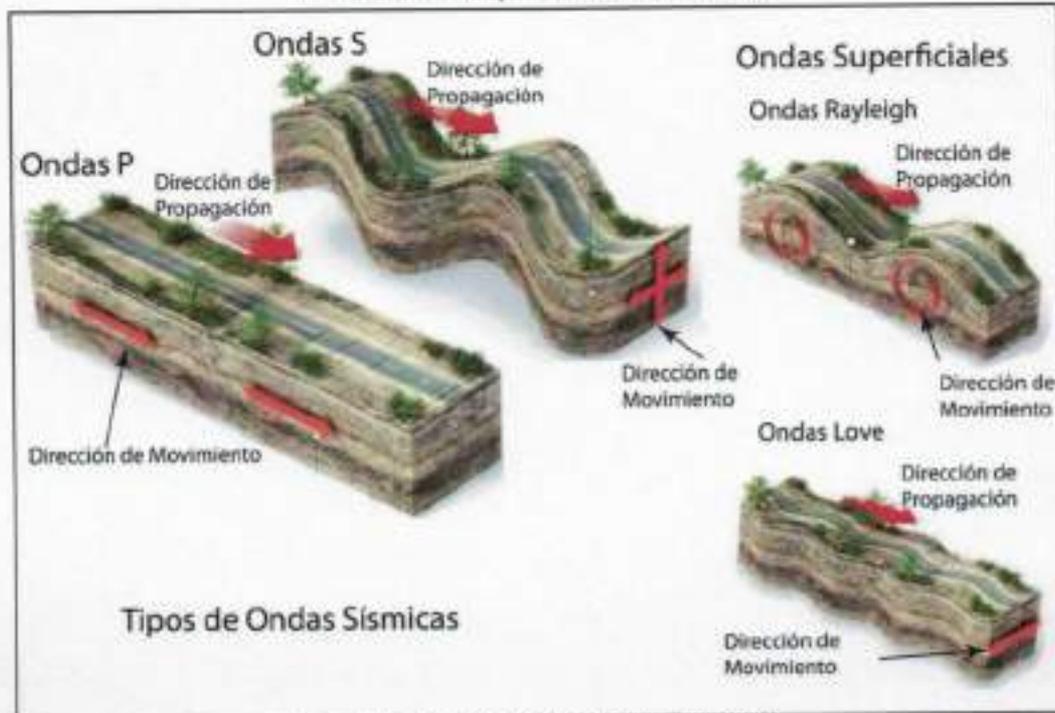
FIGURA N° 4-4 Tipos de falla y esfuerzos asociados



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



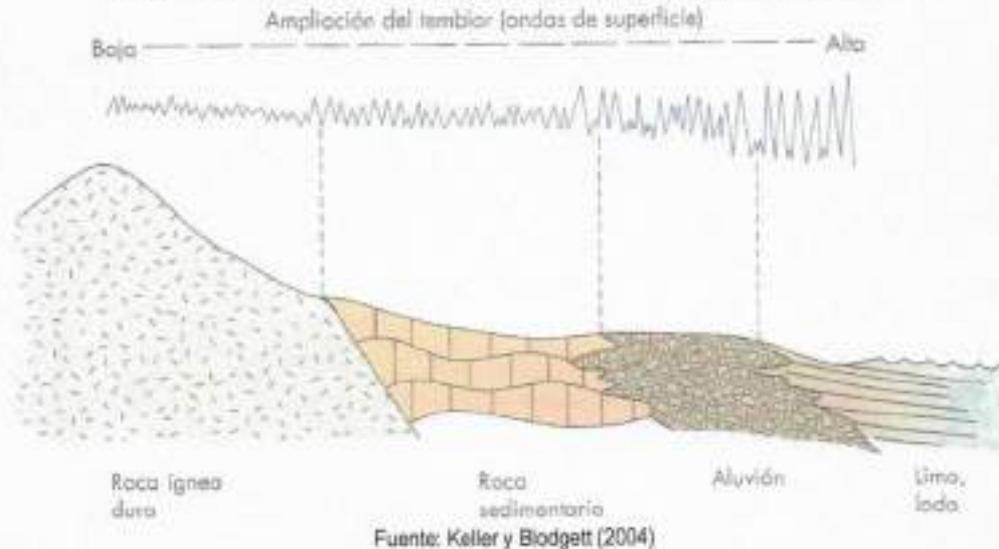
Fuente: Modificado de Enciclopedia Britannica (2008)

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_c). 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



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

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

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

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

Para la ocurrencia de licuefacción se requiere de tres factores:

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

4.1.2 Resultados del Catastro de Información Histórica de Sismicidad

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

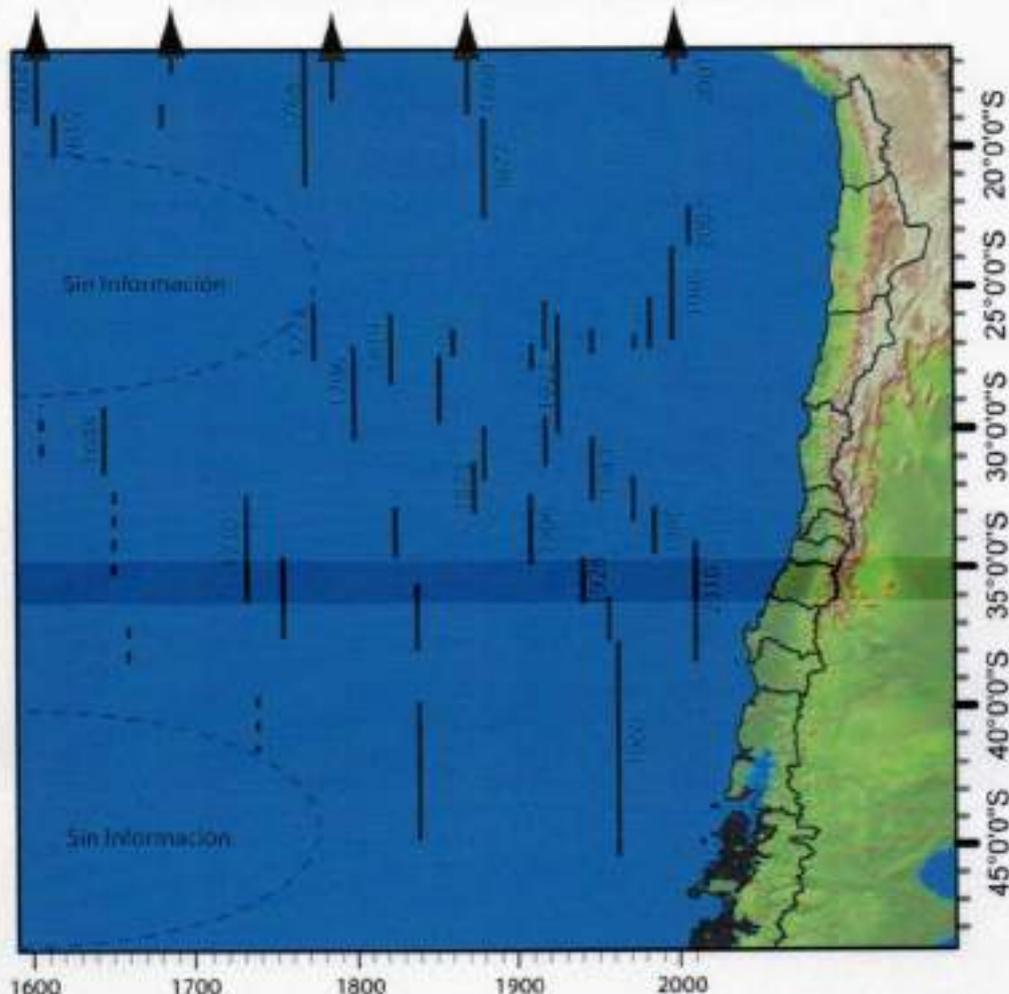
4.1.2.1 Antecedentes Históricos de Terremotos en Chile entre los 33° y 40°S.

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

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

La zona del Centro – Sur de Chile (33° - 46° S), se caracteriza por una sismicidad intensa, como los sucesivos terremotos que han afectado a la ciudad de Valparaíso, Concepción y Valdivia desde los tiempos de la conquista. A continuación se detalla el catastro realizado de sismos reportados entre los 33° y 40° S. Los mayores sismos son destacados en la FIGURA N° 4-7, donde se muestran las zonas de ruptura asociadas a estos terremotos. Las magnitudes asociadas a cada sismo son aproximadas, puesto que no existía instrumental sísmológico 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

Tembor 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 Títil. 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 al 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 reportó 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 afectó a las ciudades de Talca, Concepción, Valdivia y Osorno, y reportó 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 hrs. El epicentro se localizó 25 km al Sur de Lebu. Se generó un maremoto que inundó parte de la ciudad hasta la plaza de armas. La resaca siguiente fue brusca y rápida, arrastrando numerosos objetos al mar.

Terremoto de Tomé, 6 de Mayo de 1953. Terremoto frente a las costas de Tomé, alcanzando una magnitud de 7,6 en la escala de Richter y provocando 12 muertes. La zona más afectada, fue la misma del terremoto de 1939, es decir, Concepción y Chillán. En Concepción el 15% de las edificaciones resultaron dañadas y en Chillán, el daño fue mayor aún, donde tuvo una intensidad de X (MM). En la ciudad de Tomé, la violencia del movimiento hizo que las casas habitación de la gente modesta, sufrieran considerables daños, quedando muchas familias a la intemperie. Los daños se remitieron al agrietamiento de murallas, techos hundidos, etc. Las industrias textiles de la localidad y Bellavista no sufrieron daños materiales de consideración. Hubo quebrazón de vidrios y pedazos de murallas desprendidas. La gente se aglutinó en la Plaza de Armas y lanzaban gritos histéricos lo que hizo más confusa la situación. En Cauquenes se cayeron murallas de casas viejas. En Coronel la mayoría de los edificios resultaron con grietas en muros y techos y se cortó la luz y agua. En Bulnes el sismo provocó grietas en las murallas y destrozos totales o parciales en las techumbres. Dos heridos graves y 25 casas derrumbadas y semidestruidas, fue el balance en la localidad de Florida.

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

Epicentro del terremoto: latitud 38,5° S; longitud 74,5° W

Magnitud calculada: 9,5 Richter

Variación máxima del nivel del mar: 15 metros en Ancud

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

Epicentro del terremoto: latitud 33,11° S; longitud 71,61° W

Magnitud calculada: 8,0 Richter

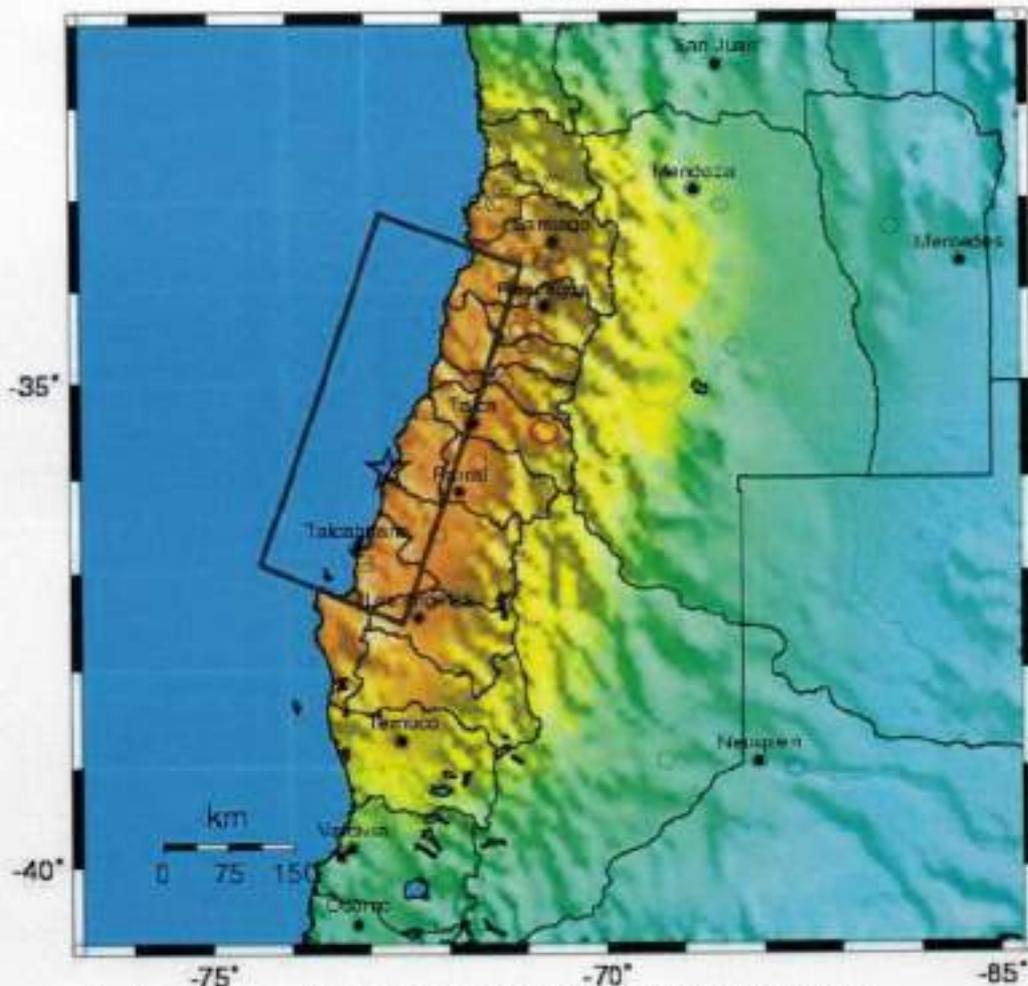
Variación máxima del nivel del mar: 1,2 metros en Valparaíso

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

Se observaron hasta 2 metros de alzamiento en la costa cerca de Arauco. En el período entre el 27 de febrero y el 26 de abril de 2010, el USGS localizó 304 réplicas de magnitud 5 o mayor de las cuales 21 fueron de magnitud 6 o mayor (FIGURA N° 4-8).

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

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



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

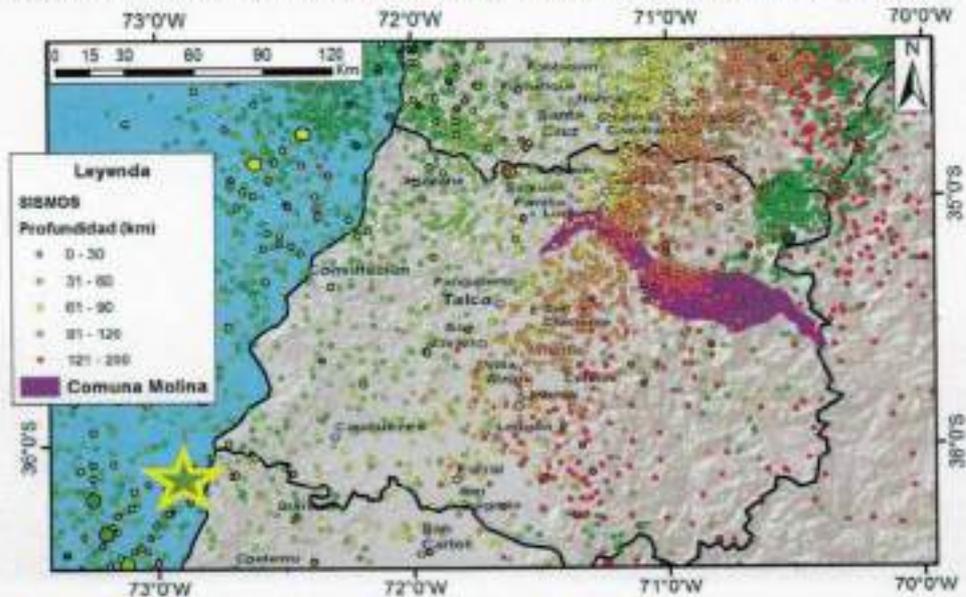
PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC.(%g)	<0.17	.17-1.4	1.4-3.9	3.9-9.2	9.2-18	18-34	34-65	65-124	>124
PEAK VEL.(cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-18	18-37	37-80	80-178	>178
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X

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

4.1.2.2 Fuentes sísmicas en el área de estudio

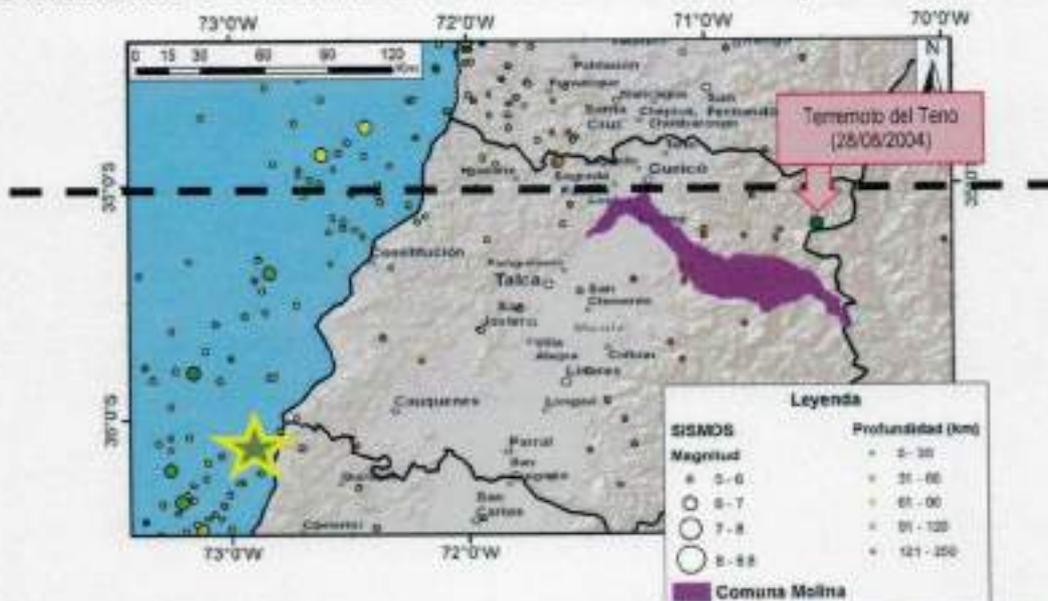
En la FIGURA N° 4-9 se muestran los todos sismos ocurridos entre 1973 y febrero de 2011 en el área de estudio y sectores cercanos, recopilados a partir del Catálogo NEIC del Servicio Geológico Estadounidense (USGS) y en la FIGURA N° 4-10 se detallan sólo los sismos de magnitud mayor a 5, indicando en ambas figuras la ubicación del epicentro del terremoto del 27 de febrero de 2010 y la ubicación del Terremoto del Teno, en la parte alta de la comuna en agosto de 2004.

FIGURA N° 4-9 Profundidad de todos los sismos ocurridos entre los 34° 30' y 36° 30' Latitud Sur, desde el año 1973 a febrero de 2011 (la estrella indica el epicentro del terremoto del 27 de febrero de 2010)



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. La línea discontinua indica la ubicación del perfil de la FIGURA N° 4-11



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 Molina.

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.

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.

