

**“MODIFICACIÓN PLAN REGULADOR COMUNAL DE PUTRE”
REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA**

**MEMORIA EXPLICATIVA
ANEXO
ESTUDIO FUNDADO DE RIESGOS**

**INFORME N°6
Etapa 4. PROYECTO FINAL DEL PLAN, RESUMEN EJECUTIVO E IMAGEN
OBJETIVO”
VERSIÓN FINAL
04 de Abril de 2018**



Modificación Plan Regulador Comunal de Putre

El presente documento es el "INFORME FUNDADO DE RIESGOS", enmarcado en el estudio "Modificación Estudio Plan Regulador Comunal de Putre" encargado por la
Ilustre Municipalidad de Putre y la SEREMI REGION ARICA Y PARINACOTA
A
HABITERRA Ltda

EQUIPO CONSULTOR XTERRAE: Ltda.

Rodrigo Rauld Plott, Geólogo, Doctor en ciencias mención geología
Felipe García-Huidobro, MSc en ciencias mención recurso y medio ambiente hídricos
Constanza Urresty Vargas, Geóloga
Vicente Letelier Carvajal, Geólogo
Katherine Pinochet Oviedo, Geóloga

CONTRAPARTE TÉCNICA:

Ilustre Municipalidad de Putre
SEREMI REGION ARICA Y PARINACOTA



CONTENIDOS

1 ESTUDIO FUNDADO DE RIESGOS	6
1.1 INTRODUCCION	6
1.1.1 Ubicación Área de Estudio.....	6
1.1.2 Objetivo	6
1.1.3 Alcance y limitaciones.....	9
1.1.4 Marco Jurídico	9
1.2 METODOLOGÍA	11
1.3 LÍNEA DE BASE	20
1.3.2 Inventario de Peligros Geológicos.....	45
1.4 DIAGNÓSTICO Y ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS PELIGROS GEOLÓGICOS	60
1.5 RECOMENDACIÓN DE CRITERIOS PARA LA ZONIFICACIÓN.....	80
1.5.1 Recomendaciones para el Peligro Volcánico	80
1.5.2 Otras Recomendaciones	81
1.6 REFERENCIAS.....	84
2 ANEXO.....	89
2.1 DEFINICIONES DE PELIGRO Y RIESGO USADAS EN ESTE INFORME	89

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-1: Ubicación de la comuna de Putre.	7
Ilustración 1-2: Ubicación de las áreas de estudio de detalle que comprenden las localidades de Putre y de Zapahuira.....	8
Ilustración 1-3: Diagrama de flujo del trabajo realizado.....	13
Ilustración 1-4: Recorrido realizado durante la visita a terreno.....	17
Ilustración 1-5: Marco geodinámico.	21
Ilustración 1-6: Carta de elevaciones en la comuna de Putre.....	23
Ilustración 1-7: Carta de pendientes en la comuna de Putre.....	24
Ilustración 1-8: Carta de aspecto en la comuna de Putre.....	25
Ilustración 1-9: Unidades Geomorfológicas de la zona que comprende las áreas de estudio de detalle.....	26
Ilustración 1-10: Mapa geológico de la comuna de Putre.....	28
Ilustración 1-11: Depósitos aluviales encontrados en la quebrada mayor inmediatamente al NNE de la localidad de Putre.	29
Ilustración 1-12: Vista al suroeste de la quebrada Chucarlasuña, donde se distinguen la Unidad Tajane, la Unidad Putre y los depósitos coluviales.	30
Ilustración 1-13: Depósitos piroclásticos de la Unidad Putre encontrados en la quebrada Chucarlasuña.	31
Ilustración 1-14: Depósitos cineríticos de la Unidad Tajane.	32
Ilustración 1-15: Mapa geológico del área de estudio de detalle en la localidad de Putre.	33
Ilustración 1-16: Depósitos fluvioaluviales ubicados en la Quebrada Zapahuira.	34
Ilustración 1-17: Localidad de Zapahuira asentada sobre la Formación Huaylas.	36
Ilustración 1-18: Mapa geológico del área de estudio de detalle en la localidad de Zapahuira.	37
Ilustración 1-19: Precipitación anual (mm), XV Región de Arica y Parinacota.	39

Ilustración 1-20: Distribución de climas (Clasificación de Köppen) en la Región de Arica y Parinacota.	40
Ilustración 1-21: Temperaturas medias del aire y precipitación promedio mensuales en la ciudad de Putre.....	42
Ilustración 1-22: Cuencas hidrográficas de la XV Región de Arica y Parinacota.	44
Ilustración 1-23: 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.	47
Ilustración 1-24: Mapa regional con la sismicidad registrada instrumentalmente	48
Ilustración 1-25: Fallas activas e inactivas que se encuentran cercanas a la comuna de Putre.....	49
Ilustración 1-26: Ubicación de los centros volcánicos próximos a la comuna de Putre.....	53
Ilustración 1-27 Ubicación de dos ejemplos de deslizamientos activos en la quebrada Chucarlasuña (ver Ilustración 1-28).	55
Ilustración 1-28: Imágenes de GoogleEarth mostrando dos sectores (A y B) afectados por deslizamientos de suelo en la quebrada Chucarlasuña, antes (A.1 y B.1) y después (A.2 y B.2) de su ocurrencia.....	56
Ilustración 1-29: Mapa inventario del sector de Putre.....	57
Ilustración 1-30 Mapa inventario del sector de Zapahuira	58
Ilustración 1-31: Peligros volcánicos asociados al Complejo Volcánico Taapaca.....	62
Ilustración 1-32: Mapa de Susceptibilidad de Caída de Rocas en el área de estudio de detalle de Putre.....	65
Ilustración 1-33: Mapa de Susceptibilidad de Caída de Rocas en el área de estudio de detalle de Zapahuira.	66
Ilustración 1-34: Frecuencia de deslizamientos en función de la pendiente del terreno ...	67
Ilustración 1-35: Carta de pendientes del área de estudio de detalle de Putre.	69
Ilustración 1-36: Carta de pendientes del área de estudio de detalle de Zapahuira.	70
Ilustración 1-37: Mapa de Susceptibilidad de Deslizamientos en el área de estudio de detalle de Putre.....	71
Ilustración 1-38: Mapa de Susceptibilidad de Deslizamientos en el área de estudio de detalle de Zapahuira.	72
Ilustración 1-39: Mapa de Susceptibilidad de Retroceso de Laderas en el área de estudio de detalle de Putre.....	75
Ilustración 1-40: Mapa de Susceptibilidad de Retroceso de Laderas en el área de estudio de detalle de Zapahuira.	76
Ilustración 1-41: Mapa de Susceptibilidad de Flujos e Inundaciones en el área de estudio de detalle de Putre.....	78
Ilustración 1-42: Mapa de Susceptibilidad de Flujos e Inundaciones en el área de estudio de detalle de Zapahuira.	79
Ilustración 2-1: Etapas de la evaluación de un evento geológico peligroso	92
Ilustración 2-2 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	94
Ilustración 2-3: Contexto geodinámico y margen de subducción de Chile.....	95
Ilustración 2-4: Tipos de sismos que ocurren en un margen de subducción (explicación en el texto).....	96
Ilustración 2-5: Tipos de Falla y esfuerzos asociados	97
Ilustración 2-6: Tipos de ondas sísmicas	98
Ilustración 2-7: Amplificación de la vibración generada por un terremoto.....	99
Ilustración 2-8: Peligros volcánicos asociados a la erupción de un volcán	101

Ilustración 2-9: Clasificación de los tipos de inundaciones 105

Ilustración 2-10: Clasificación de tipos de remoción en masa en relación al movimiento que lo origina y el material constituyente de la ladera 109

Ilustración 2-11: Ejemplos de deslizamientos. A. Deslizamiento Rotacional, B. Deslizamiento traslacional 110

Ilustración 2-12: Ejemplo de erosión por retroceso de terrazas, aplicado al desarrollo de planicies de abrasión 111

TABLA DE CUADROS

Cuadro 1.1-1: Cuadro de homologación "áreas de riesgo" según el artículo 2.1.17 del OGUC..... 11

Cuadro 1.3-1: Montos promedio de elementos climáticos en la zona de Putre. 41

Cuadro 1.3-2: Cuencas hidrográficas de la XV Región 43

Cuadro 1.3-3: Registro histórico de los mayores sismos ocurridos en la zona de estudio 46

Cuadro 1.3-4: Inventario de inundaciones y remociones en masa históricas 59

Cuadro 1.5-1: Recomendación de criterios para la zonificación en áreas de riesgo..... 82

Cuadro 2.1-1: Peligros asociados al volcanismo..... 103



1 ESTUDIO FUNDADO DE RIESGOS

1.1 INTRODUCCION

El presente capítulo corresponde al estudio fundado de riesgos geológicos de las localidades de la comuna de Putre sujetas a planificación urbana, el que se enmarca dentro de la "Modificación del Plan Regulador Comunal de Putre". Este estudio ha sido solicitado por la Secretaría Regional Ministerial de Vivienda y Urbanismo, Región de Arica y Parinacota y tiene como objetivo reunir información acerca de los peligros geológicos que afectan a la comuna para la toma de decisiones con respecto al uso del territorio.