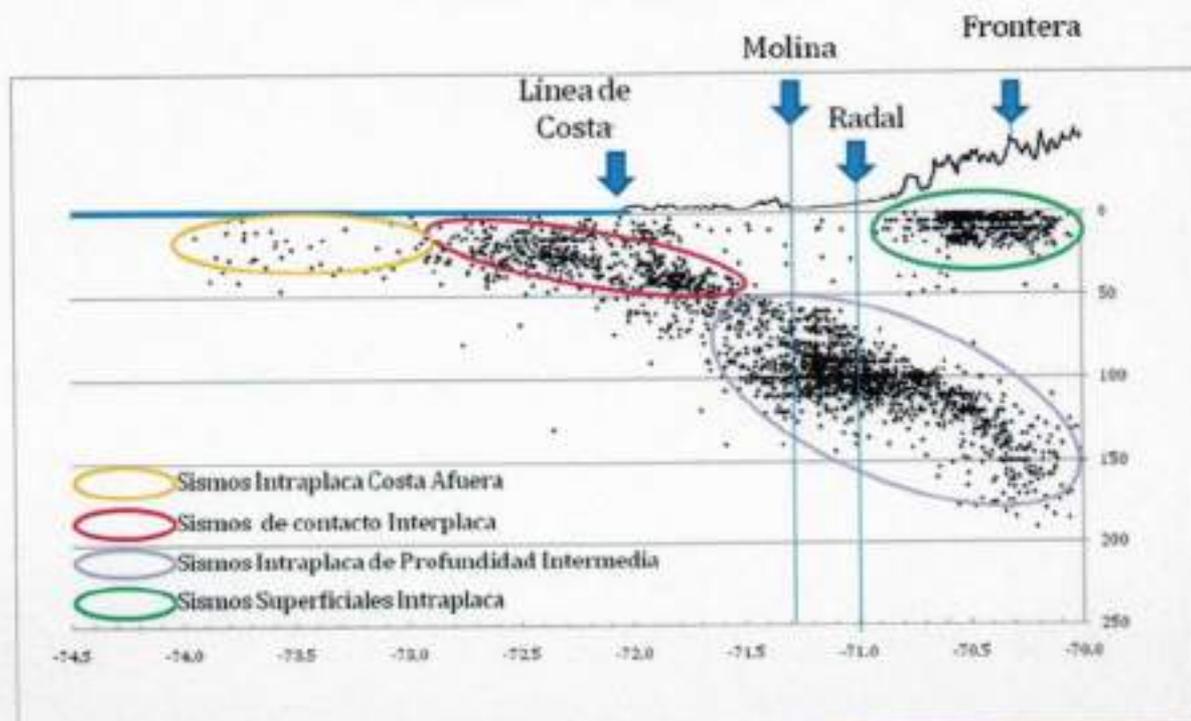
Por lo anterior, se considera una fuente activa que puede generar terremotos destructivos en la Comuna de Molina. En el punto 4.1.2.3 se explica más en detalle los registros sísmicos y geológicos de fallas activas en el área de estudio.

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.

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



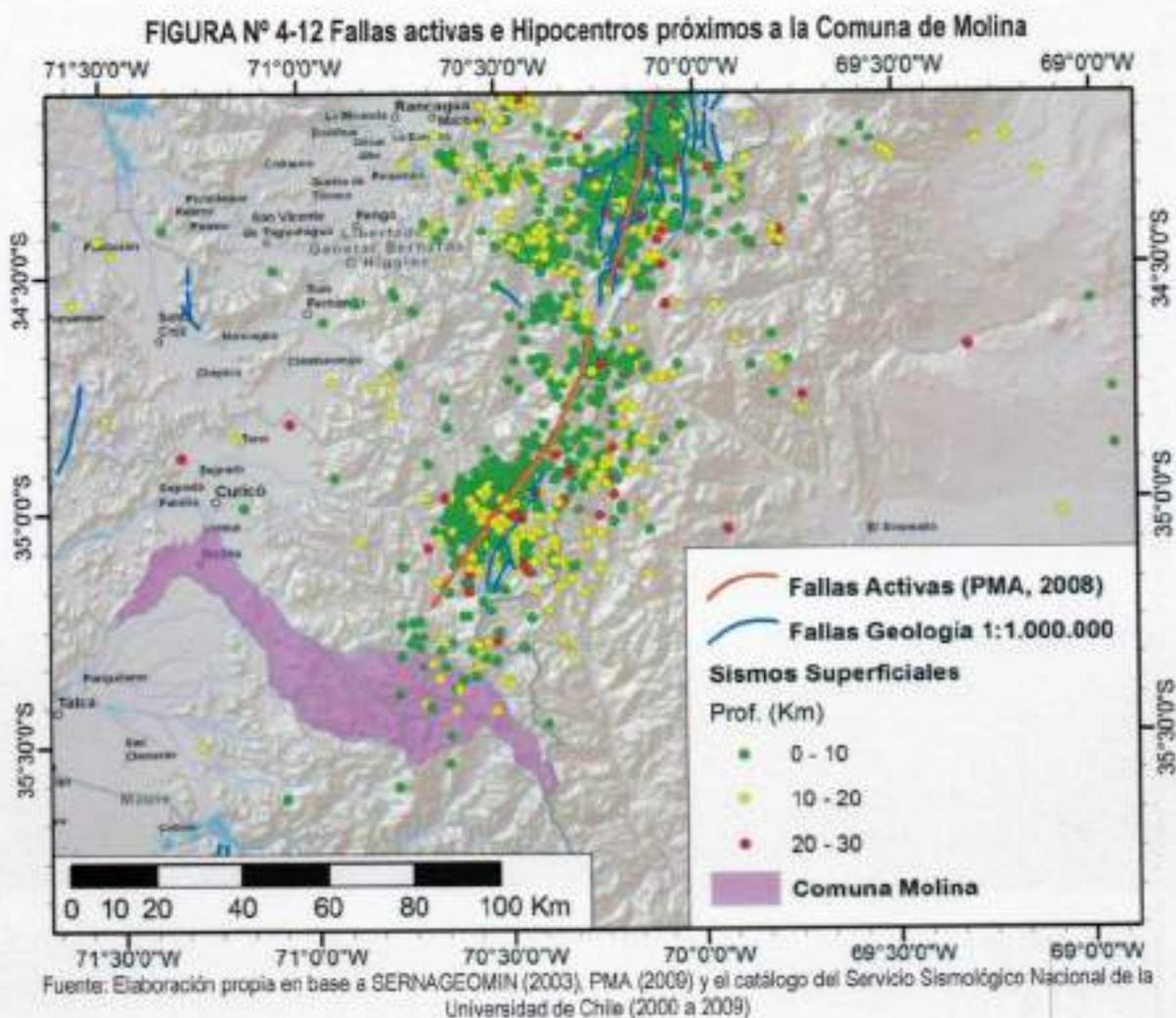
Fuente: Elaboración propia en base al Catálogo NEIC 1973-2011 del USGS (disponible en <http://earthquake.usgs.gov/regional/ncic/>) y Modelo de elevación SRTM

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).

En la información geológica disponible se han estudiado las fallas de la zona abarcada por este trabajo (SERNAGEOMIN, 2002; PMA, 2008). Aunque la información en el área es escasa, se han identificado algunas fallas que presentan evidencias de actividad más reciente, las cuales atraviesan la Comuna de Molina (FIGURA N° 4-12, notar que existe una ausencia de datos sísmicos en la comuna, lo cual no quiere decir que no existen fallas con sismicidad). Por otra parte, 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 como potencialmente activas, estas deben ser consideradas como activas bajo un enfoque conservador.

† Millones de años

† Miles de años



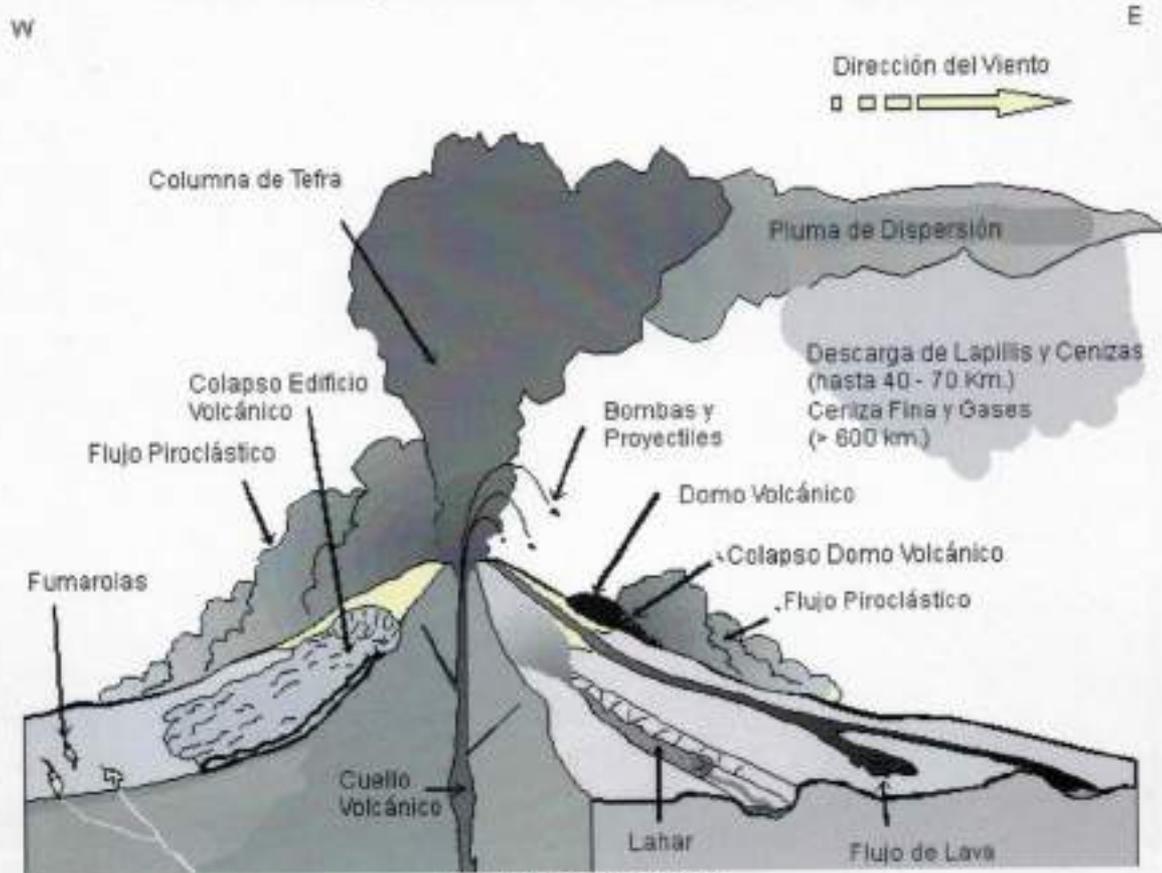
4.2 Procesos Internos o Endógenos de la Tierra – VOLCANISMO

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° 4-13.

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 Nº 4-13 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 (M_w), 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).

CUADRO N° 4-1 Peligros asociados al volcanismo

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

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

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

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

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

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

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

4.2.1 Resultados del Catastro de Información Histórica de Volcanismo

Para el caso del volcanismo, se analizaron las erupciones históricas entre 33° y 37° de latitud Sur, 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 70 km de distancia del arco volcánico actual (FIGURA N° 4 14), por lo que se considera que está directamente influenciada por el peligro volcánico. Dentro de los registros de actividad histórica destacan los centros volcánicos asociados al cordón del Planchón-Peteroa-Azufre, al grupo Descabezado-Azul-Quizapu y a los centros volcánicos asociados a la Laguna del Maule (CUADRO N° 4 2) entre los 33° y 37° de latitud Sur.

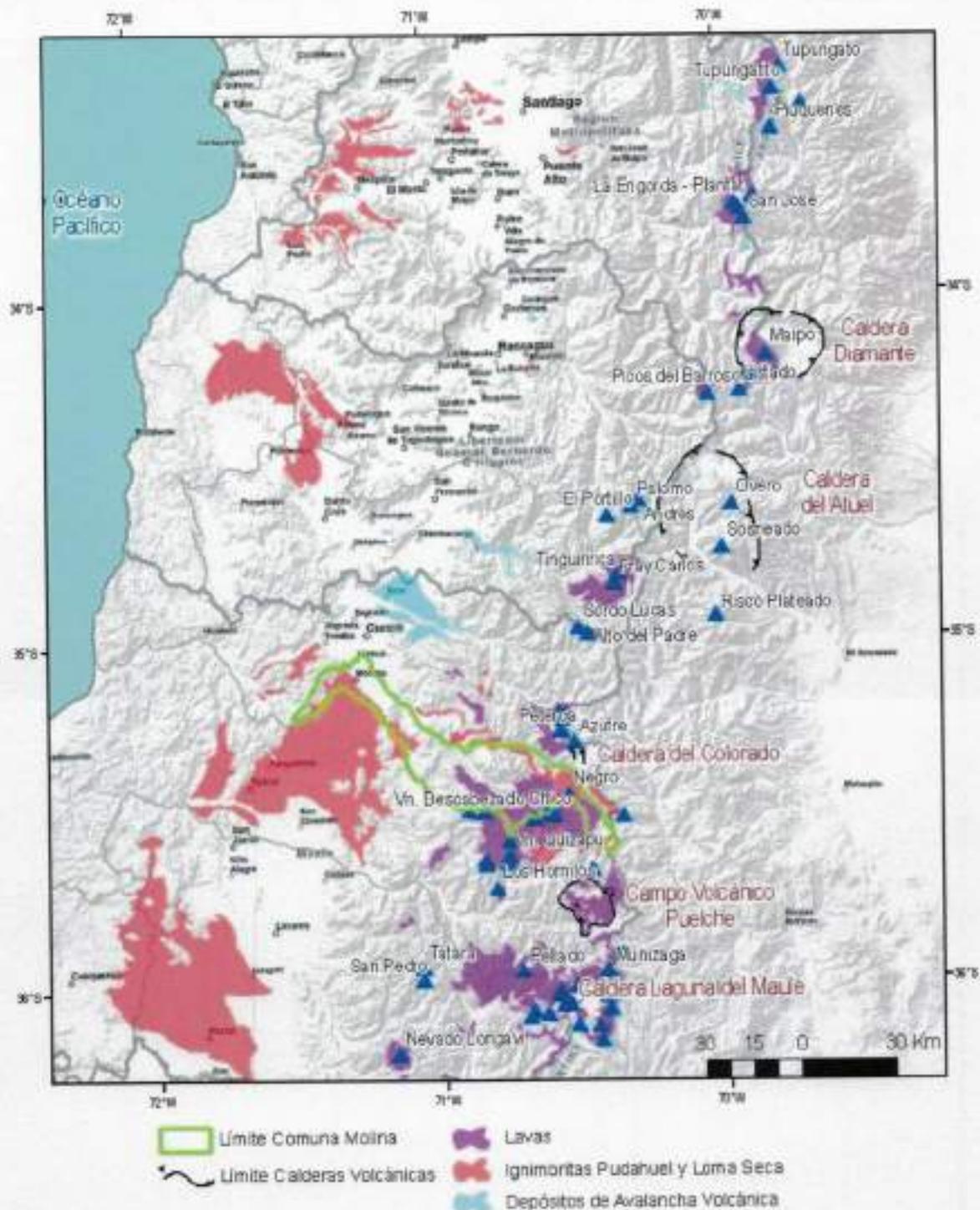
CUADRO Nº 4-2 Principales volcanes en sectores cercanos al área de estudio

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	47 (1822 - 1941)	Lavas, Domos
Tinguiririca	34° 49' S 70° 21' O	4.300	15		1 (1917)	
Planchón – Peteroa – Azufre	33° 15' S 70° 57' O	4.090	61	Pleistoceno – Holoceno	17 (1660 - 1991)	Lavas, Avalanchas y Fumarolas
Descabezado Grande – Azul – Quizapu	35° 35' S 70° 45' O	3.953	50	Pleistoceno – Holoceno	15 (1846 - 1980)	Lavas – Cenizas Fumarolas
Volcanes asociados a la Caldera del MAULE	36°05' S 70°30' O	4.020	-	Pleistoceno	-	-
Chillán	36°51'85" S 71°22'36" O	3.069	-	Pleistoceno – Holoceno	8 (1738 - 1945)	Erupciones explosivas.

Fuente: Sruga (2002) y Petit-Breuilh Sepúlveda (2003)

Al Norte del área de estudio, destacan los volcanes Planchón, Peteroa y Azufre, de los cuales el más activo corresponde al Peteroa, que muestra actividades desde 1.660 hasta la actualidad. Destacan la erupción de 1.762, donde ocurrieron violentas erupciones, el Colapso del Peteroa, flujos de detritos, lahares y lluvia de tefra. La crónica de la época relata que al colapsar el Peteroa, "el estrépito fue horrible, que se sintió en una gran parte del reino.... Las cenizas y lavas rellenaron todos los valles inmediatos, y aumentaron por dos días las aguas del Teno, y precipitándose un pedazo de monte sobre el Gran río Teno. Suspendió su corriente por espacio de diez días y estancadas las aguas, después de haber formado una dilatada laguna que existió durante unos días, se abrió por último con violencia un nuevo camino e inundó todos aquellos campos" (Urrutia y Lanza, 1993).

FIGURA N° 4-14 Principales centros volcánicos y depósitos volcánicos entre los 33° S y 36° S



Fuente: Elaboración propia a partir de González-Ferrán (1996), SERNAGEOMIN (2002) y Eyquem (2009)

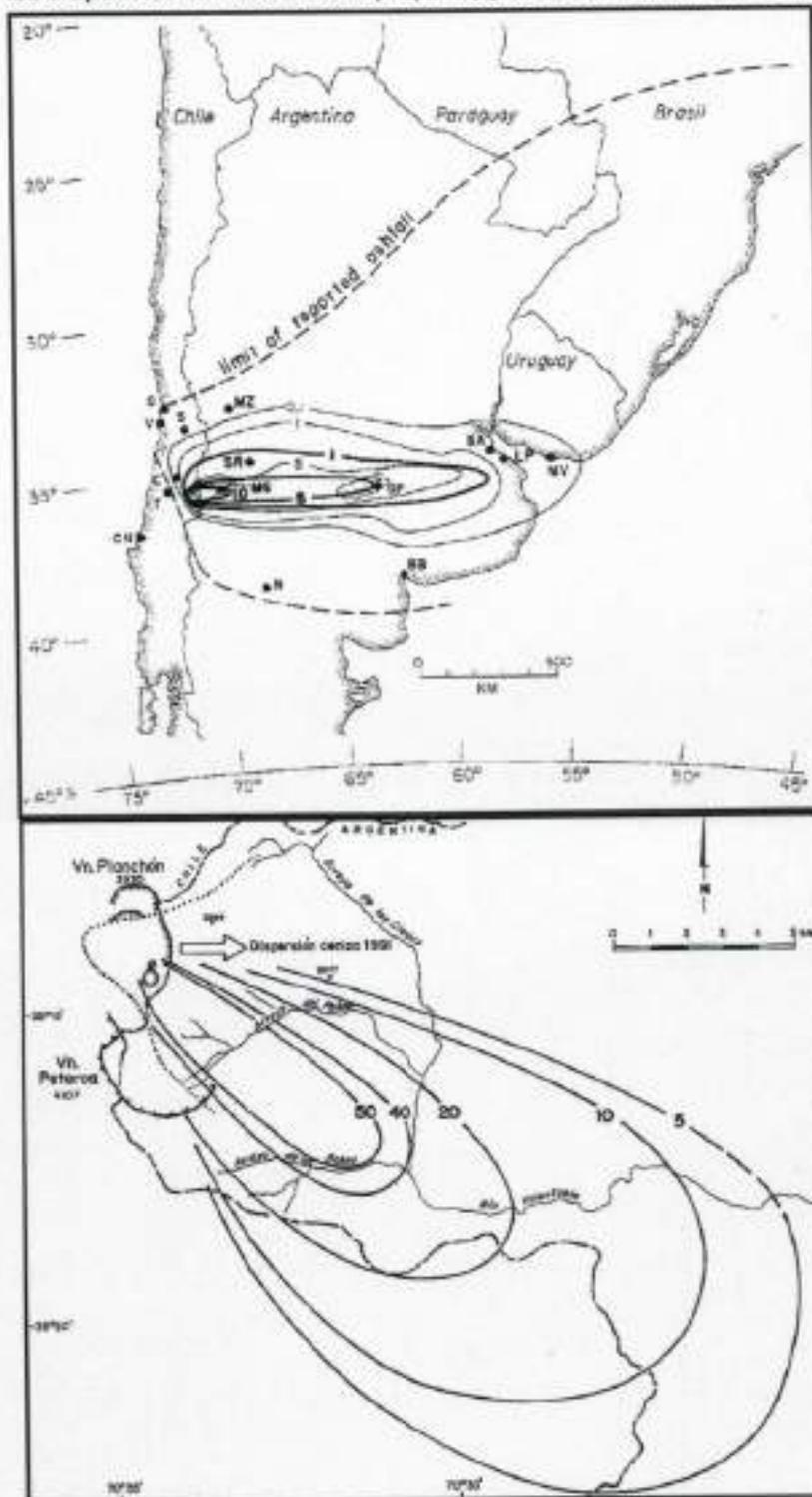
Las erupciones posteriores del complejo Planchón - Petera (1.835, 1.837, 1.869, 1.878, 1.894, 1.937, 1.959, 1.960, 1.962, 1.967, 1.985, 1.986, 1.987, 1.991), han sido de carácter explosivo, generación de lahares, con columna de tefra, caída de cenizas en la depresión Central y Argentina, sugieren que el volcán Petera es muy activo, y que el mayor peligro se concentra en la generación de lahares, que dada la configuración de la red hidrográfica, se movilizan aguas abajo hacia la depresión central, por los ríos Teno y Claro de acuerdo a lo expuesto por González-Ferrán (1995).

En la parte oriental del área de estudio, el principal agente de peligro volcánico es el cordón de los Descabezados - Azul - Quizapu. El volcán Descabezado Grande ha mostrado fumarolas, sismos y violentas erupciones de cráteres parásitos. Destaca la erupción del 2 de junio de 1932, que generó una columna de tefra de 7 a 8 Km. de altura, con cenizas que alcanzaron la Depresión Central. El volcán Quizapu, ha presentado varias erupciones históricas, donde destacan la erupción de 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 Quizapu es una de las más explosivas reportadas en Chile Central. Se inició a las 8:00 hrs del 10 de Abril de ese año, con fuertes explosiones y una gran columna de tefra de hasta 30 Km. de altura que fue visible desde la depresión Central hasta Malargüe en Argentina. Las explosiones fueron perceptibles desde Valparaíso a Concepción según la crónica de la época. La caída de ceniza (FIGURA N° 4-15) alcanzó desde Santiago a Buenos Aires el 11 de abril, reportándose que alcanzó la Ciudad del Cabo el 21 del mismo mes. El volumen de Ceniza arrojado a la atmósfera fue calculado en 25 Km³ de material riodacítico, y hasta el día de hoy hay miles de hectáreas cubiertas por tefra y ceniza en las provincias de Talca, Curicó y la pampa Argentina, donde fallecieron miles de vacunos y caprinos, además de la fauna silvestre, junto con la pérdida de hectáreas cultivables (González-Ferrán, 1995).

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

En la FIGURA N° 4 14 se observa que las áreas urbanas de la Comuna de Molina se encuentran sobre ignimbritas y coladas de lava recientes, como lo es el caso de Itahue y Radal. En el registro geológico se reconocen las Ignimbritas Pudahuel de 440 ka (Stern et al., 1984) asociadas a la Caldera Diamante y las "Ceniza de Loma Seca". Las "Cenizas Loma Seca" afloran en gran parte de la Depresión Central (ver Mapa Geológico de Itahue, FIGURA N° 3-10). Este depósito en realidad corresponde a tres grandes flujos piroclásticos de 800.000, 300.000 y 150.000 mil años de antigüedad (Sruoga, 2002), asociados al colapso de esta caldera volcánica, los que generaron depósitos de decenas de metros en gran parte de la Depresión Central al Sur de Curicó. Este tipo de erupciones explosivas generan flujos piroclásticos que poseen altas velocidades y alcanzan grandes distancias.

FIGURA N° 4-15 Mapas de isópacas que indican el espesor de ceniza acumulada en centímetros para las erupciones del volcán Quizapú (1932) y el volcán Planchón (1991)[‡]



Fuente: Hidreth y Drake (1992); Naranjo et al. (1999)

‡ BA Buenos Aires; BB Bahía Blanca; C Curicó; CN Concepción; GP General Pico; LP La Plata; MG Mar del Plata; MV Montevideo; MZ Mendoza; N Neuquén; Q Quintero; S Santiago; SR San Rafael; T Talca; V Valparaíso

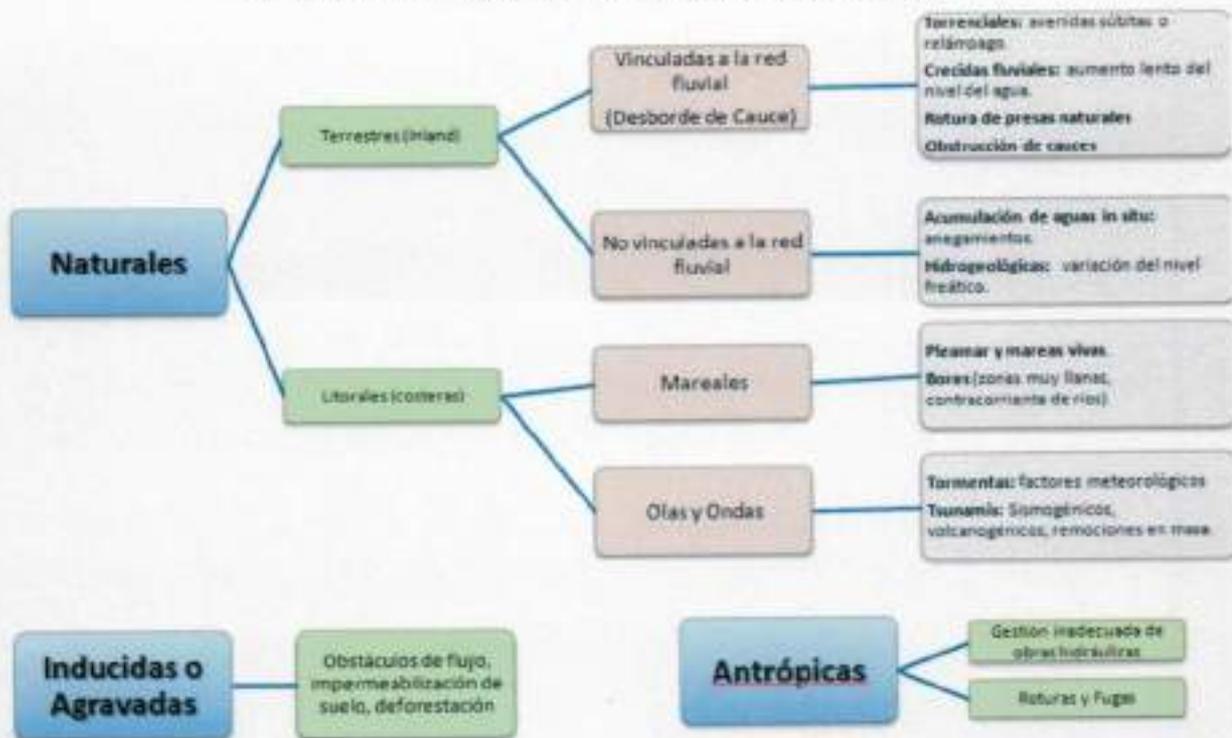
4.3 Procesos Exógenos o Externos de la Tierra - INUNDACIONES

4.3.1 Descripción del Peligro Geológico

Las inundaciones, sin considerar aquellas generadas por causas antrópicas, pueden ser de dos tipos (FIGURA N° 4-16): (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° 4-16 Clasificación de los tipos de inundaciones



Fuente: Modificado de Díez-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 el invierno concentrándose entre el 70% y 75% de la precipitación anual entre los meses de mayo y agosto. El tipo de precipitación es de origen frontal. La estación seca ocurre entre los meses de octubre y marzo período en el que caen menos de 40 milímetros de aguas lluvia por mes.

El peligro reconocido de inundaciones fue determinado principalmente a partir de las características hidrográficas de la zona, identificación de los cauces fluviales activos, áreas de drenaje aportantes a las quebradas, llanura de inundación y terrazas de los cursos fluviales principales. Además, personal de la Dirección de Obras de la Municipalidad de Molina informó cuáles son los sectores que más frecuentemente se ven afectados por inundaciones por **desborde de cauces** (FIGURA Nº 4-17). En el caso del área urbana de Molina el canal Cerrillano corresponde a un afluente del río Lontué que fue canalizado. Por lo tanto, en épocas de altas precipitaciones el canal se desborda principalmente en el sector sur donde la profundidad del canal es menor y no posee un muro.

En el área urbana de Lontué el río Pírlhuín y el estero Seco cruzan la ciudad de sur a norte y son brazos del río Lontué. Debido a esto, en eventos de grandes lluvias se han producido inundaciones por desborde de cauce de ambos cursos fluviales. En los años de lluvias extraordinarias, el río al norte de la localidad de Lontué ha sobrepasado las compuertas de entrada a los esteros, produciendo inundaciones por desborde de cauce en el sector de Entre Ríos hasta Casablanca. El paso bajo nivel del ferrocarril en la Avenida 7 de Abril, tiene una profundidad de 2,5 metros y se inunda todos los inviernos.

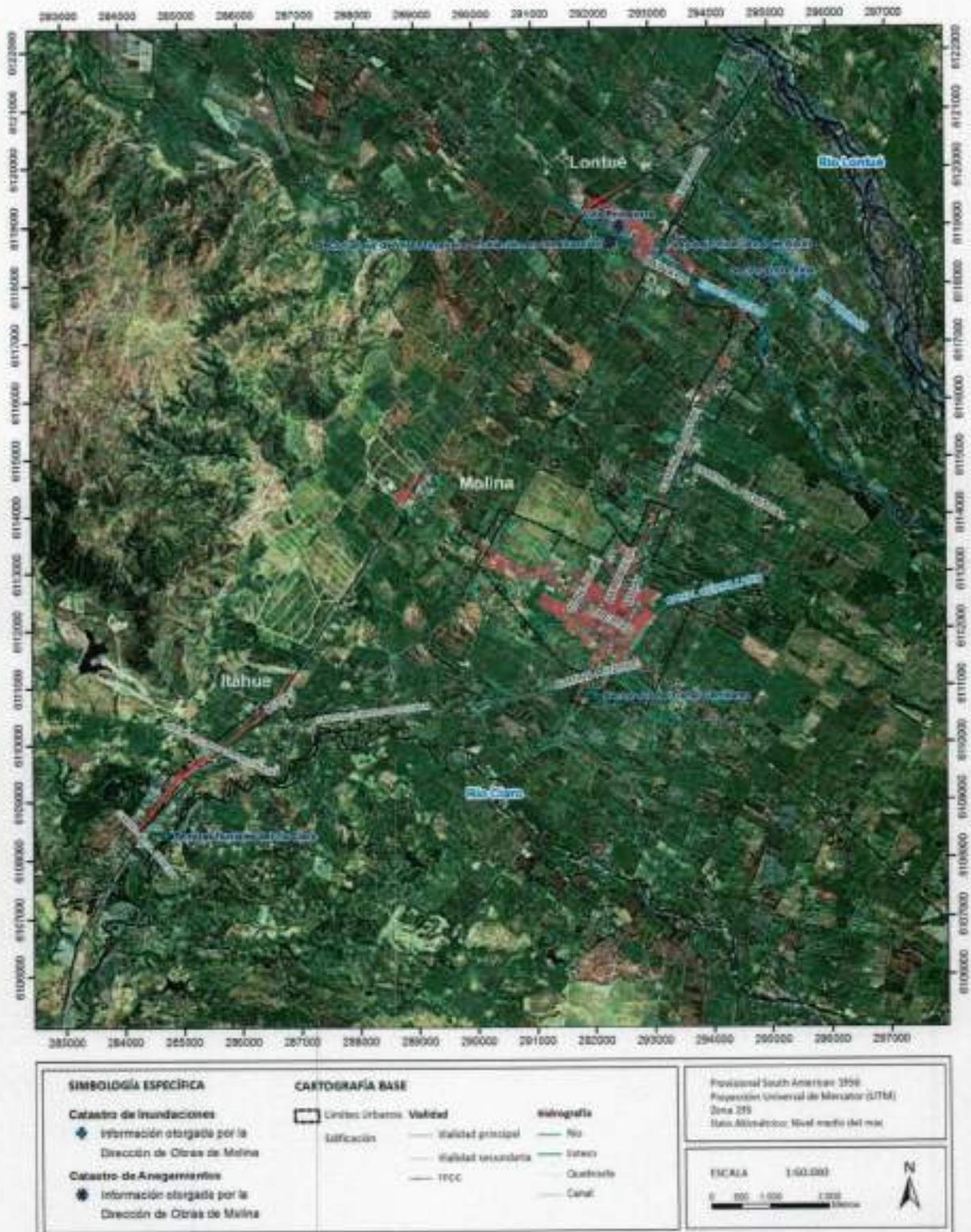
Otro fenómeno que afectó al área de estudio en la localidad de Lontué, fue un aluvión (flujo de detritos) ocurrido en el año 1986, el cual se movilizó bajando por el valle del río Lontué, afectando los sectores de Lontué y Pichingal.

En el área urbana de Itahue, el río Claro generalmente inunda la terraza inferior todos los años en los periodos de lluvias invernales (FIGURA N° 4-17). En casos de lluvias extremas, o periodos de 4 o 5 años, el río llega a inundar la terraza intermedia. Para el sector de Radal, se indicó que al noreste del área urbana en la confluencia del estero Campo y el estero El Toro, el río inunda cada 2 o 3 años la terraza fluvial. En el año 2009, las precipitaciones aumentaron el caudal de los esteros significativamente, arrastrando el puente que cruza el estero El Toro antes de la confluencia con el estero Campo.

Los sectores con en los cuales se producen inundaciones por **anegamiento** son principalmente en Lontué (FIGURA N° 4-17). El sector de Villa Primavera es un área más baja, el terreno es arcilloso y la napa freática se encuentra a 1 metro o menos de profundidad por lo tanto se inunda frecuentemente. Al sur de Villa Primavera (al sur del estero Seco) se está construyendo actualmente una población para la cual se han rellenado los terrenos bajos que se anegan durante el invierno y el agua de la napa freática en este sector también se encuentra a 1 metro de profundidad o menos.

Se realizó una recopilación de datos históricos sobre las inundaciones y flujos de barro o "aluviones" (CUADRO N° 4 3) para complementar la información entregada por la Dirección de Obras de la Comuna de Molina. El estudio Prisma Ingeniería (2003) presenta datos más específicos de las inundaciones entre 1953 y 2000 (CUADRO N° 4 4) y los sectores reconocidos como críticos en la Comuna de Molina (CUADRO N° 4 5).

FIGURA N° 4-17 Catastro de inundaciones informado por la Dirección de Obras de la Comuna de Molina



Fuente: Elaboración propia

CUADRO N° 4-3 Catastro histórico de eventos pluviométricos extremos que causaron inundaciones en la Comuna de Molina

Fecha	Título	Contenido	Fuente
Junio, 1878	Temporales de 1878	Río Lontué se desbordó arrastrando el puente ferroviario	Urrutia y Lanza (1993)
Mayo, 1934	Temporales de 1934	Naomiento, Nancagua, Lontué, los sectores vecinos a Curicó, a San Fernando y a Talca sufrieron serios daños, tanto por las inundaciones en los poblados, como en los terrenos agrícolas y en el ganado	Urrutia y Lanza (1993)
Mayo 30, 1953	Se conocen ya graves proyecciones del temporal que afectó a las provincias de la Zona Central	Grandes pérdidas provocaron desbordes de los ríos Teno, Lontué y Mataquito, originando deterioros y pérdidas de caminos, pérdidas de semillas, siembras y terreno de cultivo	El Mercurio de Santiago*
Agosto 21, 1953	Continúa causando perjuicios el temporal de lluvia que afecta a la Zona Central y el extremo sur del País	Crecida de los ríos Teno, Lontué y Mataquito provocan: corte de caminos, arrastre en su cauce de gran cantidad de árboles, muerte de animales y daños en viviendas	El Mercurio de Santiago*
Agosto 22, 1953	11 muertos, varios heridos y decenas millones de pérdidas causa temporal	El río Lontué se llevó los sostenes de una turbina eléctrica	La Prensa de Curicó*
Agosto 31, 1979	Ríos Curicanos se ensañaron con los terrenos agrícolas	Crecidas de ríos Lontué, Teno y Mataquito provocan pérdidas cuantiosas al inundar terrenos agrícolas cercanos a sus riberas, afectados pequeños y grandes agricultores de las comunas de Teno, Molina, Sagrada Familia, Hualahé, Licantén y en especial la de Rauco	La Prensa de Curicó*
Junio 18, 1986	Destrucción y muerte deja el temporal	Cuantiosos daños provocan los desbordes de los ríos: Teno, Lontué y Mataquito, se registran 6 víctimas fatales, más de 3.000 damnificados, puentes y passerolas destruidas, y corte de caminos. Las zonas más afectadas son Entre Ríos, Casablanca, Lontué, La Higuera, Barandica y especialmente Licantén	La Prensa de Curicó*
Junio 18, 1986	Cerca de 4 mil son los damnificados en la Región	Informe de Jefe Regional de Emergencia, da a conocer los daños y número de damnificados ocasionados por el temporal que azotó la región del Maule. Se contabilizaron 4 puentes destruidos, siendo estos: Puente Peor es Nada de la comuna de Teno, Puente Seco en Lontué, y puentes sobre el río Teno y Guaquillo. En Sagrada Familia entre Lontué y Villa Prat, sector Tonleru, el camino fue destruido	El Mercurio de Santiago*
Junio 18, 1986	La situación de emergencia en la Región del Maule	Dirección de Vialidad presenta estados general de los puentes, entre estos presentan daños los puentes: Teno, Guaquillo, Seco y Pitihuin. Además se informa que está cortado el suministro de agua potable en Lontué (por daños en su infraestructura), Iloca (por corte de electricidad) y Los Quenes, este último sin energía eléctrica	La Mañana de Talca*
Junio 21, 1986	Lontué sufrió Terremoto de agua, viento y todo*	Localidad de Lontué presenta graves daños, después de la gran inundación que sufrira	La Mañana de Talca*

PLAN REGULADOR COMUNAL DE MOLINA

Fecha	Título	Contenido	Fuente
Junio 22, 1986	Tranquilidad ante la reapertura de caminos y recapitación de ayuda	En decreto que declara en estado de catástrofe la región del Maule, están consideradas las comunas de Molina, Licantén, Curicó y Sagrada Familia. Daños son imposibles de evaluar aún. Los sectores más afectados son Lontué y Licantén	La Mañana de Talca*
Julio 15, 1987	Defensas fluviales	Río Lontué rompe defensas fluviales en el sector de Buena Paz. 150 m de defensas fluviales fueron arrasadas por el río	El Mercurio de Santiago*
Junio 11, 1991	Nuevas inundaciones sufrió Lontué por desborde de río	Desbordó del río Lontué a la altura de Las Veinitricio, deja a 750 damnificados	La Prensa de Curicó*
Julio 4, 1991	Zona de Emergencia	Plan de emergencia del M.O.P. para enfrentar las inundaciones y desbordos de ríos, principalmente las ocurridas en la VII región. Se estiman en más de 200 millones los aportes necesarios para reparar defensas fluviales en los ríos Teno y Lontué	El Mercurio de Santiago*
Mayo 19, 1992	Peligro en Lontué	Diputado Sergio Correa denunció que la extracción de áridos en las riberas del río Lontué amenazan las inversiones realizadas en defensas fluviales, evaluadas en más de 100 millones	La Prensa de Curicó*
Mayo 26, 1992	Serios problemas provoca temporal en la zona	Graves problemas de anegamientos e inundaciones se registraron en sectores poblacionales de Curicó y localidades rurales. En la comuna de Molina no se han presentado problemas debido a los trabajos realizados con anterioridad. En el sector de Las Veinitricio el río Lontué no presenta peligro para la población	La Prensa de Curicó*
Mayo 30, 1992	Río Lontué abrió brechas en Buena Paz	Director de Obras de la Municipalidad de Molina, constató en terreno los daños que ocasionó el río Lontué, detectando estragos en el sector agrícola Buena Paz y daños en las bocatomas de los canales Purísima, Nueva Urzúa Pelarco y Patagua, todos ellos con nacimiento en la Puntilla de San Luis	La Prensa de Curicó*
Junio 2, 1992	Nuevos daños provocó desborde del río Lontué	Aguas del río Lontué provocaron daños en los sectores ribereños desde Santa Sofía hasta la puntilla de San Luis, Buena Paz. Los daños resultantes son 20 hectáreas de terreno agrícola más la destrucción de un bosque	La Prensa de Curicó*
Mayo 7, 1993	Yacal, El Durazno y Las Azules aislados por Molina	Debido al desborde del río Lontué por La Puntilla San Luis, han quedado aislados por Molina, los sectores El Yacal, Alupenhue, El Durazno y Las Azules	La Prensa de Curicó*