1.1.1 Ubicación Área de Estudio

La comuna de Putre se ubica en el sector oriental de la XV Región de Arica y Parinacota, en la provincia de Parinacota. La comuna se encuentra ubicada entre los 18° 00' y 18° 15' de Latitud y 69° 30' y 69° 45' de Longitud, y cuenta con una superficie de 5.902,5 km². La comuna limita al norte con la comuna de General Lagos, al oeste con las comunas de Arica y Camarones, al sur de la Comuna de Colchane y al este con la República de Bolivia (Ilustración 1-1).

Este trabajo se enfoca en dos áreas de estudio de detalle de la comuna de Putre que comprenden las localidades de Putre y de Zapahuira (Ilustración 1-2). La localidad de Putre, capital administrativa de la provincia de Parinacota y de la comuna de Putre, está ubicada en la precordillera de la comuna a 3.500 m.s.n.m. y distante a 145 km de Arica. Se accede por Ruta Ch-11 y desvío Ruta A-147. La localidad de Zapahuira se encuentra a 110 kilómetros de la capital regional. Este poblado está ubicado en la ladera sur de una pequeña quebrada, donde al norte se encuentran los cerros Calvario y Chapicollo. Los caminos, tanto los llamados "camino Inca" y "caminos troperos" como la Ruta 11-CH, en su mayoría, cruzan el poblado.

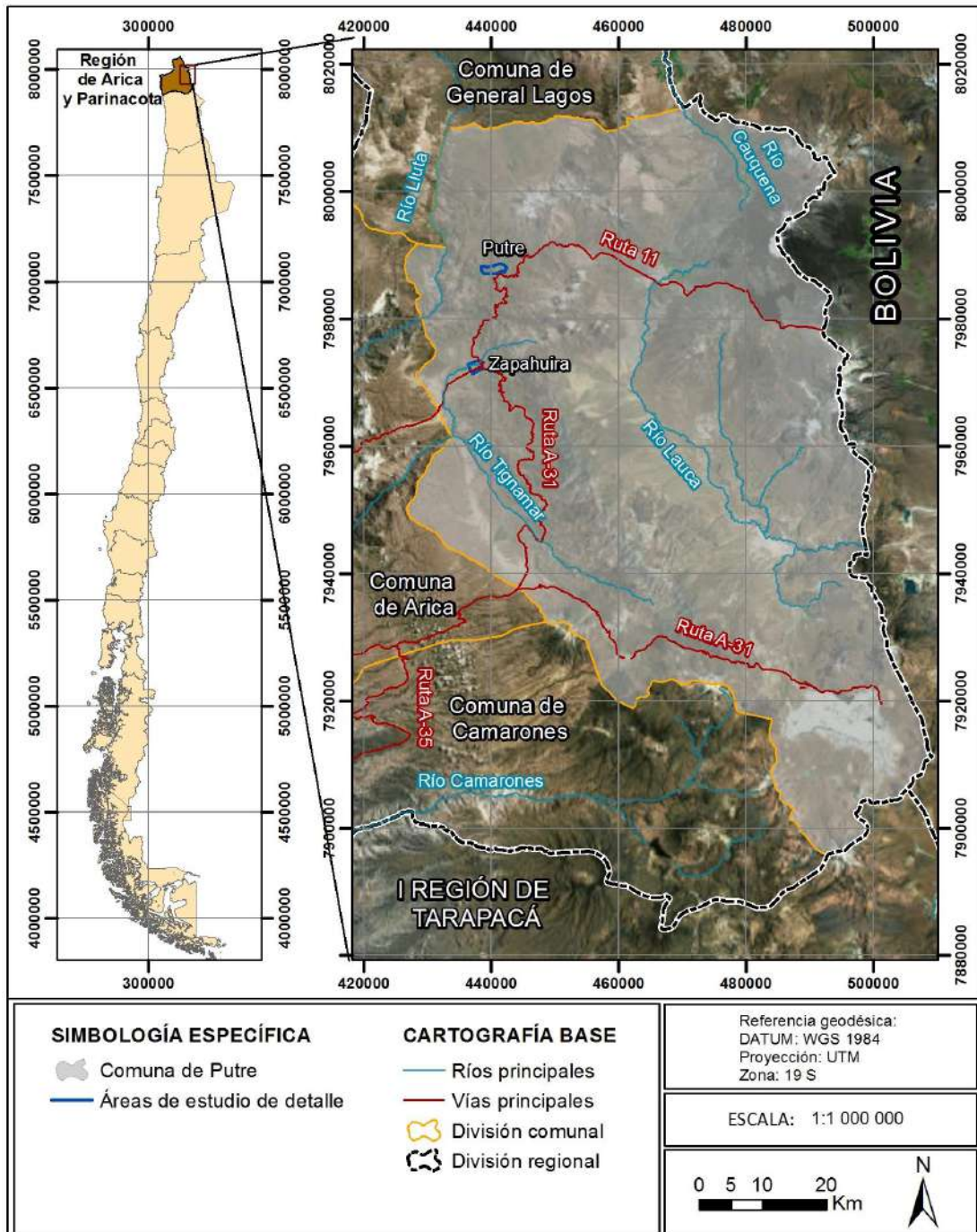
1.1.2 Objetivo

El objetivo principal de este trabajo es generar el Estudio Fundado de Riesgos Geológicos que acompañe y entregue criterios para la modificación del Plan Regulador Comunal de Putre. Asociado al objetivo propuesto es necesario reconocer y delimitar las áreas de riesgos, de acuerdo a los criterios y definiciones expuestos en el artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, que han de ser incorporadas y/o adecuadas en el Plan Regulador Comunal de Putre.

El objetivo específico de esta etapa del proyecto consiste en la elaboración de una línea base geológica y geomorfológica regional, además de un inventario, descripción y diagnóstico de los principales peligros geológicos que pueden