Fecha	Título	Contenido	Fuente
Mayo 26, 1993	Crecidas del Lontué provocó daños	Crecida del río Lontué, provocó daños en bocatomas e inundó terrenos agrícolas del sector La Puntilla de San Luis, entre Purísima y Valdés Carrera. También afectó al camino público, dejándolo bajo el agua en varios sectores	La Prensa de Curicó*
Junio 17, 1997	Río Lontué sin mayores problemas luego de crecida	Comité de emergencia municipal da a conocer que situación de emergencia de la comuna de Molina, se encuentra controlada, manteniéndose en alerta	La Prensa de Curicó*
Junio 24, 1997	Emergencia en Ocho regiones	Catastro nacional de daños resultantes del frente de mal tiempo, zona centro-sur. Temporal deja centenares de damnificados en la provincia de Curicó (Teno, Romeral, Curicó, Lontué y Rauco)	El Mercurio de Santiago*
Junio 23, 2000	Lluvias acarrearán serios problemas	Posibles desbordés de los ríos Teno y Lontué preocupan a autoridades	La Prensa de Curicó*
Junio 24, 2000	Se reactivó temporal de Coquimbo a Maule	5 ríos, entre los que se cuentan los ríos Teno y Lontué, alcanzaron niveles que los dejaron a punto de desbordarse en varios sectores, poniendo en riesgo a numerosos sectores urbanos	El Mercurio de Santiago*
Julio 2, 2000	Ríos marcaron récord con aumento de caudales	Ríos Teno, Mataquito y Lontué marcaron un récord histórico en sus caudales, a pesar de esto las defensas fluviales resistieron bien, evitando millonarias pérdidas e impidiendo una catástrofe como la de 1986	La Prensa de Curicó*
Septiembre 1, 2001	Cientos de hectáreas productivas se perdieron en la costa	Graves daños en terrenos agrícolas, provocó el último temporal en diversas comunas de la región, entre las que se encuentran Romeral, Teno, Molina, Sagrada Familia, Curicó, Rauco, Hualafie, Licantén, Vichuquén y Curepto	La Prensa de Curicó*
Agosto 8, 2002	Afectados, damnificados y albergados provocan lluvias	Compleja situación se vive en la provincia de Curicó debido a los problemas originados por las lluvias (crecida de los ríos Teno, Lontué y Mataquito, salida de canales y anegamientos en diversas localidades). Los tres ríos ya se habían desbordado en Rincón de Sarmiento, Las Veinticinco y Licantén, respectivamente	La Prensa de Curicó*
Agosto 8, 2002	Río Lontué amenaza con desbordés	Río Lontué amenaza con desbordar en el sector de las Veinticinco y en la bocatoma del canal Patagua. Alcaldesa M. Segura, conjuntamente con la junta de vigilancia, solicitaron a las autoridades del nivel central la ejecución de trabajos de reforzamiento de la ribera izquierda del río	La Prensa de Curicó*

Fecha	Título	Contenido	Fuente
Agosto 25, 2002	Continúa alerta en la provincia	Informe de temporal de viento y lluvia que afecta a la provincia de Curicó, da a conocer que la situación amerita a continuar en estado de alerta y además que se estaban tomando todas las medidas de rigor para evitar, dentro de lo posible situaciones de emergencia. Se da a conocer, que el sector Las Veinticinco es donde se tiene la situación más compleja, en términos de poblados	La Prensa de Curicó*
Agosto 25, 2002	Mal tiempo vuelve a causar problemas en la región	Crecidas en el caudal de los ríos Lontué y Teno han vuelto a ocasionar problemas en la provincia de Curicó. Los puntos que presentan la mayor cantidad de problemas se encuentran en la localidad de Tutuquén Bajo, sector Las Veinticinco y Las Palaguas en la comuna de Molina. En informe de la Dirección Regional de Emergencia, se da a conocer que las comunas más afectadas por el frente de mal tiempo son: Romeral, Vichuquén, Curicó, Molina, Cauquenes y Pelluhue. Además informa que el número de damnificados son 124	La Prensa de Curicó*
Agosto 25, 2002	Temporal azota a 5 regiones	Frente de mal tiempo en zona centro sur deja daños variados. En la séptima región, los ríos Teno y Lontué alcanzaron sus cotas máximas	El Mercurio de Santiago*
Mayo 22, 2008	Autoridades en alerta por crecida del Río Maule y peligro de desborde	Aumento del caudal del Río Lontué tiene en alerta a las autoridades y a los bomberos de las comunas de Curicó, Molina y Lontué por eventuales inundaciones de sectores poblados. Personal municipal ha comenzado a evacuar a algunos pobladores cercanos al río, cuyo caudal aumentó alimentado por la crecida del Estero Seco	www.terra.cl
Mayo 23, 2008	Alcalde de Molina estima en mil las familias damnificadas en Lontué	"Tuvinos el desborde del río Lontué a través de los canales de toda nuestra comuna y ha generado un problema tremendo que no ocurría desde el año 1965 en que se ha vuelto a inundar el pueblo". Varios caminos cortados	www.terra.cl
Mayo 23, 2008		Evaluación preventiva de habitantes de las localidades de Lontué y Licantén. En Lontué hay un contingente de 70 militares trabajando para contener una posible crecida del río del mismo nombre en el sector de Las Veinticinco. En los puentes que pasan sobre el Río Teno y el Lontué el agua estaría prácticamente en la carretera, por lo cual el llamado de las autoridades es a no transitar por esos sectores a no ser que sea extremadamente necesario	www.elamaule.cl

Fuente: Elaboración propia a partir de Prisma Ingeniería (2003), Unuía y Lanza (1963), www.terra.cl y www.elamaule.cl

* Artículos tomados de Prisma Ingeniería (2003)

CUADRO Nº 4-4 Catastro histórico de eventos pluviométricos extremos entre 1953 y 2000. Datos específicos sobre sectores afectados, damnificados y superficies afectadas

Fecha de Inundación	Río	Sectores Afectados	Numero de Damnificados	Superficie Afectada	Infraestructura Afectada	Institución	Reacciones Ciudadanas
Agosto, 1953	Lontué	Pichingal	Sin información	Sin Información	Torres de alta tensión	Sin información	Gerente de la Compañía Nacional de Fuerza Eléctrica, don Araldo Vogel, informa que habría pasado el peligro de la corta de suministro de energía eléctrica, motivado por el posible derrumbe de las torres.
Agosto, 1953	Lontué	Vista Hermosa	Sin información	Sin información	Puente en el camino longitudinal	M.O.P.	Sin información
Agosto, 1979	Teno, Lontué y Mataquito	Teno, Molina, El Manzano, Tutuquén Bajo, Majadillas, El corazón, Itahue, Sagrada Familia, Hualañé, Licanén y Rauco	Sin información	10 há (Mira Río)	Sin información	Privados (agrícolas)	El gobierno destina más de \$8 000.000 para financiar un estudio a fondo de la situación.
				27 há (sector de Rauco y alrededores)			
Junio, 1986	Mataquito, Teno y Lontué	Entre Ríos, Casablanca, Lontué, La Higuera, Barandica y Licanén	6 muertos y 3.000 damnificados	Sin información	Puente Teno, Guaquillo, El Lontué, El Pirihuin y El Seco, pasarelas, caminos inundados, poblados inundados, etc.	M.O.P. y Privados (viviendas)	Sin información
Junio, 1986	Lontué	Lontué	Sin Información	Sin información	Pueblo de Lontué, viviendas, carro bomba, puente estero Seco	Privados (vecinos del pueblo Licanén) y Públicos (bomberos)	Relato de vecinos de cómo aconteció inundación del pueblo de Lontué.
							Se constituye cuartel general de emergencia para afrontar la situación creada por el temporal.
Mayo, 1991	Lontué	Molina, Sagrada Familia, Trepiche Alto y Bajo	190 damnificados (20)	Sin información	Casas del sector, puente La Palma	M.O.P. Particulares (vecinos del	Gobernación de Curicó informa sobre los daños. Alcalde Diego Castro P., una vez que la situación se normalice realizará una evaluación

Fecha de Inundación	Río	Sectores Afectados	Número de Damnificados	Superficie Afectada	Infraestructura Afectada	Institución	Reacciones Ciudadanas
Junio, 1991	Lontué	Las Veinticinco, Trapiche Bajo y Santa Agnana	Molina y 170 en Sagrada Familia) 750 personas	Sin Información	Terreno agrícolas y camino de Trapiche Bajo	Particulares (vecinos del sector)	conjuntamente con las autoridades del M.O.P. con el fin de determinar los trabajos de defensas fluviales que se deban hacer en el futuro La SEREMI, Sra. Carmen Vial, luego de reconocer los sectores afectados por la inundación del río Lontué, manifestó que enviaría un informe detallado al Intendente y a los ministerios a nivel central sobre la situación
Junio, 1992	Lontué	Santa Sofia, Entre Rios hasta la Puntilla de San Luis	Sin Información	20 há	Bocatomas: en la Puntilla de San Luis, Purisima, Buena Fe, Pelarco y Nuevo Urzúa	Privados M.O.P.	El celador Luis Duque de Buena Paz, dio a conocer que "existe una aprobación de recursos a través del subsidio de riego para realizar trabajos y confeccionar una sola bocatoma para todos los canalistas y luego una distribución de las aguas con la construcción de marcos, lo que será posible una vez que se confeccionen las defensas apropiadas en Buena Paz"
Mayo, 1993	Lontué	El Yacal, Alupenhue, El Durazno, Las Azules (Puntilla de San Luis en Buena Paz)	Sin Información	Sin Información	Caminos del sector, bocatomas: La Puntilla de San Luis entre Purisima y Valdes Carrera	M.O.P.	Alcalde de Molina, Sr. Carlos Acuña A., enviará informes sobre problemas de inundación por desborde del río Lontué, a la altura de la Puntilla de San Luis en Buena Paz, lo que acontece todos los años, con el fin de conseguir recursos suficientes para reparar en forma integral el desborde del río Lontué
Junio, 1997	Lontué	Lontué y Molina	Sin información	Sin información	Viviendas inundadas	Privados	Alcaldesa de Molina dirigió las faenas de rescate junto a personal de la municipalidad.
Junio, 2000	Lontué	Las Veinticinco	Sin Información	Sin Información	Defensas fluviales	M.O.P.	Junta de Vigilancia del río Lontué informa sobre los daños.

Fuente: Prisma Ingeniería (2003)

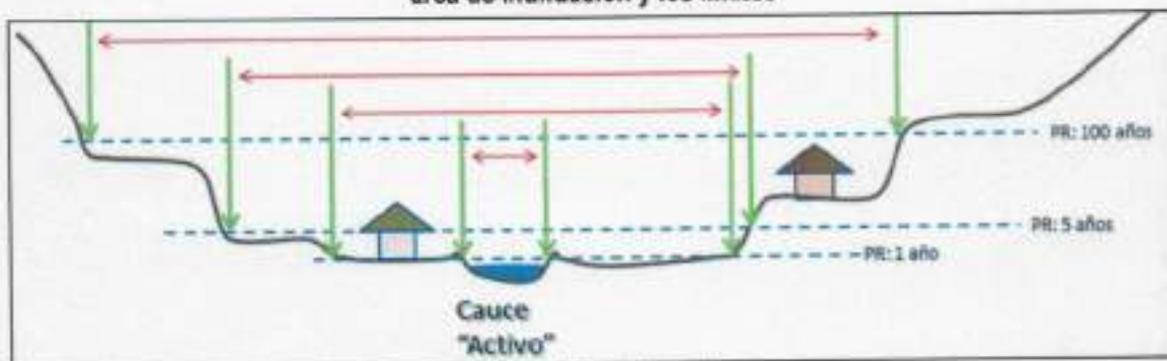
CUADRO Nº 4-5 Sectores críticos afectados por inundaciones en la Comuna de Molina

Sector	Kilómetro Inicial	Kilómetro Final	Daños
Pirihuin	14,2	18	Desbordes del río en las crecidas de los años 1986, 2000 y 2002. El área afectada es de 41,2 ha. Daños cercos, viviendas, caminos y vía férrea
Entre Ríos	18	25,45	Desbordes del río en las crecidas de los años 1986 y 2002. El área afectada es de 182,2 ha. Daños en caminos, galpones, viviendas y Escuela G-20
Las Veinticinco, Pichingal y Buena Paz	25,45	35,7	Desbordes del río en las crecidas de los años 1986, 1990, 1995, 2001 y 2002. El área afectada es de 239 ha. Daños en caminos, cercos y viviendas

Fuente: Prisma Ingeniería (2003)

Un parámetro importante para el mapeo de las zonas susceptibles es el "periodo de retorno" o "intervalo de recurrencia", que es la probabilidad de ocurrencia de un evento de una magnitud dada en un periodo de tiempo. Por ejemplo, en la FIGURA Nº 4-18 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 periodo de retorno en años. Un periodo de retorno de un año significa que estadísticamente cada año se inundará ese sector, un periodo 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 periodo de retorno de 100 años, implica que deberían inundarse una vez cada 100 años (probabilidad 1/100 o 1% anual).

FIGURA Nº 4-18 Áreas de Inundación y Periodo 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° 4-19). El movimiento de estos materiales puede ser por caída, volcamiento, deslizamiento, propagación lateral o flujo (PMA: GCA, 2007).

4.4.1.1 Desprendimientos o Calda de Rocas

Los desprendimientos o calda 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.

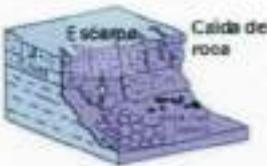
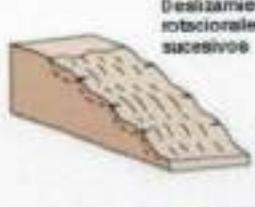
La gravedad es el principal motor del peligro de caída de rocas. Como éste es un proceso gravitacional depende de leyes de fricción y es, por consiguiente, caótico. Dentro de los factores desencadenantes destacan los grandes sismos que pueden generar numerosos desprendimientos a partir de laderas con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

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

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

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

FIGURA Nº 4-19 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				
	VOLCAMIENTO			
DESPLAZAMIENTO	Rotacional			
	Traslacional (planar)			
PROPAGACION				
FLUJO				
COMPLEJO				

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

4.4.1.2 Deslizamientos

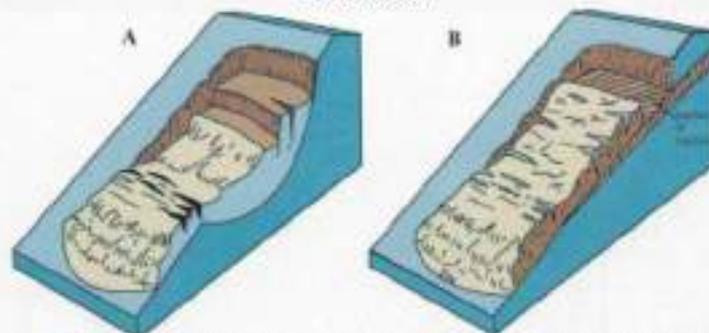
Los deslizamientos son remociones en masa en las cuales las masas de suelo o roca se deslizan principalmente a lo largo de superficies de ruptura, al superarse la resistencia al corte, generando el movimiento del material en su conjunto (Hauser, 2000). Los volúmenes incluidos en estas remociones varían 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° 4-20). 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° 4-20 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 o gatillantes, tales como eventos hidrometeorológicos, sísmicos y actividad antrópica (excavaciones para caminos, canales, terraplenes, etc.).

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

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 instalado pluviómetros 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.

4.4.1 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. Se identificaron depósitos de este tipo en el área urbana de Radal (ver capítulo 3.3.2 "Depósitos No Consolidados") y en menor escala en Itahue. En Radal son generados por el colapso de las coladas de lava producto de la erosión fluvial. Algunos de estos depósitos no son de gran volumen, sin embargo otros, poseen alcances de hasta 120 metros. Tal es el caso del depósito generado durante el terremoto de febrero del 2010, el cual logró represar el río Claro, provocando inundaciones en el sector (FIGURA N° 4-21).

Existen depósitos antiguos, cuya fecha exacta de generación se desconoce, sin embargo se observan cubiertos de vegetación. El terremoto del 27 de Febrero del 2010 generó nuevos depósitos (FIGURA N° 4-21), y pequeños deslizamientos en depósitos antiguos, los cuales se diferencian pues carecen de vegetación (FIGURA N° 4-22). En el caso de Itahue, las remociones en masa que se reconocieron corresponden a colapsos de las terrazas fluviales del río Claro. Por erosión del río de los depósitos de la Toba Loma Seca se produce el retroceso de las laderas, generando caídas de bloques hacia el río y su llanura de inundación (FIGURA N° 4-23).

FIGURA Nº 4-21 Depósito de remoción en masa ocurrido durante el terremoto del 27 de febrero 2010 en la localidad de Radal. La línea segmentada muestra el alcance del depósito, que represó el río Claro



Fuente: Elaboración propia

FIGURA Nº 4-22 Remoción en masa antigua en la localidad de Radal, reactivada durante el terremoto del 27 de febrero del 2010



Fuente: Elaboración propia

FIGURA N° 4-23 Remoción en masa generada por retroceso de ladera en el río Claro, Itahue



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° 4, PLANO N° 5 y PLANO N° 6 fuera de texto).

5.1 Peligros No Zonificables

5.1.1 Peligro Sísmico

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

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, para la zona los datos sísmicos señalan la ocurrencia de estos sismos (FIGURA N° 4-12), por lo que no se puede descartar un evento de magnitud importante en el futuro.

5.1.2 Peligro Volcánico

Con el objetivo de definir las áreas susceptibles a ser afectadas de peligro volcánico durante el desarrollo del PRI de Talca se definieron 3 tipos de zonificación: Peligro Volcánico directo por erupción volcánica, zona de caída de cenizas, y sectores por donde se encauzarían lahares y flujos piroclásticos. Las áreas urbanas de la zona de estudio se encuentran a orillas de los ríos principales (Lontué y Claro), ya sea en la Depresión Central o más al Este dentro de la Cordillera. Al existir un arco volcánico activo a la latitud de la Comuna de Molina, que produce flujos volcánicos (piroclásticos y coladas de lava) que se encausan en los valles, se puede concluir que el área de estudio se encuentra en la zona de influencia directa de peligros volcánicos.

El área más afectada durante una erupción volcánica corresponde al radio de 20 kilómetros alrededor del cono volcánico, que se define como el área más expuesta a una erupción volcánica (FIGURA N° 5-1). En esta área pueden ocurrir deslizamientos asociados a la actividad sísmica, caída de bombas piroclásticas, además de caída de cenizas y tefra. Además, en este sector se puede generar el derretimiento de hielos, los que dan paso a lahares e inundaciones.

Por otro lado, se define una parábola para indicar el sector hacia donde se dispersarían principalmente las cenizas en función de los datos de erupciones 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 Quizapu en 1932), en cuyo caso el área más susceptible a ser afectada es Radal.