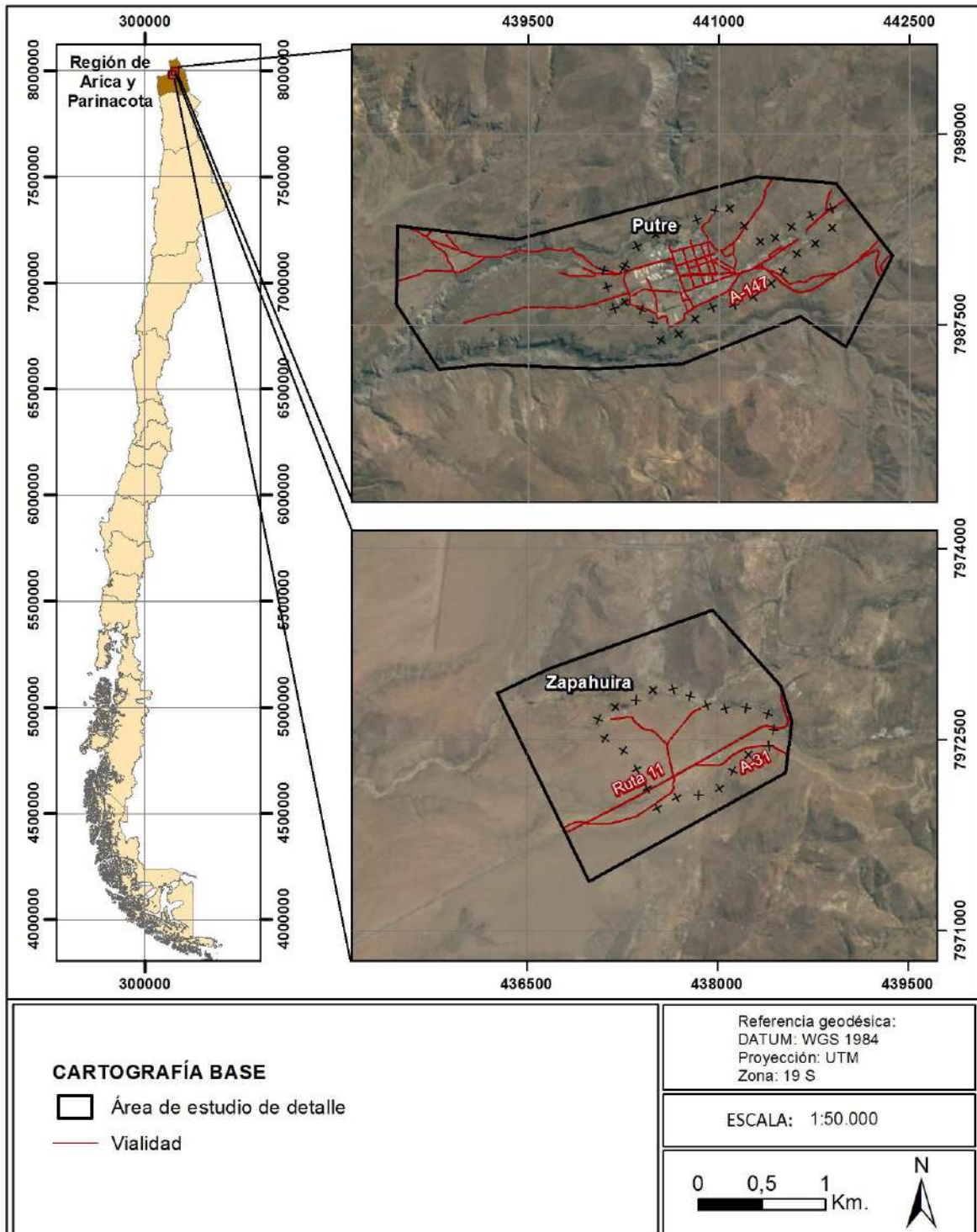
afectar al área y una zonificación de susceptibilidad para los peligros geológicos identificados en las áreas de detalle de este estudio.

Ilustración 1-1: Ubicación de la comuna de Putre.



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 1-2: Ubicación de las áreas de estudio de detalle que comprenden las localidades de Putre y de Zapahuira.



Fuente: Elaboración propia

1.1.3 Alcance y limitaciones

Para esta etapa del trabajo, se realizó una compilación de referencias bibliográficas, antecedentes históricos, revisión de imágenes satelitales, visita a terreno y la evaluación de los distintos factores condicionantes. Estos corresponden a insumos para realizar la zonificación de peligros geológicos en las dos áreas de estudio de detalle, que incluyen a las localidades de Putre y Zapahuira. La zonificación se realizó de acuerdo a las definiciones presentadas en el ANEXO 2.1, a una escala 1:5.000. 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 llevó a cabo ningún análisis riguroso de períodos de retorno (peligrosidad o amenaza) o de consideraciones socio-económicas (vulnerabilidad) de acuerdo a estándares internacionales, por lo que los mapas entregados corresponden a mapas de susceptibilidad y de factores condicionantes (ver las definiciones presentadas en el ANEXO 2.1).

El resultado de este estudio corresponde a mapas de factores condicionantes, principalmente morfológicos y geológicos, y mapas inventarios de los diferentes peligros geológicos identificados. A partir del análisis de estos, se generaron mapas de susceptibilidad de caídas de rocas, deslizamientos, retroceso de laderas y flujos e inundaciones a escala 1:5.000 (en planos fuera de texto) en las dos áreas de estudio de detalle.

1.1.4 Marco Jurídico

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

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

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

En el Cuadro 1.1-1 se presentan los peligros naturales identificados por el artículo 2.1.17 de la OGUC y la homologación con la nomenclatura internacional utilizada por este informe¹. A continuación, se desglosa donde se presenta la definición de estos peligros geológicos y los criterios de zonificación utilizados.

Apartado 1 del artículo 2.1.17 de la OGUC: 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, el Apartado 1 del artículo 2.1.17 de la OGUC corresponde a los peligros geológicos de inundación, ya sea continental o costera. Este tópico que se explica conceptualmente en el Anexo 2.1b)i) "Inundaciones Terrestres y Litorales".

- Apartado 2 del artículo 2.1.17 de la OGUC: Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas.

El Apartado 2 del artículo 2.1.17 de la OGUC corresponde a los peligros geológicos de remociones en masa (caída de bloques y flujos de barro y detritos) y los procesos litorales de erosión acentuada. Estos se explican conceptualmente en el Anexo B.2.2 "Procesos de Remoción en Masa".

- Apartado 3 del artículo 2.1.17 de la OGUC: Zonas con riesgo de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas.

Dentro de este apartado definido por la OGUC se analizan conceptualmente los procesos endógenos internos de la tierra, descritos en el Anexo de "Sismicidad" y Anexo de "Volcanismo".

¹La nomenclatura utilizada en este informe se basa en las definiciones propuesta por la ONU, UNESCO y SERNAGEOMIN, entre otros (ver Varnes (1984), ONU/EIRD (2004), PMA-GAC (2008) JTC-1 (2008)).

Cuadro 1.1-1: Cuadro de homologación "áreas de riesgo" según el artículo 2.1.17 del OGUC

"Áreas de riesgo" según artículo 2.1.17 de la OGUC	Peligros Geológicos estudiados en este informe	
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		Inundación por desborde de cauces
		Anegamiento
2. Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas	Remociones en masa	Flujo de barro y detritos.
		Caída de bloques
		Deslizamientos
		Retroceso de laderas
3. Zonas con peligro de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas	Sismicidad	
	Volcanismo	Flujos de piroclastos
		Caída de piroclastos
		Coladas de lava

Fuente: Elaboración propia en base a la normativa 2.1.17.

1.2 METODOLOGÍA

Con el fin de generar mapas de susceptibilidad para los sectores de interés de la comuna de Putre, en orden de dar cumplimiento al Artículo 2.1.17 de la OGUC, se realizaron las siguientes tareas, las que se encuentran resumidas en Ilustración 1-3: Diagrama de flujo del trabajo realizado.

- Definición del Estudio. Elección de la escala de trabajo y área a analizar.
- Elaboración de una línea de base geológica y geomorfológica. El objetivo de este punto fue identificar los distintos depósitos no consolidados, esto es, depósitos aluviales activos e inactivos, depósitos fluviales activos e inactivos, depósitos coluviales y depósitos de remoción en masa. Además, se identificaron las distintas unidades de rocas que afloran en los sectores.
- Visita técnicas de terreno al área de estudio.
- Inventario de Peligros Geológicos: En esta tarea se recopiló los distintos peligros geológicos que han afectado a las localidades de Putre y Zapahuira y a las zonas aledañas, con la finalidad de identificarlos, ubicarlos espacialmente y ordenarlos cronológicamente.
- Catastro de Factores Condicionantes. Se reunió información acerca de los factores intrínsecos (propios del medio físico) que condicionan la ocurrencia de un peligro geológico.

- Zonificación de susceptibilidad de peligros geológicos. Contempla la zonificación de peligro volcánico, de caídas de rocas, de deslizamientos, de retroceso de laderas y de flujos e inundaciones para las áreas de estudio de detalle de Putre y Zapahuira.

Finalmente, toda esta información fue utilizada para la elaboración de mapas de susceptibilidad para cada peligro geológico identificado en las áreas de estudio de detalle. A continuación, se detalla la metodología específica utilizada en cada una de las tareas nombradas previamente.