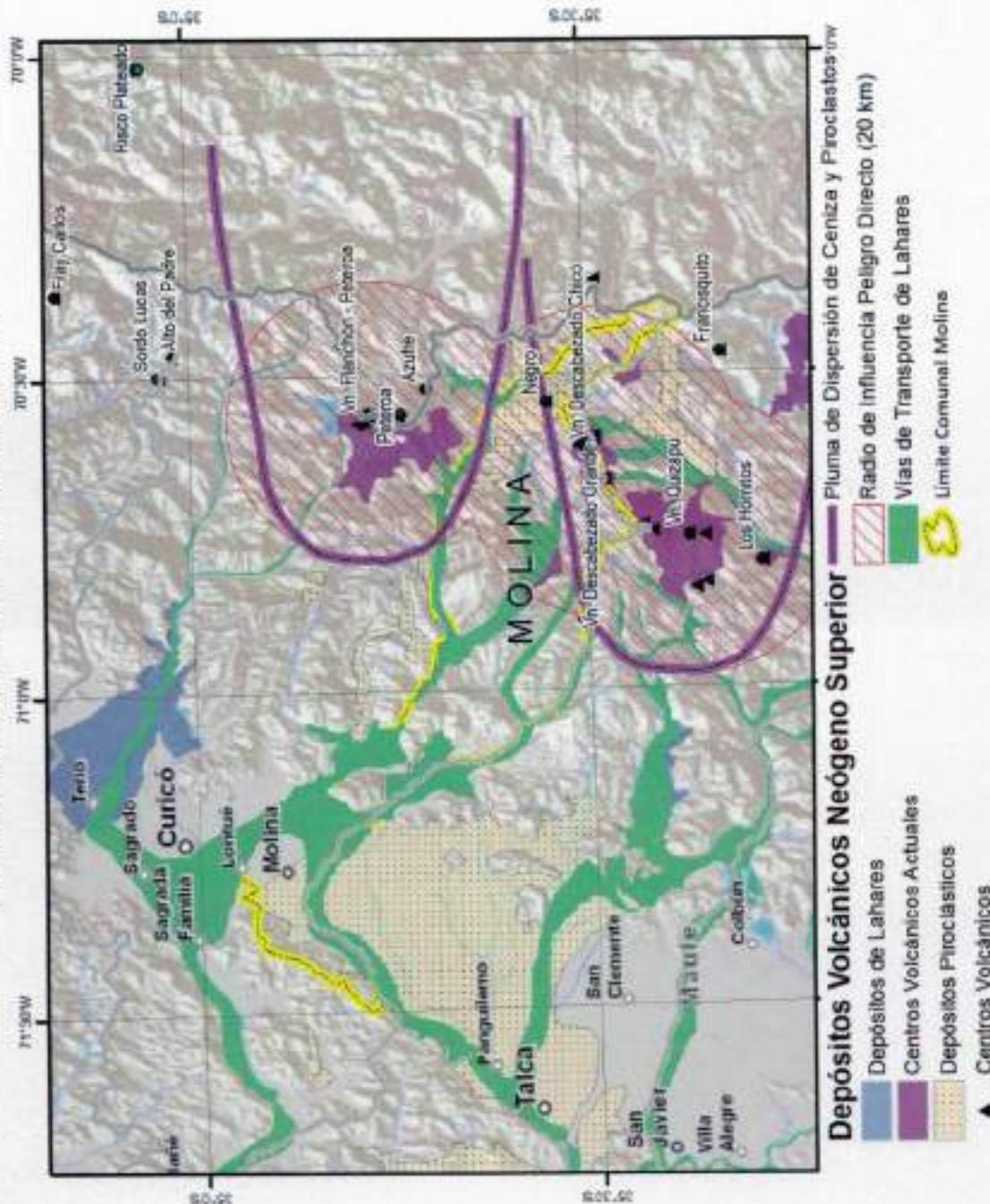
Finalmente, a modo ilustrativo, se definieron los cauces principales por donde pueden encauzarse los lahares y flujos piroclásticos. El alcance de estos estará dado por los siguientes factores:

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

Cabe destacar que los flujos piroclásticos y lahares son capaces de remontar el relieve, por lo que la zonificación planteada en la FIGURA N° 5-1 sólo demarca las vías de flujo preferencial y no considera la colmatación del cauce.

Dada la distancia de las zonas a los centros volcánicos activos se considera alta la probabilidad de que algún peligro volcánico afecte el área urbana de Radal, y moderada para las áreas de Itahue, Molina y Lontué. Debe tenerse en cuenta la presencia de los depósitos de cenizas volcánicas correspondientes a la Ceniza Loma Seca (sobre los cuales está construido el pueblo de Itahue), los cuales son producto de una gran erupción ocurrida cientos de miles de años atrás. Eventos de tal magnitud son de una recurrencia muy baja que se estima como poco probable que ocurra en el corto plazo, sin embargo son procesos extremadamente destructivos que no pueden dejar de ser considerados en planes de emergencia y evacuación. De la misma forma, no debe olvidarse que en la localidad de Radal existen numerosas coladas de lava, pues se encuentra rodeada de centros volcánicos (Descabezado Grande, Chico, Quizapu) que poseen actividad histórica.

FIGURA Nº 5-1 Mapa de distribución de Peligros Volcánicos



5.2 Peligros Zonificables

5.2.1 Peligro de Inundaciones

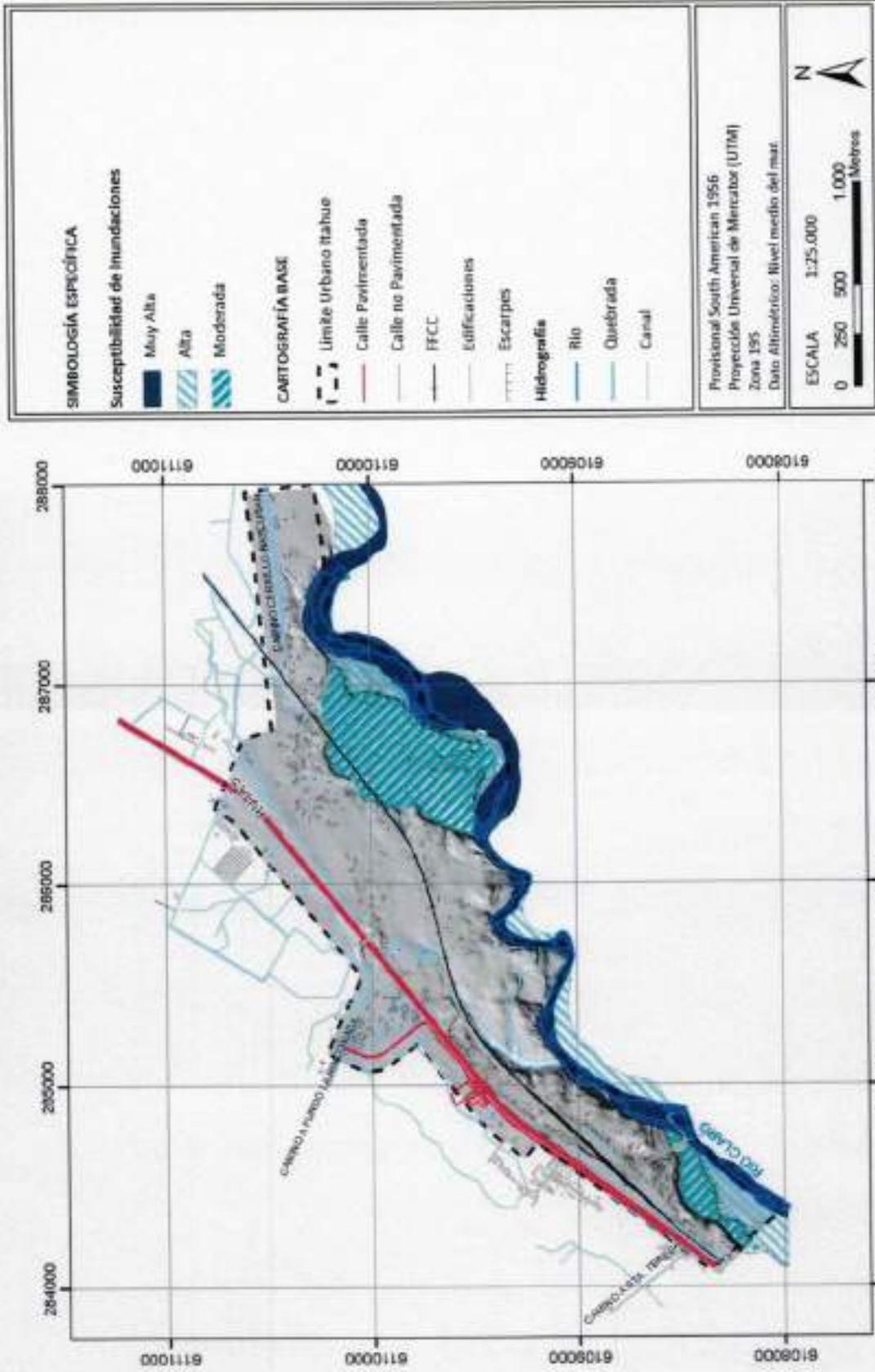
Las principales inundaciones que han afectado al área de estudio tienen relación con desbordamientos de cauces, ya sean naturales o artificiales, y generalmente se manifiestan con una frecuencia anual. A partir del análisis de fotografías aéreas e imágenes satelitales, el mapeo geológico y la información proporcionada por la Dirección de Obras de la Municipalidad, se determinó la siguiente zonificación de susceptibilidad (FIGURA N° 5-2, FIGURA N° 5-3 y FIGURA N° 5-4):

- **Zonas de Muy Alta Susceptibilidad** (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).
- **Zonas de Alta Susceptibilidad** (Inundación por Desborde de Cauces Naturales y Canales Artificiales): sectores de inundación por desborde de cauces naturales. Geológicamente corresponden al nivel de terraza inferior de los ríos Claro y Lontué, la llanura de inundación antigua del río Lontué y quebradas con cuencas de drenaje mayores a 2 km². En el caso de los canales artificiales, se define como las áreas ubicadas a menos de 15 m de los canales.
- **Zonas de Moderada Susceptibilidad** (Inundación por Desborde de Cauces Naturales): sectores de inundación por desborde de cauces naturales. Geológicamente corresponden al nivel de terraza intermedio y superior del río Claro y quebradas con cuencas de drenaje menores a 2 km².
- **Zonas de Muy Alta Susceptibilidad de Anegamiento**: áreas 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 personal de la Dirección de Obras de la Municipalidad informó que este tipo de fenómenos son uno de los problemas más frecuentes. Además, los canales artificiales generan suelos saturados en agua, los cuales presentan un mal comportamiento geotécnico generando mayores problemas en el caso de sismos.

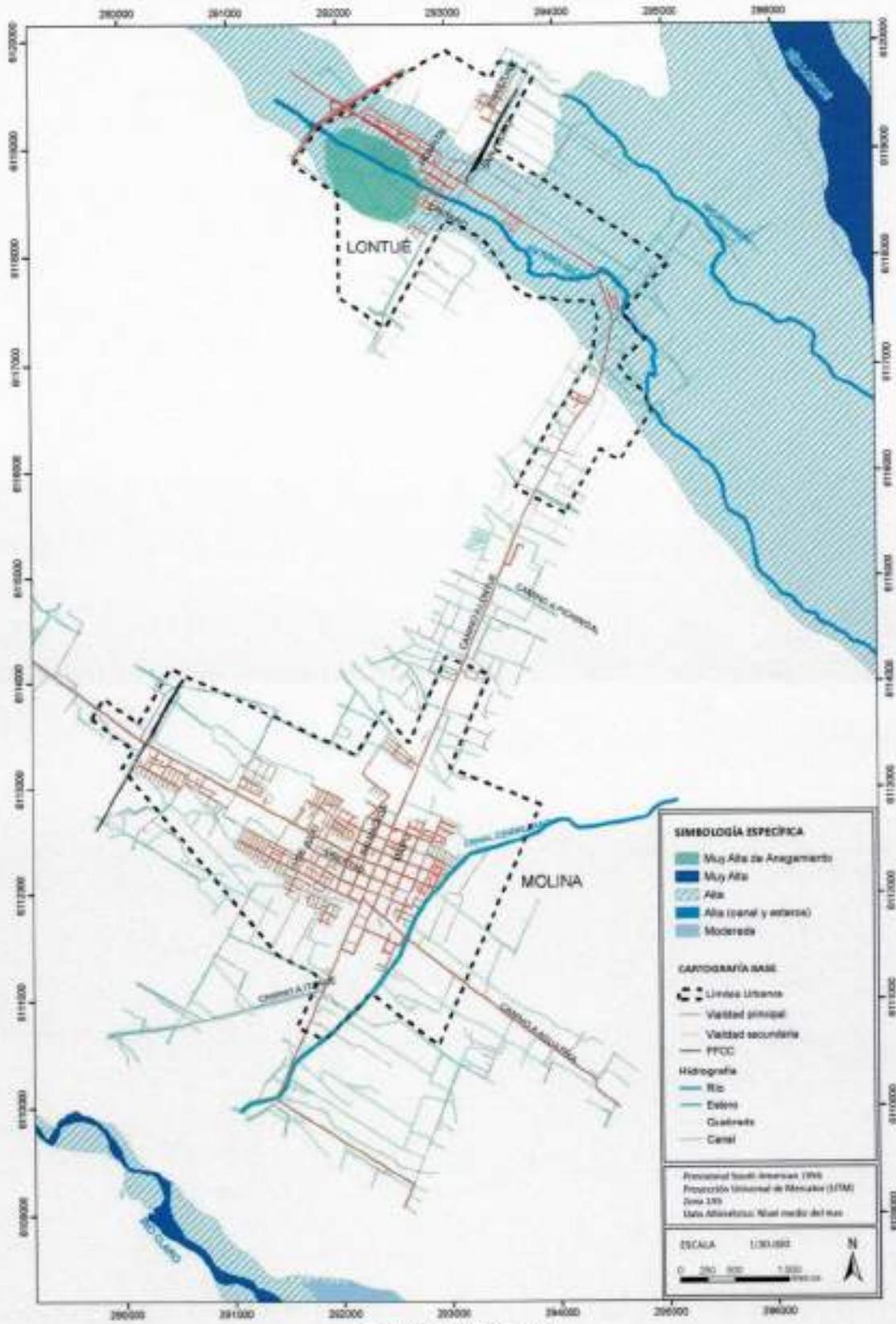
En este estudio no se realizaron modelos hidrológicos debido a la falta de series de precipitación y caudales. Por ello, no se realizaron mapas de peligrosidad o amenaza de inundaciones considerando el período de retorno y analizando el alcance máximo lateral del área de inundación sino que se tuvieron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

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



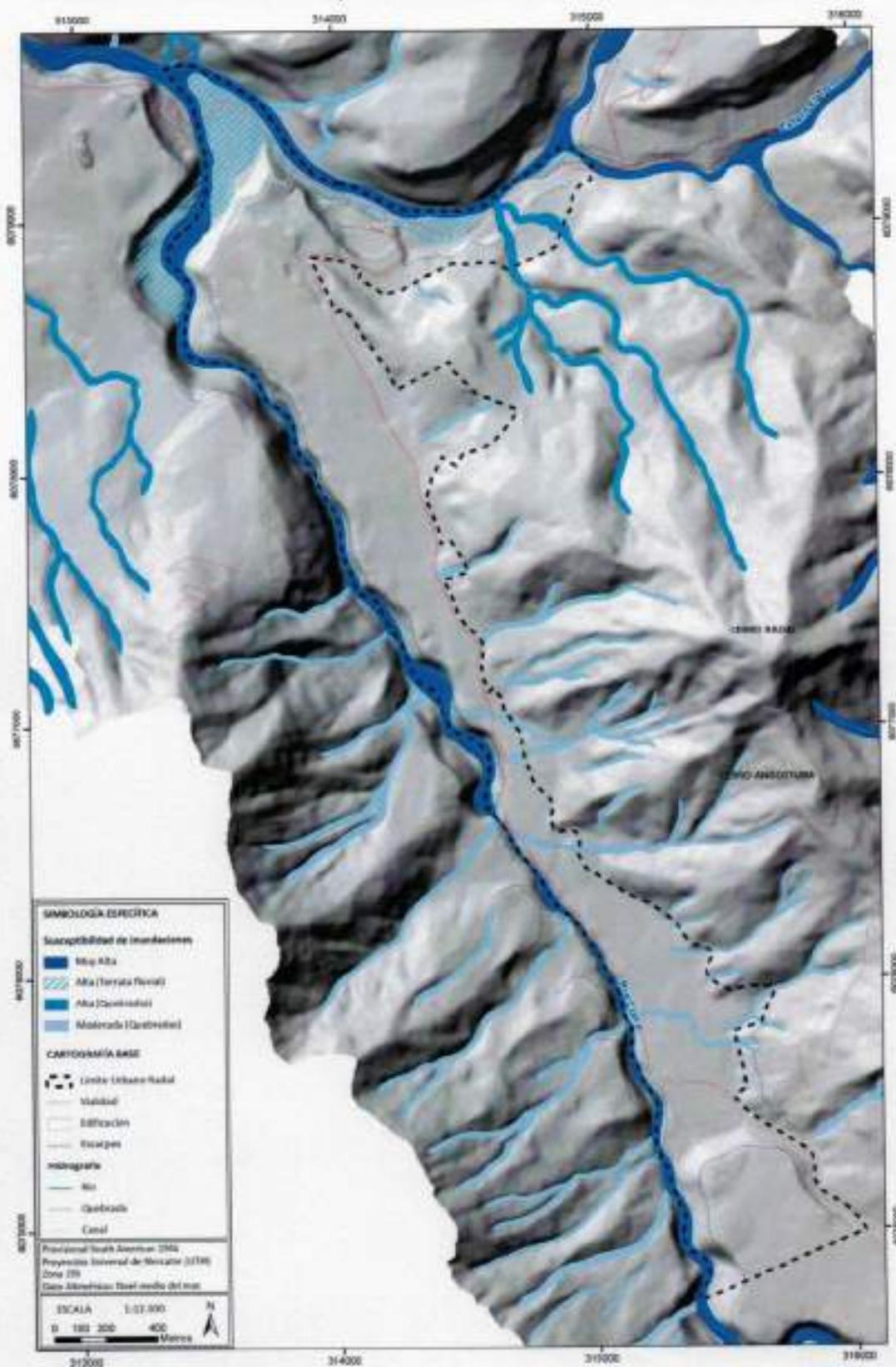
Fuente: Elaboración propia

FIGURA N° 5-3 Zonas de susceptibilidad de inundaciones para el sector de Molina y Lontué



Fuente: Elaboración propia

FIGURA Nº 5-4 Zonas de susceptibilidad de inundaciones para la localidad de Radal



Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Peligro de Remociones en Masa

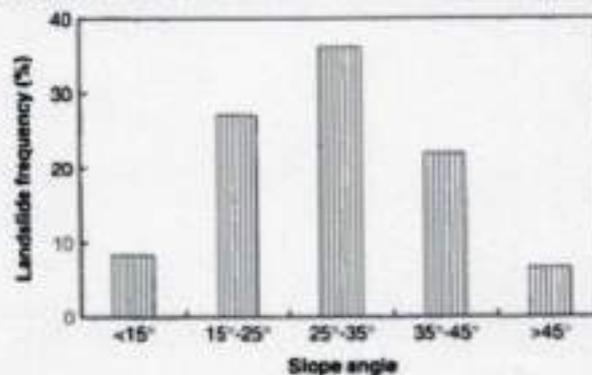
En el presente estudio se identificaron las zonas susceptibles de generar deslizamientos y caídas de bloques, y todas aquellas zonas susceptibles de ser alcanzadas por estos procesos generados inmediatamente pendiente arriba. Los deslizamientos principalmente están asociados a laderas poco estables, especialmente en las coladas basálticas que rellenan los valles en Radal y la Toba Loma Seca en los escarpes del río Claro en Itahue. En Radal se reconocen depósitos antiguos que fueron acentuados con el terremoto del 27 de febrero de 2010 y un deslizamiento que fue completamente generado por el terremoto. Para la zonificación de los sectores susceptibles de ser afectados por deslizamientos y caídas de bloques se realizó un análisis de fotografías aéreas, se realizó una visita a terreno, se utilizó la cobertura topográfica disponible (1:2.000 en algunos sectores o en su defecto y 1:30.000) y se revisaron estudios previos que documentan la ocurrencia de este tipo de procesos en la región (DIA Molina, 2010).