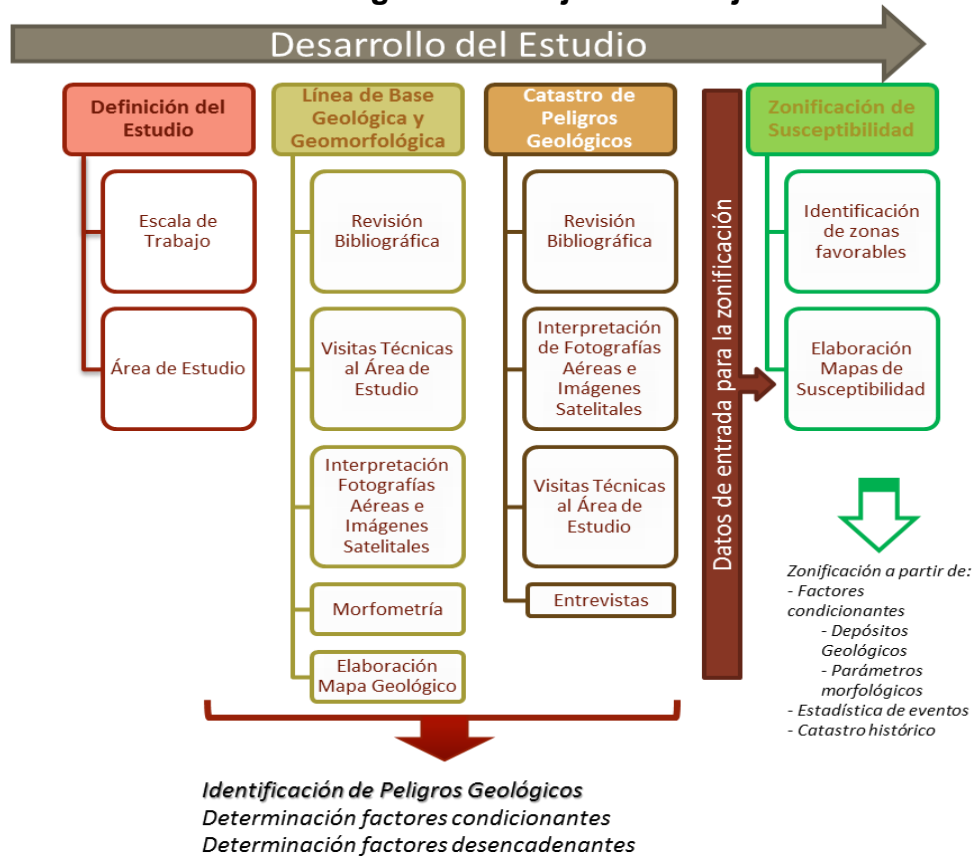
a) Definición del Área de Estudio.

El área de estudio corresponde a la comuna de Putre, con énfasis en dos áreas de estudio de detalle que comprenden las localidades de Putre y de Zapahuira. La escala de análisis elegida para el desarrollo del estudio corresponde a la escala 1:1800.000 para la comuna y una escala 1:5.000 para los dos sectores de detalle propuestos por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) de la Región de Arica Parinacota.

b) Elaboración de la línea de base geológica y geomorfológica

Las caracterizaciones geológica y geomorfológica se realizaron simultáneamente, utilizando los siguientes criterios:

- Recopilación Bibliográfica.
- Interpretación de imágenes satelitales.
- Morfometría.
- Elaboración mapa geológico y geomorfológico.

Ilustración 1-3: Diagrama de flujo del trabajo realizado

Fuente: Elaboración Propia.

i) Recopilación Bibliográfica

Esta actividad incluyó tanto la recepción de la información provista por el mandante como la búsqueda de antecedentes en otras instituciones. Para la recopilación de información, se revisaron diversas fuentes, entre las que se incluyen publicaciones científicas e información generada por entidades públicas (SERNAGEOMIN, DGA, MINVU, MUNICIPALIDAD, etc.). El objetivo de esta búsqueda fue compilar la siguiente información:

- Cartografía base
- Imágenes satelitales
- Modelos de Elevación
- Caracterización geológica y geomorfológica

La cartografía base utilizada para estudiar la comuna de Putre corresponde a las cartas regulares del Instituto Geográfico Militar (IGM), que incluyen información a escala 1:50.000 de la Región de Arica y Parinacota sobre hidrografía, vialidad, cuencas, etc. Para analizar las áreas de estudio de detalle, se utilizó la cartografía base otorgada por Habiterra.

Las imágenes satelitales utilizadas corresponden a los catálogos de imágenes de Google Earth © y Bing Maps ©, que cubren distintos períodos de tiempo desde el año 1999 hasta el 2014; esto entrega casi 15 años de registro de imágenes satelitales.

Simultáneamente, se utilizó un Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés) SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), con un tamaño de celda de 30 m/pixel², para analizar la zona a nivel regional. El DEM corresponde a una matriz que contiene la información topográfica básica (elevación) que permitió estimar los parámetros morfométricos. Además, se construyó un DEM a partir de la información topográfica (curvas de nivel cada 2 m) entregada por Habiterra.

La caracterización geológica y geomorfológica se realizó simultáneamente. Para ello se usó como base la Hoja Arica a escala 1:250.000 elaborada por García et al (2004), y la geología del Complejo Volcánico Taapaca escala 1:50.000 elaborada por Clavero y Sparks (2005), complementado con la información del Mapa Geológico de Chile a escala 1:1.000.000 desarrollado por SERNAGEOMIN (2003). El análisis y evaluación de las estructuras geológicas se realizó a partir de la información bibliográfica disponible: PMA-GCA (2008) y SERNAGEOMIN (2003).

La información recopilada corresponde a la información base que es analizada en el presente estudio, y es presentada como lista de referencias en el Capítulo 1.6 "REFERENCIAS". Además, la información fue sistematizada y georeferenciada en un Sistema de Información Geográfico.

ii) Interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales

Las imágenes satelitales recopiladas fueron analizadas, con el objetivo de complementar la información obtenida en terreno, la recopilación bibliográfica y el análisis morfométrico. La interpretación de imágenes satélites permitió delimitar los principales contactos entre el basamento rocoso y depósitos no consolidados activos e inactivos, tales como depósitos aluviales, depósitos coluviales, depósitos lacustres y gravas. Además, se identificaron los abanicos aluviales aportantes a las áreas de estudio de detalle, así como los cauces que han canalizado flujos superficiales en el pasado.

iii) Morfometría

Los mapas morfométricos fueron derivados del modelo de elevación digital SRTM de 30 m/pixel. Con el fin de estudiar la comuna a nivel regional, se generaron cartas para diferentes parámetros morfométricos: cartas de pendiente, exposición de ladera y relieve sombreado. Para las áreas de estudio de detalle de Putre y Zapahuiria, se construyeron cartas para los mismos parámetros morfométricos, pues la escala de análisis en estos sectores es mayor. Estos mapas fueron utilizados como apoyo para la identificación de las principales formas del terreno

(geomorfología) y los depósitos no consolidados. Además, durante el desarrollo del estudio, los parámetros morfométricos analizados fueron considerados como un factor condicionante para la elaboración de mapas de susceptibilidad.

iv) **Elaboración mapa geológico y geomorfológico**

El mapa geológico tiene como objetivo identificar a las unidades de roca y a los depósitos sedimentarios no consolidados ubicados en el área de estudio. En el mapa geológico se da énfasis en la identificación de:

- Unidades de roca: corresponden a los afloramientos rocosos, los que serán clasificados de acuerdo a su edad y litología, y de ser posible, respecto a la calidad geotécnica del macizo rocoso.
- Depósitos sedimentarios: corresponde a sedimentos total o parcialmente consolidados. Al desarrollar el mapa geológico se da énfasis en los depósitos sedimentarios dado que son el producto de procesos de remoción en masa e inundaciones, esto es, depósitos aluviales activos e inactivos, depósitos fluviales activos e inactivos, depósitos coluviales y las zonas de generación de coluvio.
- Depósitos volcánicos recientes: producto de erupciones volcánicas, tales como depósitos de caída de ceniza, depósitos de flujos piroclásticos, depósitos de lahares y coladas de lava.

El mapa geomorfológico identifica las principales formas del terreno. Los mapas geológico y geomorfológico son utilizados en este informe como una cartografía de factores condicionantes, dado que permiten identificar:

- Zonas donde el macizo rocoso presenta una mala calidad que favorece la generación de procesos de remoción.
- Zonas donde se producen continuamente procesos de remoción en masa, tales como zonas de abanicos aluviales o conos de deyección coluviales.
- Zonas escarpadas, donde se producen continuamente procesos de remoción en masa que generan retroceso de laderas.
- Cauces activos y llanuras de inundación, que son afectadas continuamente por procesos de inundación por desborde de cauce.
- Zonas bajas y deprimidas, las que periódicamente son afectadas por anegamientos.
- Distintos niveles de terraza, que permiten ordenar de manera relativa qué sectores se inundarán primero y cuáles después, en caso de una inundación por desborde de cauce.