En Itahue se reconocen remociones en masa en los afloramientos de la Toba Loma Seca que conforma las terrazas del río Claro. Debido a la erosión del río en la base de los escarpes, se producen desprendimientos de bloques de estas rocas hacia el río. En el caso de Radal, las coladas basálticas que rellenan el fondo del valle presentan un alto grado de fracturamiento debido al rápido enfriamiento. 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:

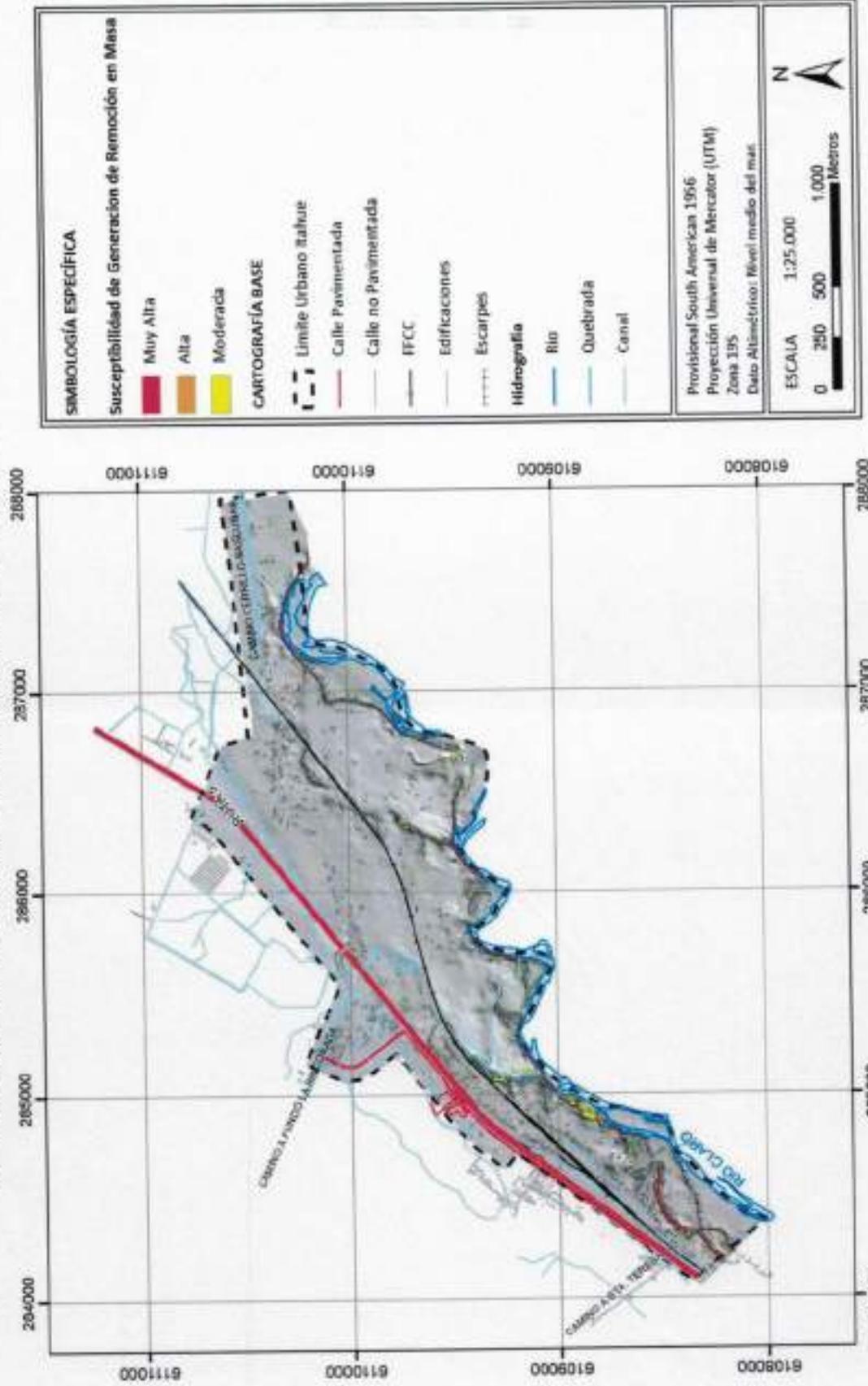
- **Zonas de Moderada Susceptibilidad de Generación:** Corresponde a sectores donde la pendiente se encuentra entre 15° y 25°.
- **Zonas de Alta Susceptibilidad de Generación:** En sectores de alta pendiente (de 25° a 35°).
- **Zonas de Muy Alta Susceptibilidad de Generación:** En sectores de muy alta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

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



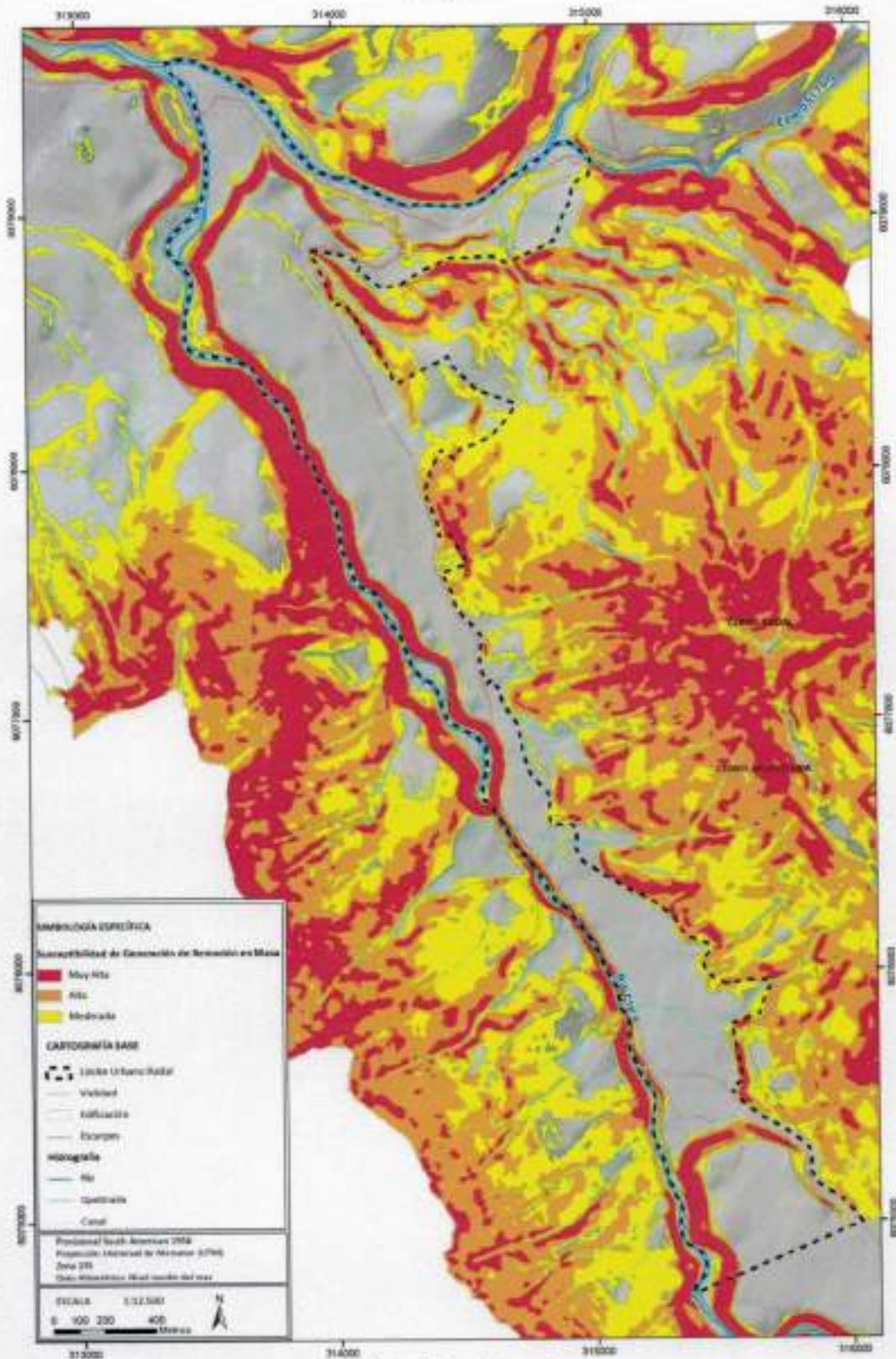
Fuente: Esaki et al. (2005)

FIGURA N° 5-6 Zonas de susceptibilidad de generación de remociones en masa en el área urbana de Itahue



Fuente: Elaboración propia

FIGURA Nº 5-7 Zonas de susceptibilidad de generación de remociones en masa en el área urbana de Radal



Fuente: Elaboración propia

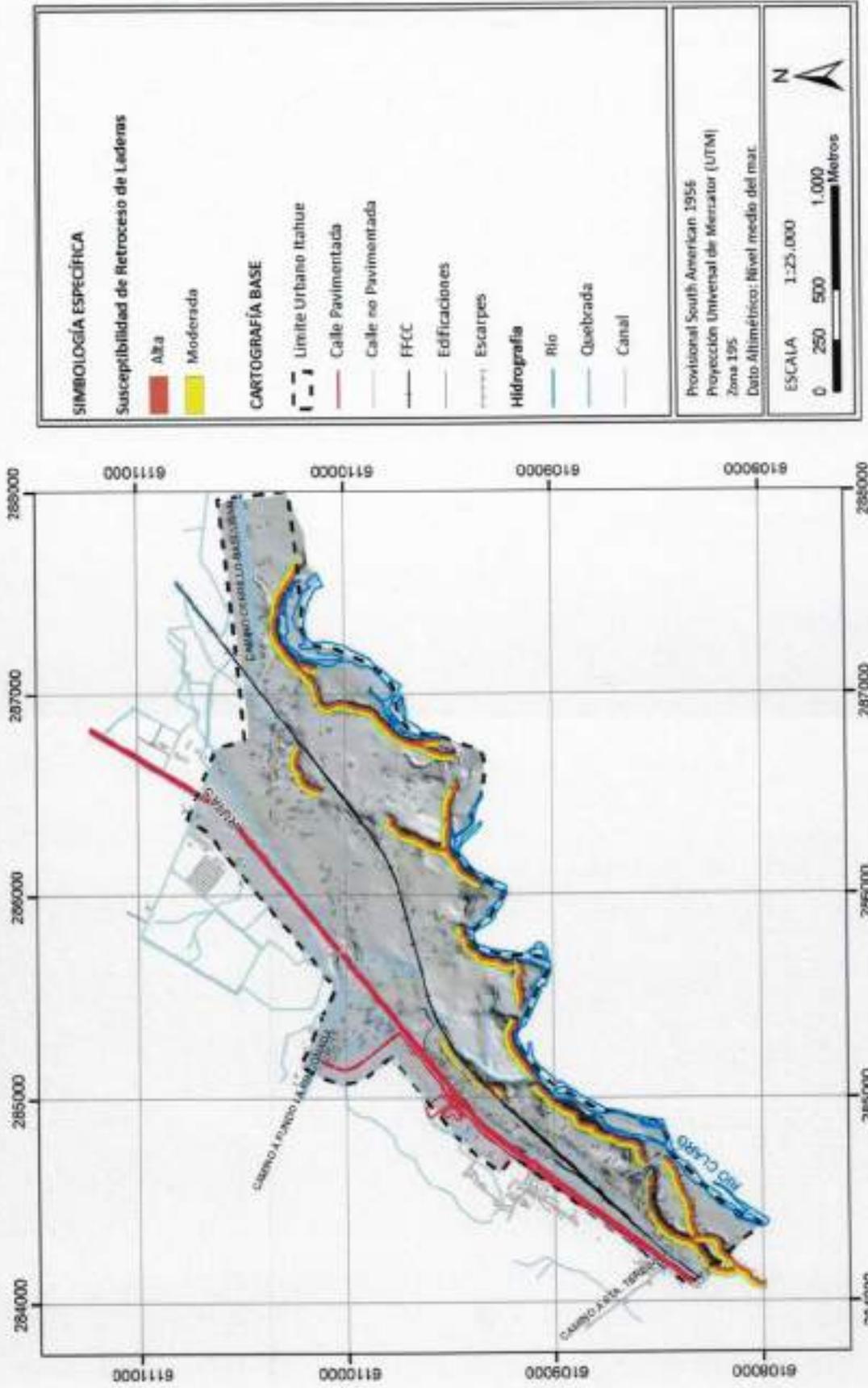
Para las zonas de retroceso de laderas, se marcaron en el mapa todos los escarpes de las áreas urbanas a partir de la cartografía y las imágenes satelitales. Se reconocieron escarpes de terrazas fluviales asociados al río Claro en Itahue y Radal. En el sector de Radal también se identificaron los escarpes asociados a las coladas basálticas que rellenan el valle. Se definieron dos sectores de susceptibilidad para los escarpes de terrazas fluviales en Itahue (FIGURA N° 5-8):

- **Zonas de Alta Susceptibilidad de Retroceso:** franja de ancho de 20 metros desde el escarpe hacia atrás
- **Zonas de Moderada Susceptibilidad de Retroceso:** franja de ancho entre 20 y 40 metros desde el escarpe hacia atrás

Para los escarpes de las coladas basálticas en Radal se definieron tres sectores de susceptibilidad (FIGURA N° 5-9):

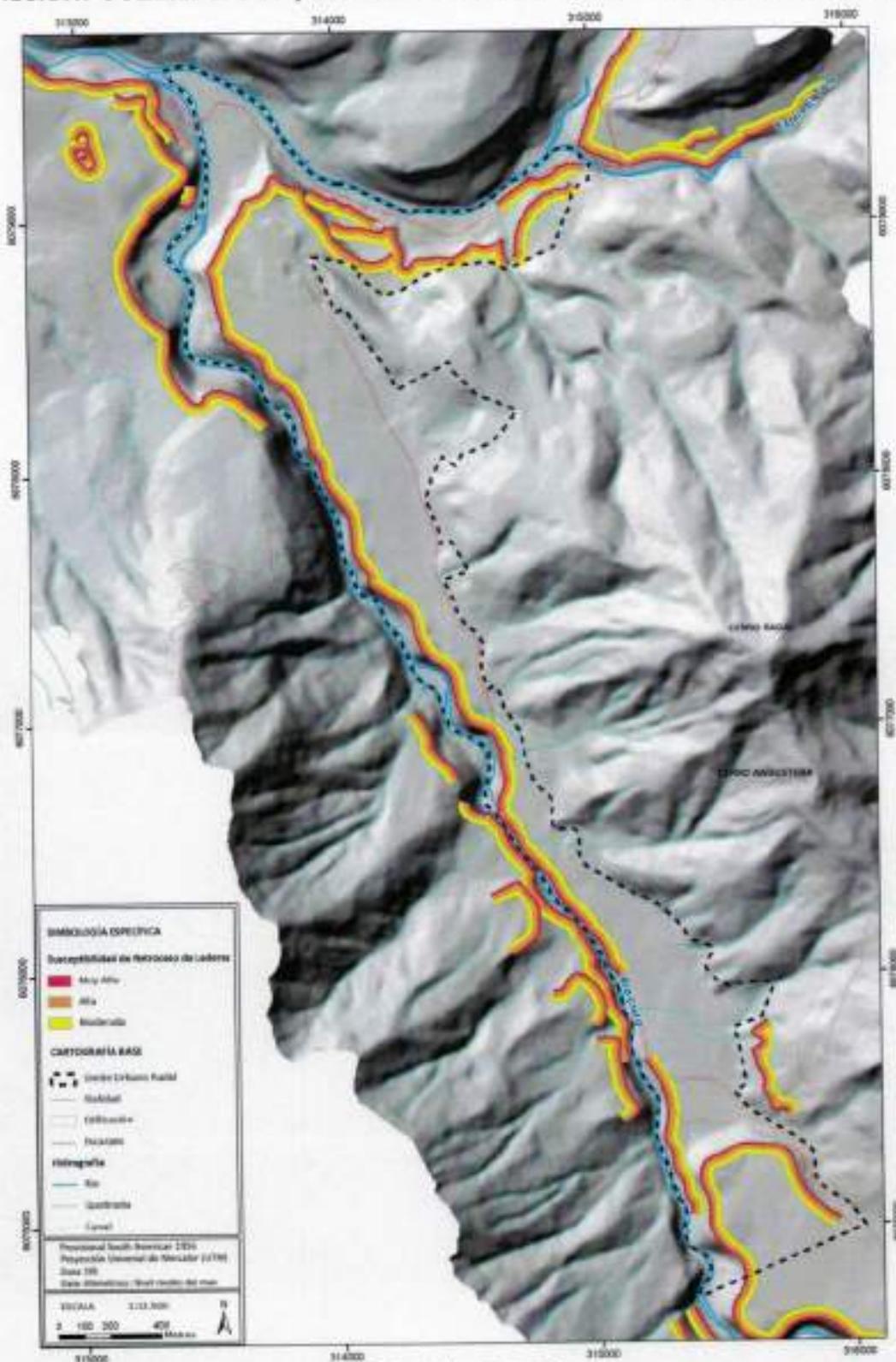
- **Zonas de Muy Alta Susceptibilidad de Retroceso:** franja de ancho de 10 metros desde el escarpe hacia atrás
- **Zonas de Alta Susceptibilidad de Retroceso:** franja de ancho entre 10 y 30 metros desde el escarpe hacia atrás
- **Zonas de Moderada Susceptibilidad de Retroceso:** franja de ancho entre 30 y 50 metros desde el escarpe hacia atrás

FIGURA N° 5-8 Zonas de susceptibilidad de retroceso de laderas en el área urbana de Itahue



Fuente: Elaboración propia

FIGURA Nº 5-9 Zonas de susceptibilidad de retroceso de laderas en el área urbana de Radal



Para determinar el alcance o "runout" de los deslizamientos se propuso un modelo generado en GIS. Se creó un set de puntos aleatorios distanciados cada 1 metro en las zonas de generación. El número de puntos fue de 866.833 puntos para las zonas de generación de pendientes moderadas, 979.944 puntos para las zonas de pendientes altas y 654.770 para las zonas de pendientes muy altas. Con estos sets de puntos y considerando las distintas litologías y la curvatura, se asignaron valores de alcance para cada caso y teniendo en cuenta los valores de alcance medidos en terreno y estimando los valores en los casos que no se encontraron evidencias en terreno (CUADRO N° 5-1). El modelo utilizado considera la litología, curvatura y pendiente como dato para determinar el alcance y desplaza los puntos la distancia correspondiente en la dirección de drenaje de la ladera (obtenida de la carta de exposición de ladera). La curvatura es la segunda derivada de la pendiente e indica que el relieve es convexo hacia arriba (valores de curvatura mayores a cero) o cóncavo hacia arriba (valores menores a 0) mientras que los valores correspondientes a cero indican las zonas planas.

CUADRO N° 5-1 Valores de Alcance utilizados en el modelo considerando la litología, pendiente y curvatura

Litología	Pendiente	Curvatura	Bloques	ALCANCE (m)	
Formación Abanico, Coladas andesíticas y riolíticas y Coladas basálticas	> 35°	<0 o >0	> 1m ³	5	Caída de bloques
			½ - 1m ³	10	
			< ½ m ³	20	
	25°-35°	<0 o >0	> 1m ³	5	
			½ - 1m ³	7	
			< ½ m ³	15	
	15°-25°	<0 o >0	> 1m ³	3	
			½ - 1m ³	5	
		< ½ m ³	10		
Coladas basálticas	> 35°	<0 o >0	-	200	Deslizamientos
	25°-35°	<0 o >0	-	150	
	15°-25°	<0 o >0	-	100	

Fuente: Elaboración propia a partir de observaciones y mediciones GIS de los depósitos reconocidos y de estimación de los valores en los casos que no se encontraron evidencias

Se creó un set de puntos desplazados para cada categoría mostrada en el CUADRO N° 5-1. Estos puntos fueron unidos y se generó un mapa de densidad de puntos con una celda de 5 metros de lado. Este mapa resultante muestra el promedio de puntos (alcances) por metro cuadrado para cada celda. Con esta información se determinaron las categorías de la zonificación de susceptibilidad de alcance de remociones en masa (FIGURA N° 5-10):

- **Zonas de Muy Alta Susceptibilidad de Alcance:** zonas en las que la probabilidad de ser afectadas por al menos el alcance de un deslizamiento en un área de 1m² es de 1.
- **Zonas de Alta Susceptibilidad de Alcance:** zonas en las que la probabilidad de ser afectadas por al menos el alcance de un deslizamiento en un área de 1m² varía entre 0,5 y 1.
- **Zonas de Moderada Susceptibilidad de Alcance:** zonas en las que la probabilidad de ser afectadas por al menos el alcance de un deslizamiento en un área de 1m² varía entre 0,1 y 0,5.
- **Zonas de Baja Susceptibilidad de Alcance:** zonas en las que la probabilidad de ser afectadas por al menos el alcance de un deslizamiento en un área de 1m² es menor a 0,1.