Toda esta información fue complementada con el trabajo realizado en terreno y con la información recopilada en entrevistas realizadas a los habitantes de las localidades en estudio.

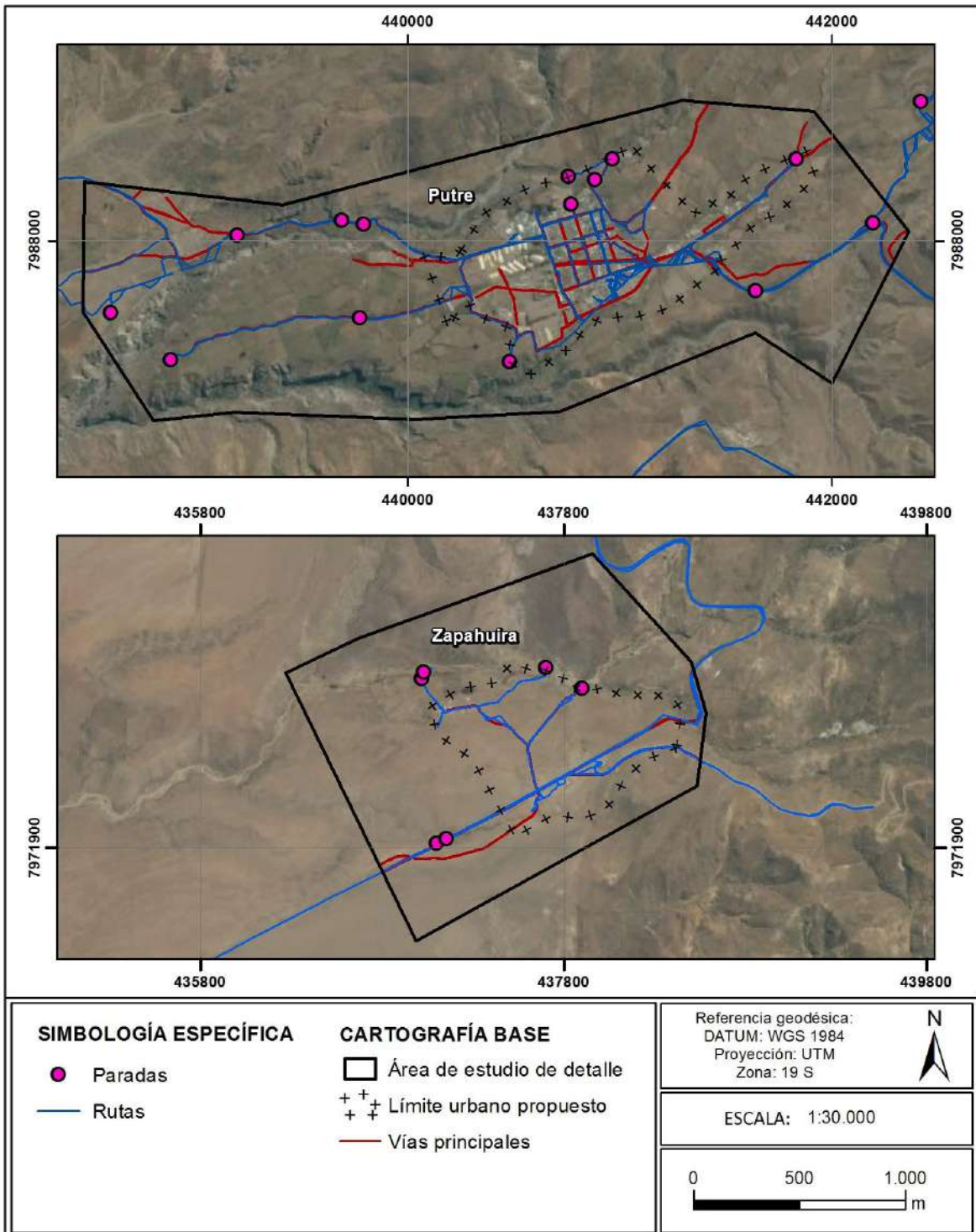
c) Visita técnica al área de estudio

Se realizó una visita a terreno al área de estudio durante los días 16, 17 y 18 de diciembre de 2014 que consistió en un recorrido de la zona, con énfasis en los siguientes objetivos:

- Complementar y validar la información geológica obtenida en la recopilación bibliográfica.
- Validar y renovar la información relacionada al reconocimiento de zonas susceptibles a ser afectadas por caídas de rocas, deslizamientos, retroceso de laderas y flujos de detritos o inundaciones.

Las paradas y los recorridos realizados la visita a terreno se muestran en la Ilustración 1-4e incluyeron varios puntos de observación de detalle que fueron registrados mediante fotografías y en planos.

Ilustración 1-4: Recorrido realizado durante la visita a terreno
 Áreas de detalle de Putre y Zapahuira entre los días 16 y 18 de diciembre del 2014



Fuente: Elaboración Propia.

d) **Inventario de Peligros Geológicos**

El inventario de peligros geológicos se realizó en base a una recopilación de antecedentes bibliográficos y registros históricos. 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.

Los peligros geológicos catastrados corresponden a aquellos contenidos dentro del artículo 2.1.17 de la OGUC, y fueron tratados con los nombres explicados en la Sección 1.1.4 "Marco Jurídico".

Los peligros geológicos analizados corresponden a:

- Procesos Endógenos: Actividad volcánica.
- Procesos Endógenos: Actividad sísmica.
- Procesos Exógenos: Remociones en masa.
- Procesos Exógenos: Inundaciones terrestres.

Para la recopilación de información, se revisaron los antecedentes históricos de publicaciones científicas y libros, tales como por ejemplo Urrutia y Lanza (1993), González-Ferrán (1995), publicaciones del SERNAGEOMIN, entre otros, y se realizaron entrevistas a habitantes de los sectores estudiados. Las fuentes bibliográficas consultadas para catastrar cada tipo de peligro geológico fueron las siguientes:

- Catastro de sismos e intensidades reportadas para distintos terremotos históricos. La generación del catastro de eventos sísmicos se realizó en base a recopilaciones históricas y de publicaciones científicas (Suárez y Comte (1993), Belmonte-Pool (1997), Tassara et al., (2006), Urrutia y Lanza (1993), entre otros). 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)³. 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.
- Catastro de centros volcánicos. Para los eventos volcánicos se revisaron las fechas de registro de actividad y catastros de centros volcánicos presentados en Urrutia y Lanza (1993), González-Ferrán (1995), Clavero (2002), Clavero et. (2002) y García et al. (2004)
- Catastro histórico de fenómenos de remociones en masa y de inundaciones y anegamientos en la zona: Se recopilieron datos de los procesos de

³Disponible en línea en: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/>
SEREMI REGION ARICA Y PARINACOTA
SOTOMAYOR 216
Teléfono 58 - 202501 Arica

remoción en masa a partir de la revisión bibliográfica de Urrutia y Lanza (1993), de antecedentes expuestos en el Plan de Desarrollo Comunal de Putre (I.M. de Putre, 2008), del catálogo DESINVENTAR (Sistema de Inventario de Efectos de Desastres) y de diarios locales.

La información recopilada es presentada en el Capítulo 1.3.2 "Inventario de Peligros Geológicos". Además, cuando la calidad de la información lo permitió, la información fue parcialmente sistematizada y georeferenciada en un Sistema de Información Geográfico.

e) Catastro de Factores Condicionantes

A partir de la línea de base geológica y geomorfológica, y el inventario de peligros geológicos, se identifican de manera preliminar una serie de factores considerados condicionantes para la ocurrencia de remociones en masa e inundaciones en las áreas de estudio de detalle. Esto con el objetivo de determinar posteriormente cuáles son las áreas más susceptibles a ser afectadas por este tipo de eventos. Para ello, se recopiló una serie de mapas de factores considerados condicionantes para la ocurrencia de un peligro geológico dado, como mapas de elevación, de pendiente y de dirección de drenaje de la ladera (exposición). Fueron elaborados a partir del modelo de elevación digital construido con la información topográfica (curvas de nivel cada 2 m) otorgada por Habitterra.

f) Diagnóstico de Susceptibilidad

De acuerdo a los objetivos planteados en esta etapa, se contempla una zonificación de susceptibilidad a los peligros geológicos que puedan afectar a las áreas de estudio de detalle, a escala 1:5.000.

Con base en la interpretación de imágenes satelitales, en la geología y la geomorfología de la zona y en la información recopilada durante la visita a terreno, se establecieron tres categorías de susceptibilidad: "Muy Alta, "Alta" y "Moderada". Estas categorías están asociadas a los procesos de caídas de rocas, deslizamientos, retroceso de laderas y flujos o inundaciones, cuyos criterios de clasificación están señalados en la Sección 1.4b).

1.3 LÍNEA DE BASE

a) Marco Geodinámico

Chile se ubica en un margen convergente de placas tipo océano-continente, donde la Placa Oceánica de Nazca subducta a la Placa Continental Sudamericana bajo su margen occidental, con una tasa actual de convergencia se estima en 8 cm/año (DeMets, et al., 1994), activa al menos desde, el Jurásico (Ramos, et al. (1986), 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).

La zona ubicada al norte de los 27°S, dentro del esquema de segmentación andina de Mpodozis y Ramos (1989), se identifica como una zona de subducción normal con un ángulo de subducción de aproximadamente 30°. El margen oeste de la placa Sudamericana tiene un rumbo aproximado NS a lo largo de toda la región, desde los 18,5°S, en la zona denominada "codo de Arica", hacia el sur. Al norte de esta latitud cambia su orientación a NW. Las principales unidades morfoestructurales que constituyen el margen continental chileno en esta zona corresponden, de oeste a este, a: la Cordillera de la Costa, la Depresión Central, la Cordillera Occidental y el Altiplano; más hacia el este se desarrollan, además, la Cordillera Oriental seguida de las Sierras Subandinas, que enfrentan el Cratón Brasileño. La Cordillera Occidental y, en menor medida, el Altiplano y la Cordillera Oriental, son las unidades que hospedan el actual arco volcánico activo.

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

Ilustración 1-5: Marco geodinámico.

El Codo de Arica se encuentra ubicado aproximadamente a los 18.5°S. La fosa Perú – Chile se muestra en la línea blanca con triángulos y representa al margen entre las placas de Nazca y Sudamericana. La velocidad de convergencia entre las dos placas es de aproximadamente 7 cm/año.



Fuente: Elaboración propia.

b) Marco Geomorfológico

El relieve de gran escala actual en la zona es producto del alzamiento de la Cordillera de Los Andes, que se asume iniciado en el Mioceno Superior (Charrier, et al., 2005). Para este relieve a la latitud de la comuna de Putre, se diferencian cinco unidades fisiográficas mayores o unidades morfoestructurales, que corresponden de este a oeste a: Altiplano, Cordillera Occidental, Precordillera, Depresión Central y Cordillera de la Costa. Las unidades anteriormente mencionadas se encuentran limitadas por sistemas de fallas y otras estructuras de orientación principal norte – sur.

i) Morfometría

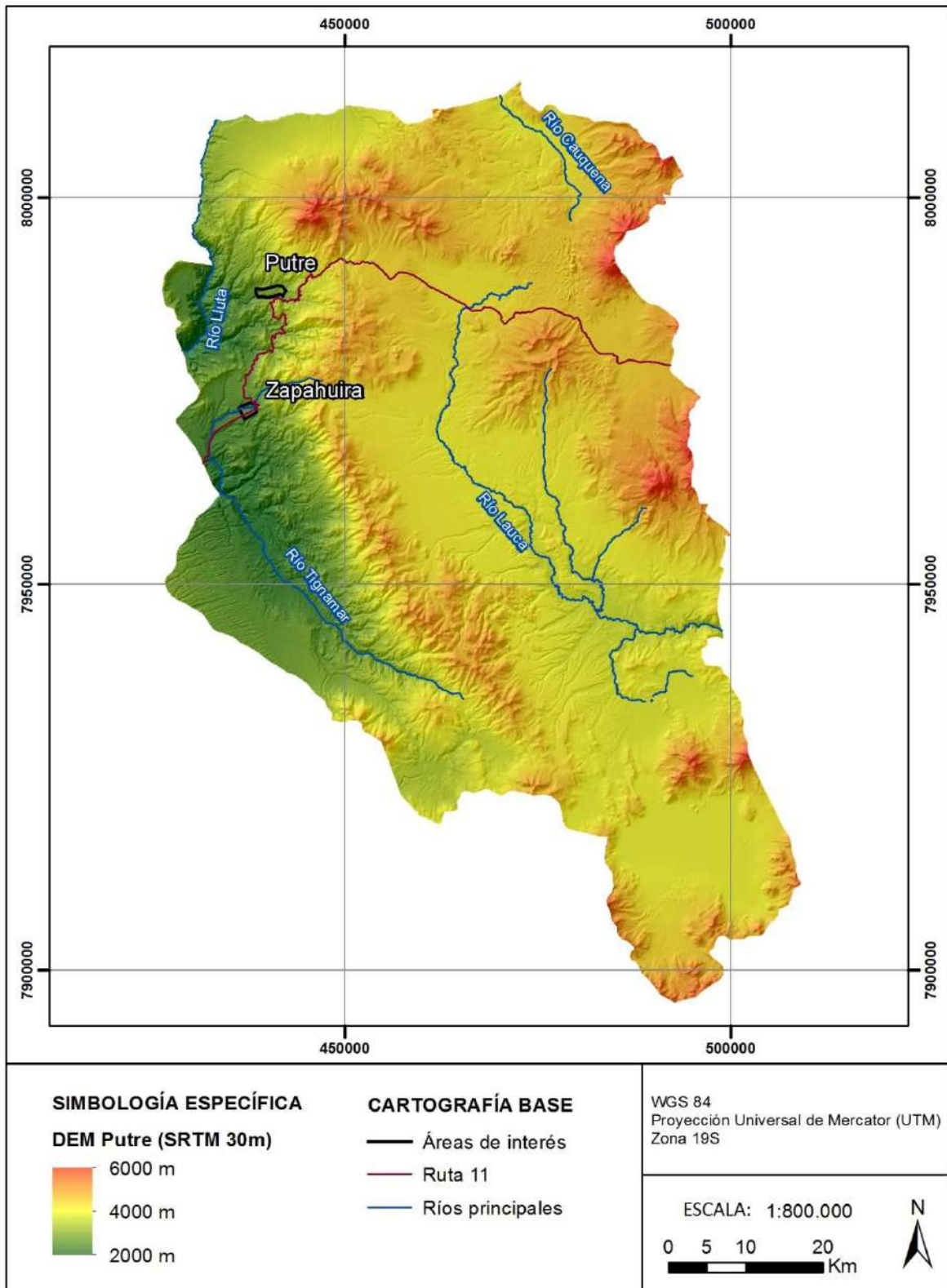
Las áreas de estudio de detalle ubicadas en Putre y Zapahuira se encuentran ubicadas en el límite entre la Precordillera y la Cordillera Occidental; comprenden alturas que van entre los 2.000 y 4.000 ms.n.m.aproximadamente (. El relieve de la zona es irregular, con presencia de quebradas, planicies y cerros. Los principales desniveles en la topografía se relacionan con las profundas incisiones de las quebradas Lluta y Azapa, que superan los 1.000 m, y con las cumbres de los volcanes del sector que se presentan como macizos con aproximadamente 1.500 m de desnivel por sobre la altitud promedio de la zona.

En términos de pendientes, la zona se caracteriza por ser igualmente muy heterogénea, con zonas de pendientes muy bajas representadas por “planicies”

que están relacionadas con grandes mantos de depósitos volcánicos tipo ignimbritas. Las mayores pendientes se ubican en las laderas del Río Lluta, que localmente alcanzan inclinaciones superiores a 50° , y son producto de la incisión fluvial de los cursos de agua. Esta incisión ha sido continua desde el Mioceno Superior (entre 19 y 12 Ma) hasta el presente, pero con tasas estimadas que varían entre 0.03 mm/año, al comienzo del desarrollo de Los Andes, y 0.4 mm/año, que se relacionan a los períodos de más rápido alzamiento de la cordillera (García & Hérail, 2005). Pendientes mayores a 30° también se encuentran en las cumbres y cordones de cerros, como en las laderas asociadas a la franja precordillerana, al oeste de Putre y de Zapahuira (Ilustración 1-7).