Una vez generados los mapas de susceptibilidad de generación, retroceso de la ladera y alcance de los deslizamientos en el caso de Radal, se dividió la información según la categoría de susceptibilidad. Se agruparon las susceptibilidades muy altas de retroceso, generación y alcance (en este orden de prioridad), las susceptibilidades bajas de las tres categorías y las moderadas de las tres categorías, todas con el mismo orden de prioridad.

Luego se unificaron los tres grupos de información, creando un mapa de susceptibilidad de remociones en masa con todas las categorías y considerando los tres procesos para Radal (FIGURA N° 5-11).

FIGURA N° 5-10 Zonas de susceptibilidad de alcance remociones en masa en el área urbana de Radal

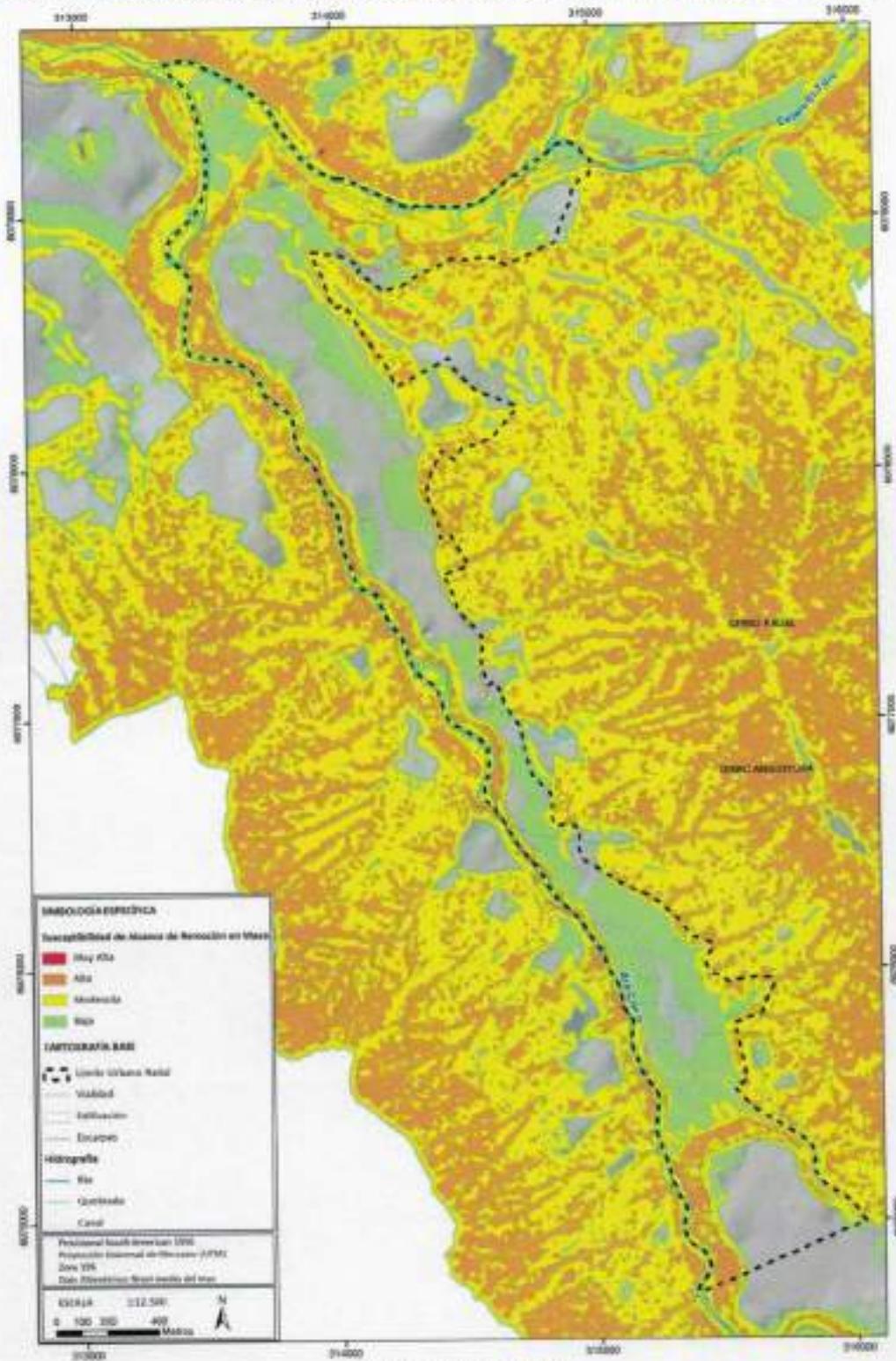
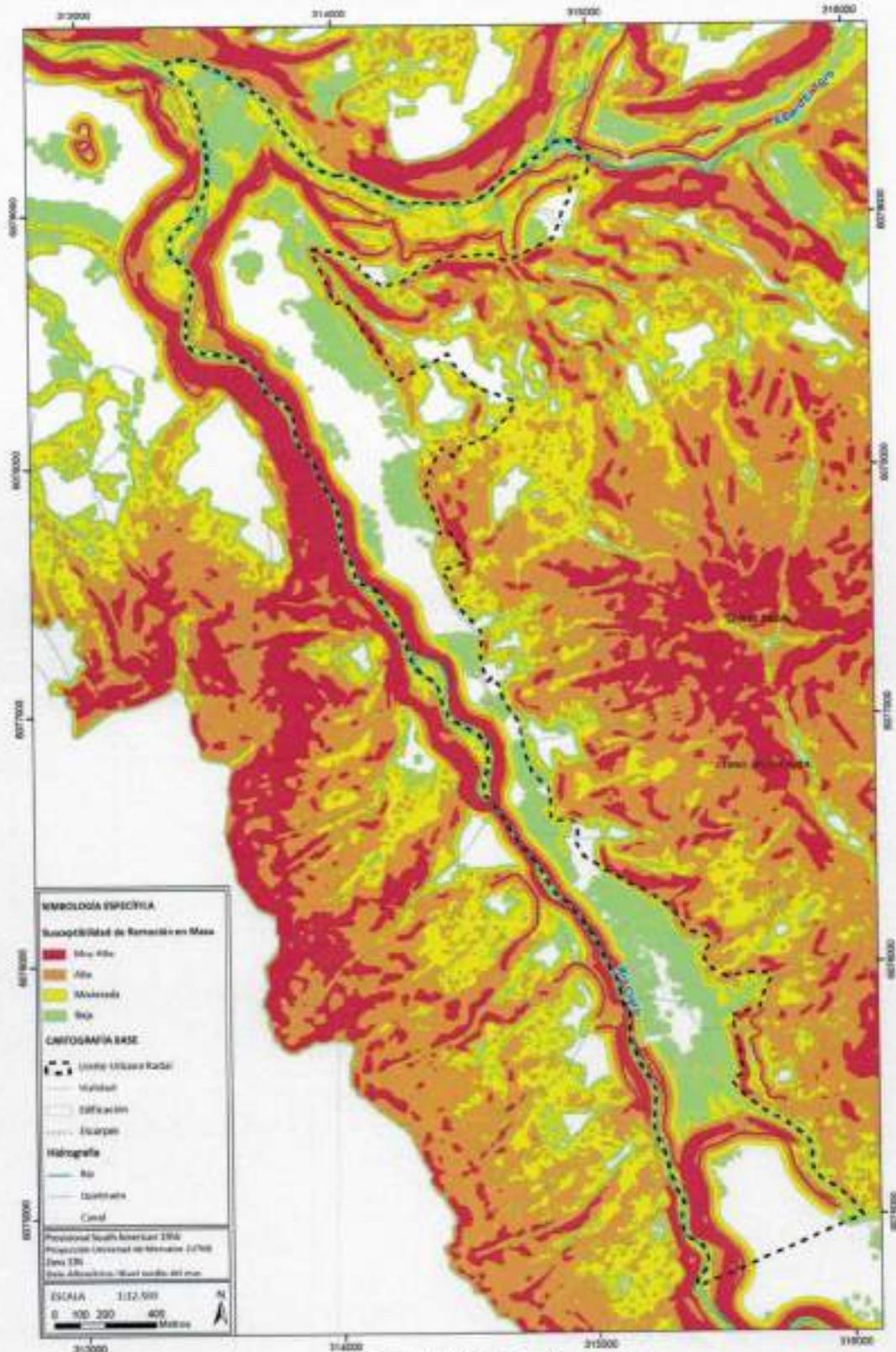


FIGURA Nº 5-11 Zonas de susceptibilidad de remociones en masa, considerando retroceso de laderas y generación y alcance de deslizamientos en el área urbana de Radal



Fuente: Elaboración propia

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

En el siguiente cuadro (CUADRO N° 6-1) se 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. En las FIGURA N° 6-1, FIGURA N° 6-2 y FIGURA N° 6-3 se sintetizan las zonas susceptibles a ser afectadas por los peligros zonificables dentro de los límites urbanos de Molina, a escala 1:25.000 para Itahue y Radal y escala 1:30.000 para Molina y Lontué. Además, en los PLANOS N° 4, 5 y 6 fuera de texto, se encuentra la misma síntesis a una escala 1:5.000 para las localidades de Itahue y Radal y 1:10.000 para las localidades de Molina y Lontué.

CUADRO N° 6-1 Síntesis de los peligros geológicos analizados para el área de estudio, descripción, catastro, metodología y zonificación

Peligro	Sismicidad
Descripción	Este peligro está asociado a la zona de subducción de la Placa de Nazca por debajo de la Sudamericana. Los sismos que se analizaron son los de "costa afuera" asociados a extensión por abombamiento, sismos asociados al contacto interplaca, sismos de intraplaca de profundidad intermedia y sismos superficiales de intraplaca (FIGURA N° 4-3). Se analizaron los principales eventos sísmicos y los peligros asociados a ellos
Peligros Asociados	Movimientos de terreno
Factores Desencadenantes	Dinámica de subducción del borde Pacífico del continente Sudamericano
Catastro	Se presenta una figura con el resumen de los 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). Aunque la información en el área es escasa, se han identificado algunas fallas que presentan evidencias de actividad más reciente, las cuales atraviesan la Comuna de Molina (FIGURA N° 4-12). Por otra parte, los sismos de baja profundidad que se observan en el sector cordillerano (FIGURA N° 4-11) estarían evidenciando la actividad de estas fallas
Metodología de Zonificación	La sismicidad no es zonificable a escala local para los alcances de este estudio. En base a antecedentes históricos, mapas de intensidades y comparación con otras zonas, se pueden realizar algunas estimaciones
Zonas Susceptibles	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° 4-12) 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 como potencialmente activas, estas deben ser consideradas como activas bajo un enfoque conservador

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 Ballísticos 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° 4-14) y un cuadro con las erupciones históricas y prehistóricas cercanas al área de estudio (CUADRO N° 4-2). En la FIGURA N° 4-14 se observa que las áreas urbanas de la Comuna de Molina se encuentran sobre ignimbritas y coladas de lava recientes, como lo es el caso de Itahue y Radal
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 el sector oeste de la Comuna de Molina corresponde al arco volcánico actual (Cordillera de los Andes). Dada la distancia de las zonas a los centros volcánicos activos se considera alta la probabilidad de que algún peligro volcánico afecte el área urbana de Radal, y moderada para las áreas de Itahue, Molina y Lontué. El pueblo de Itahue se encuentra construido sobre los depósitos de Ceniza Loma Seca, los cuales son producto de una gran erupción ocurrida cientos de miles de años atrás. Eventos de tal magnitud son de una recurrencia muy baja y se estima 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. De la misma forma, en la localidad de Radal existen numerosas coladas de lava, pues se encuentra rodeada de centros volcánicos (Descabezado Grande, Chico, Quizapu) que poseen actividad histórica

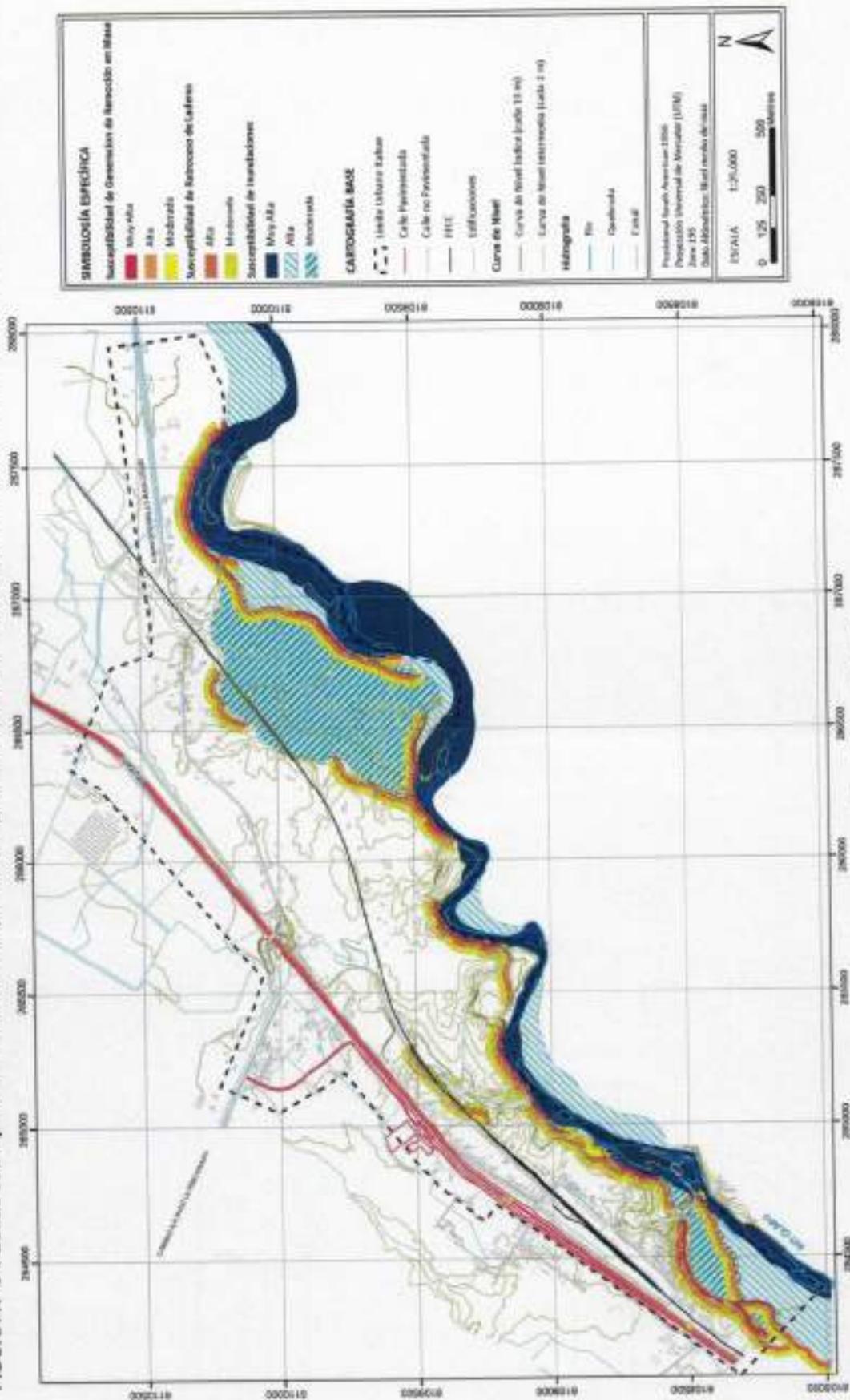
Peligro	Inundaciones
Descripción	Este peligro está asociado a eventos pluviométricos extremos, produciendo inundaciones por desborde de cauce o anegamientos. Asociados a estos eventos pueden presentarse flujos de detritos, referidos comúnmente como 'aluviones'
Peligros Asociados	Inundaciones por Desborde de Cauces Inundaciones por Anegamiento Flujos de Detritos
Factores Desencadenantes	Eventos pluviométricos extremos
Catastro	Personal de la Dirección de Obras de la Municipalidad de Molina, informó que los sectores que usualmente se ven afectados por inundaciones corresponden a la llanura de inundación del río Lontué (incluyendo el Canal Cerrillano, estero Seco y río Pirihuín) y las terrazas fluviales del río Claro (FIGURA N° 4-17) y esteros Campo y El Toro. La recopilación histórica realizada detalla las inundaciones que afectaron distintos sectores de la Comuna de Molina (Error! El resultado no es válido para una tabla. y CUADRO N° 4-4) y el estudio de Prisma Ingeniería (2003) define los sectores de Pirihuín, Entre Ríos y Las Veinticinco como los sectores críticos (CUADRO N° 4-5)
Metodología de Zonificación	Las inundaciones que más comúnmente afectan a las áreas urbanas de la Comuna de Molina son ocasionadas por desbordamientos de cauces y anegamiento por lo tanto, la zonificación se dividió en cuatro categorías (FIGURA N° 5-2, FIGURA N° 5-3 y FIGURA N° 5-4): <u>Susceptibilidad Muy Alta de Anegamiento:</u> depósitos finos de sectores bajos <u>Susceptibilidad Muy Alta:</u> depósitos fluviales activos y depósitos fluviales antiguos (paleo-cauces) <u>Susceptibilidad Alta:</u> depósitos fluviales activos de la llanura de inundación de los cauces fluviales (ríos y esteros), terrazas inferiores, canal Cerrillano y depósitos aluviales y coluviales de quebradas con un área drenada mayor a 2 km ² <u>Susceptibilidad Moderada:</u> terrazas fluviales intermedias y superiores y depósitos aluviales y coluviales de quebradas con un área drenada menor a 2 km ²
Zonas Susceptibles	<u>Susceptibilidad Muy Alta de Anegamiento:</u> sectores deprimidos en el área urbana de Lontué <u>Susceptibilidad Muy Alta:</u> cauces fluviales naturales de los ríos Claro y Lontué, esteros Campo y El Toro y otros esteros menores sin nombre <u>Susceptibilidad Alta:</u> llanuras de inundación del río Lontué, terraza inferior de los ríos Claro y Lontué y cauces de quebradas con un área drenada mayor a 2 km ² . Canal Cerrillano (Molina), río Pirihuín y estero Seco (Lontué) <u>Susceptibilidad Moderada:</u> terrazas intermedias y superiores del río Claro y cauces de quebradas con un área drenada menor a 2 km ² y abanicos aluviales que se forman en la desembocadura de las mismas

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	<p>Este tipo de depósitos sólo se reconocieron en el área urbana de Radal (ver capítulo 3.3.2 "Depósitos No Consolidados", FIGURA N° 3-12). Son generados por el colapso de las coladas de lava producto de la erosión fluvial. Algunos de estos depósitos no son de gran volumen, sin embargo otros, poseen alcances de hasta 120 metros. Por ejemplo, el depósito generado durante el terremoto de febrero del 2010, el cual logró represar el río Claro, provocando inundaciones en el sector (FIGURA N° 4-21). Existen depósitos antiguos, cuya fecha exacta de generación se desconoce, sin embargo se observan cubiertos de vegetación. El terremoto del 27 de febrero del 2010 generó nuevos depósitos (FIGURA N° 4-21), y pequeños deslizamientos en depósitos antiguos, los cuales se diferencian pues carecen de vegetación (FIGURA N° 4-22)</p> <p>En el caso de Itahue, las remociones en masa que se reconocieron corresponden a colapsos de las terrazas fluviales del río Claro. Por erosión del río de los depósitos de la Toba Loma Seca se produce el retroceso de las laderas, generando caídas de bloques hacia el río y su llanura de inundación (FIGURA N° 4-23)</p>		
Metodología de Zonificación	Se definieron zonas susceptibles a generar procesos de remoción en masa principalmente asociadas a las pendientes de las laderas y terrazas fluviales y zonas susceptibles a ser alcanzadas por remociones en masa (FIGURA N° 5-6, FIGURA N° 5-8 y FIGURA N° 5-11)		
	GENERACIÓN	RETROCESO	ALCANCE
	<u>Susceptibilidad Muy Alta:</u> sectores con pendientes mayores a 35°	<u>Susceptibilidad Muy Alta:</u> áreas ubicadas a menos de 10 metros de los escarpes (Radal)	<u>Susceptibilidad Muy Alta:</u> áreas con una probabilidad de 1 de alcance en una superficie de 1m ²