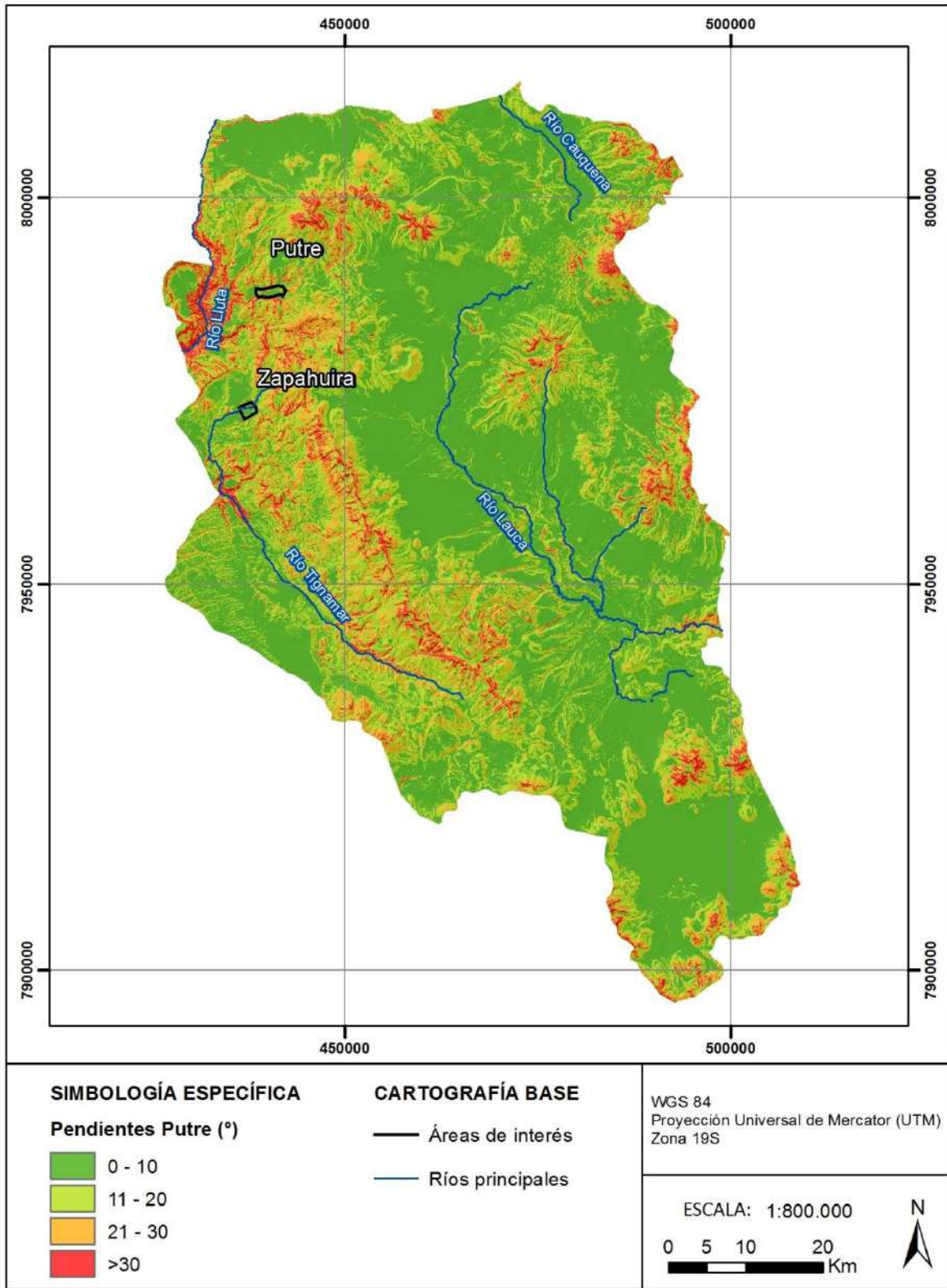
En la Ilustración 1-7 y la Ilustración 1-8, se presentan la carta de elevaciones, de pendientes y de exposición de laderas, respectivamente.

Ilustración 1-6: Carta de elevaciones en la comuna de Putre



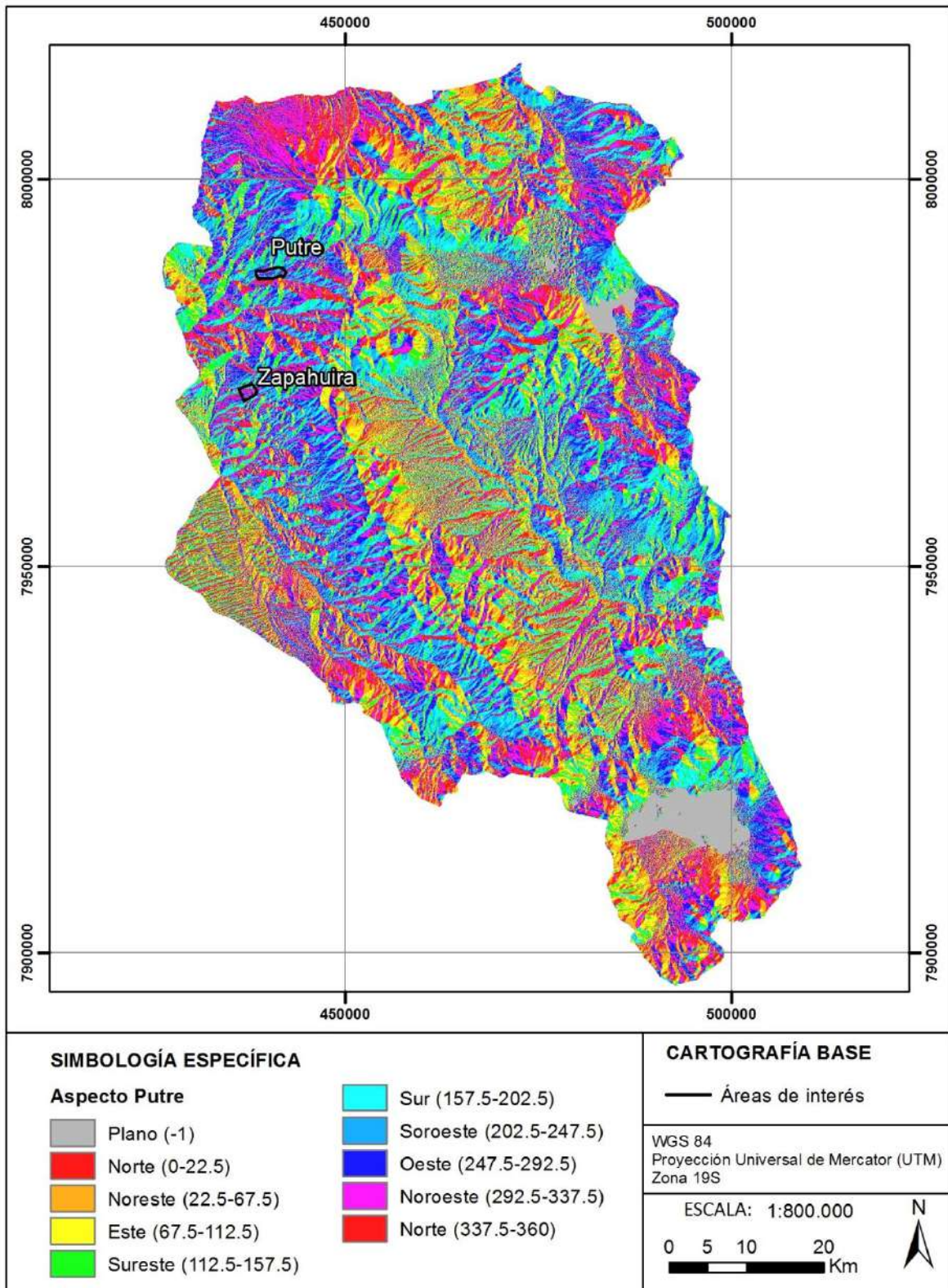
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 1-7: Carta de pendientes en la comuna de Putre