Peligro	Remociones en Masa		
	GENERACIÓN	RETROCESO	ALCANCE
Metodología de Zonificación	<u>Susceptibilidad Alta:</u> sectores con pendientes entre 35° y 25°	<u>Susceptibilidad Alta:</u> áreas ubicadas entre 10 y 30 metros de los escarpes (Radal) y a menos de 20 metros de los escarpes de terrazas del río Claro (Itahue)	<u>Susceptibilidad Alta:</u> áreas con una probabilidad entre 1 y 0,5 de alcance en una superficie de 1m ²
	<u>Susceptibilidad Moderada:</u> sectores con pendientes entre 25° y 15°	<u>Susceptibilidad Moderada:</u> áreas ubicadas entre 30 y 50 metros de los escarpes (Radal) y a entre 20 y 40 metros de los escarpes de terrazas del río Claro (Itahue)	<u>Susceptibilidad Moderada:</u> áreas con una probabilidad entre 0,5 y 0,1 de alcance en una superficie de 1m ²
			<u>Susceptibilidad Baja:</u> áreas con una probabilidad menor a 0,1 de alcance en una superficie de 1m ²
Zonas Susceptibles	<p>ITAHUE: Los escarpes de las terrazas del río Claro en el área urbana presentan una susceptibilidad de generación de procesos de remoción en masa por las altas pendientes. Por otra parte, estos procesos de remoción de material pendiente abajo produce el retroceso de la ladera. Debido a esto, los escarpes presentan una zonificación de susceptibilidad definida por este proceso</p> <p>RADAL: Los escarpes del río Claro y los esteros Campo y El Toro, presentan la misma zonificación de susceptibilidad por retroceso de laderas que el área urbana de Itahue. Por otra parte, todos los sectores de pendientes elevadas asociados a los cerros que rodean el área urbana de Radal, quedan definidos como sectores susceptibles a generación de procesos de remoción en masa. A partir de estos sectores de generación se definieron sectores de alcance de los procesos de remoción en masa, pendiente abajo</p>		

Fuente: Elaboración propia

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



Fuente: Elaboración propia

FIGURA N° 6-2 Zonas susceptibles a ser afectadas por los peligros geológicos reconocidos en el área urbana de Molina y Lontué y zonificables a escala local

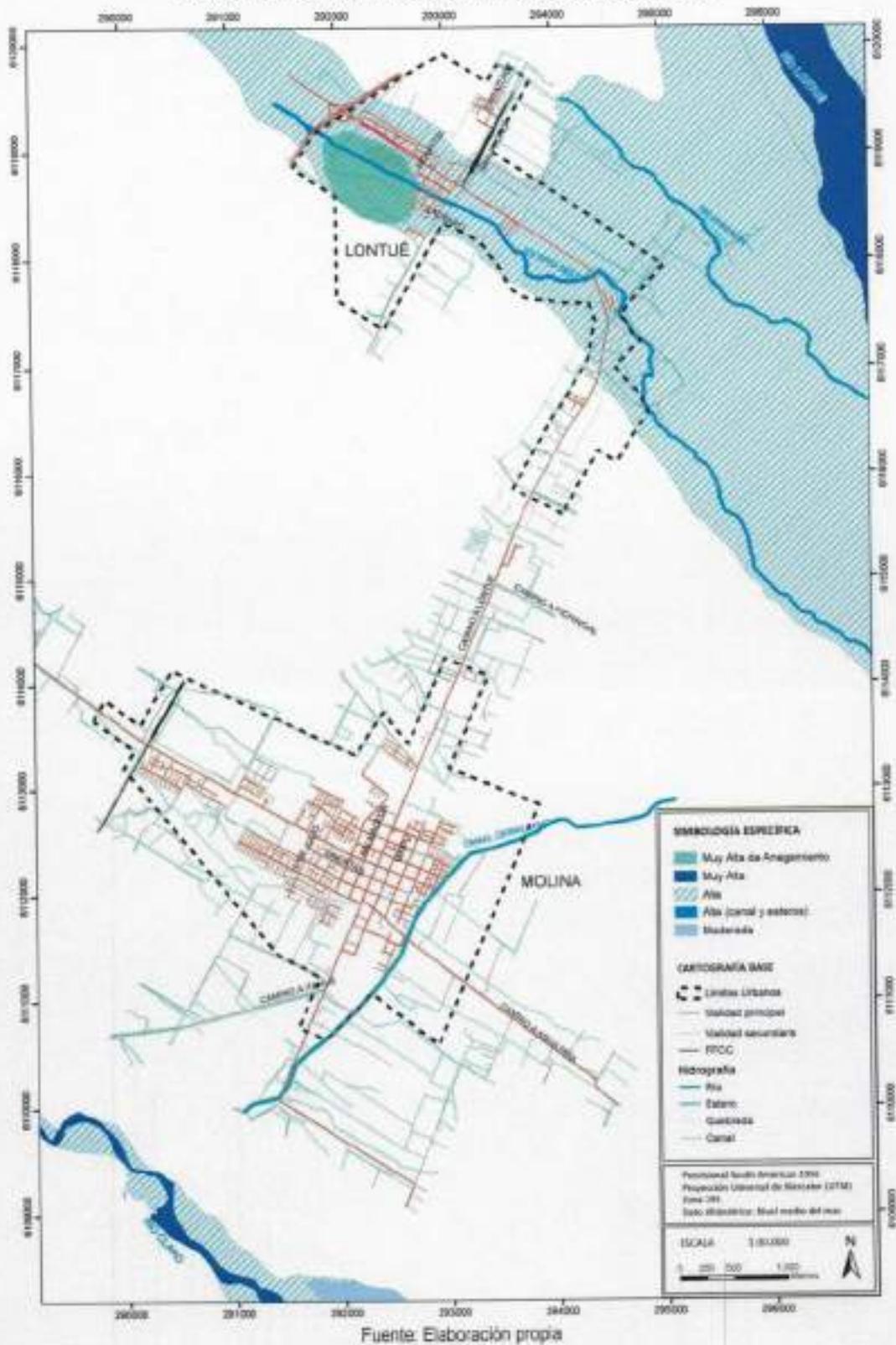
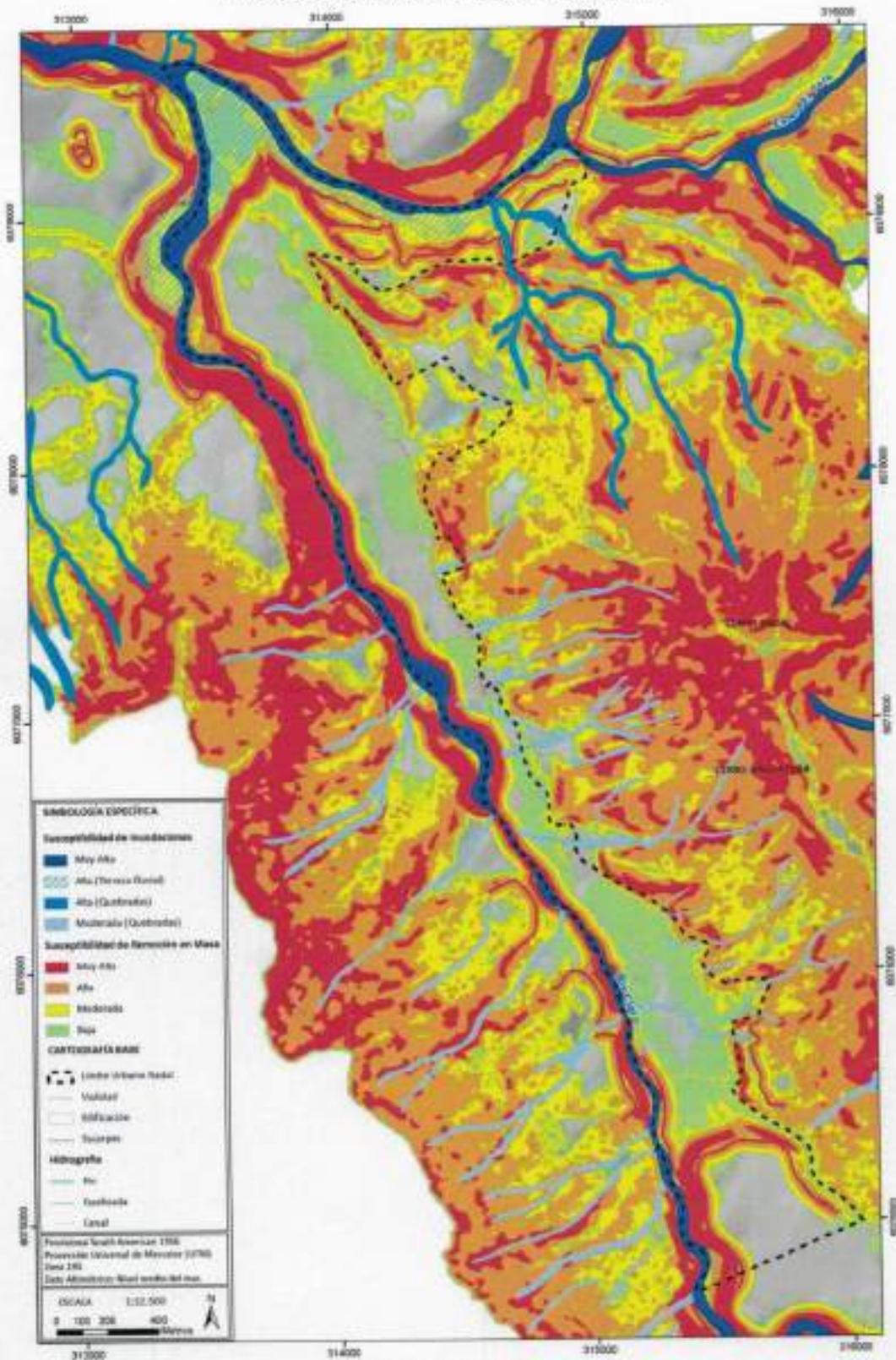


FIGURA N° 6-3 Zonas susceptibles a ser afectadas por los peligros geológicos reconocidos en el área urbana de Radal y zonificables a escala local



Fuente: Elaboración propia

7 RECOMENDACIONES

En los siguientes cuadros (CUADRO N° 7 1, CUADRO N° 7 2 y CUADRO N° 7 3) se presenta una síntesis de los peligros reconocidos en las áreas urbanas de la comuna de Molina, 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 Molina 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.

Se recomienda zonificar como no edificables los sectores ubicados sobre zonas de susceptibilidad muy alta y alta de generación y alcance de deslizamientos y caída de bloques, y las zonas de susceptibilidad muy alta y alta de retroceso de laderas asociado a los escarpes.

Con respecto a las inundaciones, se recomienda realizar estudios hidrológicos detallados para los cauces naturales, con el fin de complementar la cartografía de las zonas susceptibles a ser afectadas por inundaciones, con los periodos de retornos asociados, lo que permitiría definir zonas de riesgo. Para las áreas altamente susceptibles a 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 de alta susceptibilidad de ser afectados por estos peligros se deberá proponer usos sólo con fines recreativos y prohibir la utilización de estas áreas con fines habitacionales. Se recomienda zonificar como no edificables los sectores de anegamiento.

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. Además, la presencia de canales artificiales genera suelos saturados en agua en su cauce y los sectores aledaños, dando origen a suelos con un mal comportamiento geotécnico que presentan menor resistencia en el caso de ser afectados por sismos.

CUADRO N° 7-1 Resumen de Peligros Geológicos del área urbana de Itahue 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 del río Claro	Restricción
	Alta	Áreas de inundación por desborde de cauces. Geológicamente corresponden a la Terraza Inferior del río Claro	Riesgo (2.1.17)
	Moderada	Áreas de inundación por desborde de cauces. Corresponden a todas aquellas áreas de las Terraza Intermedia y Superior del río Claro	Normas Urbanísticas
	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)
Remociones en Mesa	Alta de Retroceso	Áreas ubicadas a menos de 20 m de distancia del escarpe de las terrazas del río Claro	Restricción
	Moderada de Retroceso	Áreas ubicadas entre 20 y 40 m de distancia del escarpe de las terrazas del río Claro	Riesgo (2.1.17)

Fuente: Elaboración propia

CUADRO N° 7-2 Resumen de Peligros Geológicos del área urbana de Molina y Lontué y criterios utilizados para definir la zonificación de susceptibilidad y la zonificación urbana propuesta para cada caso

Peligro	Susceptibilidad	Criterios	Zonificación Urbana
	Muy Alta de Aseguramiento	Sector bajo en Lontué que se anega con lluvias invernales (información entregada por la Dirección de Obras de Molina)	Restricción
	Muy Alta	Cauce natural de ríos o esteros. Geológicamente corresponden a depósitos fluviales activos del río Claro y río Lontué	Restricción
Inundación	Alta	Áreas de inundación por desborde de cauces. Geológicamente corresponden a la Terraza Inferior de los ríos Claro y Lontué y a la llanura de inundación antigua del río Lontué. Se incluye un buffer de 15 metros para el canal Cerrillano en Molina y los dos esteros que cruzan Lontué.	Riesgo (2.1.17)
	Moderada	Áreas de inundación por desborde de cauces. Geológicamente corresponden a la Terraza Superior de lo río Claro	Normas Urbanísticas

Fuente: Elaboración propia

CUADRO N° 7-3 Resumen de Peligros Geológicos del área urbana de Radal 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 del río Claro, estero Campo y estero El Toro	Restricción
	Alta	Áreas de inundación por desborde de cauces. Geológicamente corresponden a la Terraza Inferior del río Claro y a quebradas con áreas drenadas mayores a 2km ²	Riesgo (2.1.17)
	Moderada	Áreas de inundación por desborde de cauces. Geológicamente corresponden a quebradas con áreas drenadas menores a 2km ²	Normas Urbanísticas
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)
	Muy Alta de Retroceso	Áreas ubicadas a menos de 10 m de distancia de los escarpes	Restricción
	Alta de Retroceso	Áreas ubicadas entre 10 y 30 metros de distancia de los escarpe	Restricción
	Moderada de Retroceso	Áreas ubicadas entre 30 y 50 metros de distancia de los escarpe	Riesgo (2.1.17)
	Muy Alta de Alcance	Áreas con probabilidad de 1 de alcance en 1m ²	Restricción
	Alta de Alcance	Áreas con probabilidad entre 1 y 0,5 de alcance en 1m ²	Restricción
	Moderada de Alcance	Áreas con probabilidad entre 0,5 y 0,1 de alcance en 1m ²	Riesgo (2.1.17)
	Baja de Alcance	Áreas con probabilidad menor a 0,1 de alcance en 1m ²	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., Sáez, 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.
- Anatívia, 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.
- Antinaco, 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.
- Barcelo, J., 1985. Geología Área de Protección "Radal Siete Tazas". Corporación Nacional Forestal.
- 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 Copiapó, 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, Berlin, p. 2VI8-317.
- Cruden, D.M., Varnes, D.J., 199VI. Landslide types and processes. In *Special Report 247: Landslides: Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board, Washington D.C.
- De Mets, C., Gordon, R., Argus, D., Stein, S., 1994. Effects of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters* 21 (20): 2191-2194.
- Declaración de Impacto Ambiental. Modificación Plan Regulador Comunal de Molina, Área de Radal. 2010
- Díez-Herrero, A., Lain-Huerta, L., Llorente-Isidro, M., 2008. Mapas de Peligrosidad por avenidas e inundaciones: Guía metodológica para su elaboración. Instituto Geológico y Minero de España. Serie Riesgos Geológicos/Geotecnia No. 1, 190 p.

- Esaki, T., Thapa, P., Mitani, Y., Ikemi, H., 2005. Landslide and debris flow characteristics and hazard mapping in mountain hillslope terrain using GIS, Central Nepal. *En: Eberhardt, E., Hungr, O., Fell, R., Couture, E. (eds), Proceedings, International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, p. 657-669.*
- Eyquem, D., 2009. Volcanismo cuaternario de Sierras de Bellavista: Comparación geoquímica con el magmatismo contemporáneo del arco comprendido entre los 34°30' y los 35°30'S. Departamento de Geología. Santiago, Universidad de Chile. Memoria de título de Geólogo: 116 páginas.
- Farías, M., 2007. Tectónica y erosión en la evolución del relieve de Los Andes de Chile Central durante el Neógeno. Departamento de Geología. Santiago, Universidad de Chile. Doctor en Ciencias, mención geología: 275 páginas.
- Giraud, R., Shaw, L., 2007. Landslide Susceptibility Map of Utah. Utah Geological Survey, 16 p.
- González-Ferrán, O., 1995. Volcanes de Chile. Instituto Geográfico Militar, VI40 p. Santiago.
- Hauser, A., 1995. Hoja Talca, región VII, Escala 1:100.000. SERNAGEOMIN, Carta Hidrogeológica de Chile (n.2): 73 p., + anexos; 2 mapas pleg. col, Santiago. Coordenadas: 35°00' - 35°30' / 72°00' - 71°00' ; 35°30' - 36°00' / 72°00' - 71°15'
- Hauser, A., 1997. Los aluviones del 18 de Junio de 1991 en Antofagasta: un análisis crítico, a 5 años del desastre. Servicio Nacional de Geología y Minería. Boletín No. 49, 47 p. Santiago.
- Hauser, A., 2000. Remociones en masa en Chile. Boletín N°59, Servicio Nacional de Geología. Santiago. 89 p.
- Hauser, A., Parra, J., Skarmeta, J., 1982. Deslizamiento del Fundo Santa Domitilo, Chanco, VII región. Servicio Nacional de geología y Minería, documento inédito, 12 pp.
- Hauser, A., 1985. Flujos de barro en la zona preandina de la Región Metropolitana: Características, causas, efectos, riesgos y medidas preventivas. Revista Geológica de Chile (24): 75 - 92.
- Hildreth, W. y Drake, R., 1991. Volcán Quizapú, Chilean Andes. Bulletin of Volcanology (1992)54: 93-125.
- 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.
- Larrain, 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: Erickson, 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., Ramirez, 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: 4V13 – 485.
- Pablo Mardones Consultores, 2006. Memoria Explicativa PRC Molina.
- 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.
- Prisma Ingeniería Limitada, 2003. Plan Maestro de Manejo de Cauces. Cuenca Río Mataquito, VII Región. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas. Santiago.
- 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., Amijo, 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, 2002. 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, pag. 255 a 259.
- Stern, C.R., Amini, H., Charrier, R., Godoy, E., Hervé, F., Varela, J., 1984. Petrochemistry and age of rhyolitic pyroclastic flows which occur along the drainage valleys of the río Maipo and río Cachapoal (Chile) and río Yaucha and río Papagayos (Argentina). Revista Geológica de Chile, N° 23, páginas 39 - 52.
- United Nations Inter-Agency Secretariat of the International Strategy for Disaster Risk Reduction, 2004. Living with Risk: A global review of disaster reduction initiatives. Geneva: UN/ISDR. 430 p. Disponible en: http://www.unisdr.org/eng/about_isdr/bd-lwr-2004-eng.htm.
- Urrutia, R. y Lanza, C. 1993. Catástrofes en Chile 1541-1992. Editorial La Noria. 440p. Facultad de Ingeniería, Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Uyeda, S., Kanamori, H., 1979. Back-arc opening and the mode of subduction. Journal of Geophysical Research 8 (NO B3): 1049-1059.

Varela, J., y Moreno, H., 1982. Los depósitos de relleno de la depresión central de Chile entre los Ríos Lontué y Biobío. En Congreso Geológico Chileno, 3., Concepción, 8-14 noviembre, 1982: pp.F280-F306.

Vargas, G., Farias, M., Carretier S., Tassara, A., Baiza, S. y Melnick, D., 2011. Coastal uplift and tsunami effects associated to the 2010 Mw 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, VI1 p

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