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 1-8: Carta de aspecto en la comuna de Putre

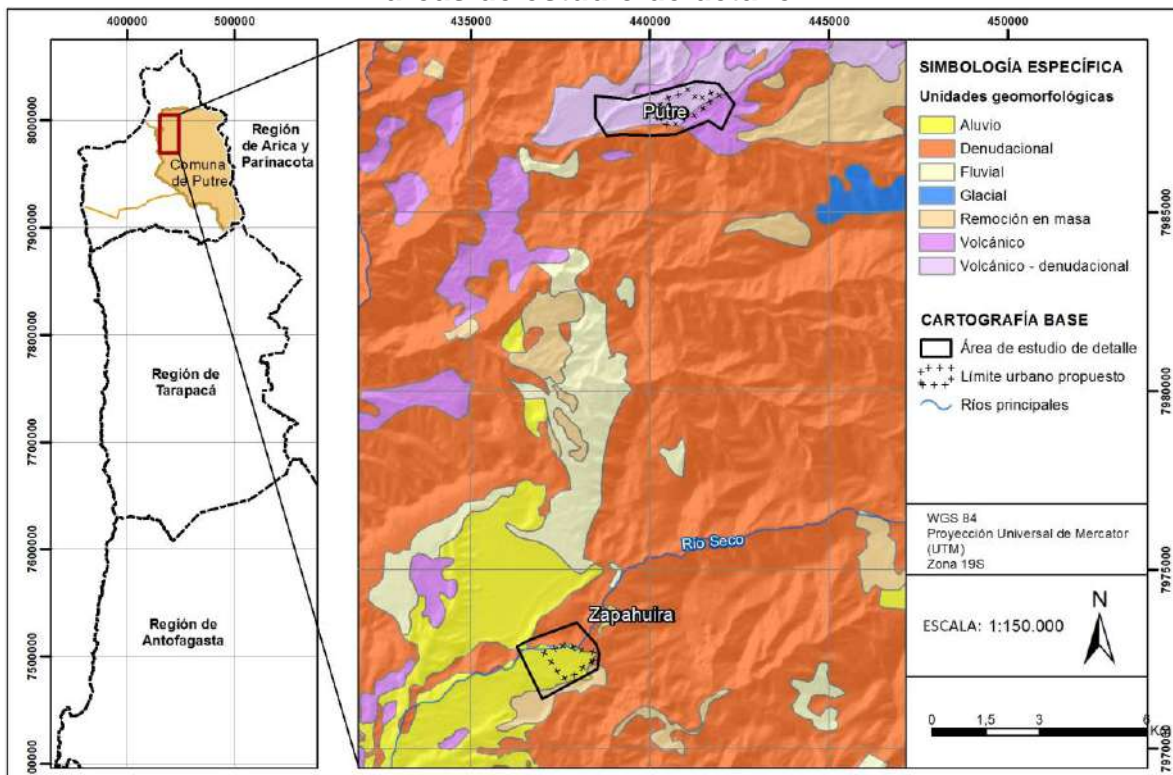


Fuente: Elaboración propia

ii) Unidades geomorfológicas locales

Los procesos que en el presente están actuando sobre el paisaje, se presentan en la **Ilustración 1-9**. La mayor parte de la zona, en especial las unidades de roca, está siendo afectada por erosión dando origen a formas denudacionales y erosivas. Las rocas volcánicas del Mioceno superior y más jóvenes se presentan en edificios volcánicos. Las unidades de depositación volcánica como lavas e ignimbritas son también frecuentes en la zona; en general, son unidades de un rango de edad que va del Mioceno (25 Ma) hasta el presente. Los procesos y depósitos glaciares se encuentran en las partes altas, mientras que depósitos fluviales, coluviales y aluviales se encuentran en las zonas medias y bajas, principalmente asociados a la erosión y transporte de material producto de erosión y actuando de manera intermitente, regulado por la extrema variabilidad climática entre las diferentes estaciones del año.

Ilustración 1-9: Unidades Geomorfológicas de la zona que comprende las áreas de estudio de detalle.



Fuente: Elaboración propia a partir de García et al. (2004)

c) Marco Geológico

El área comprendida por la comuna de Putre exhibe una geología que registra un amplio período de tiempo, desde el Proterozoico - Paleozoico a la actualidad y que presenta todos los tipos litológicos mayores, como son rocas sedimentarias, volcánicas, intrusivas y metamórficas (Ilustración 1-10).

Las rocas más antiguas que afloran en la comuna de Putre corresponden a rocas metamórficas del Proterozoico Superior – Paleozoico, que son esquistos, anfibolitas, gneises y ortogneises denominados Complejo Metamórfico de Belén. Estas rocas provienen del metamorfismo de rocas volcánicas y plutónicas, de una edad estimada de entre 1800 y 1400 Ma, y a los que se les ha calculado una edad de metamorfismo en el rango de 350 a 550 Ma (García, et al., 2004).

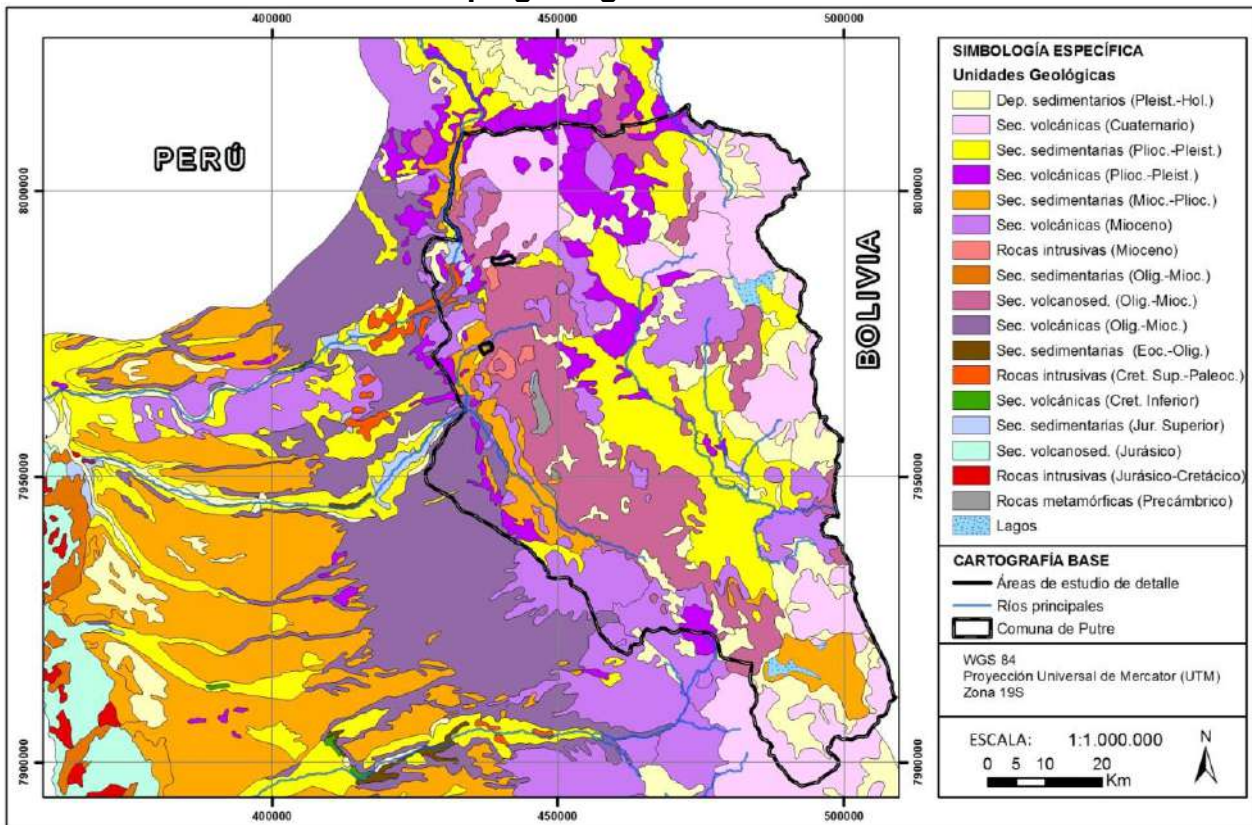
Las rocas que representan al Jurásico y Cretácico en el área corresponden a rocas sedimentarias bien estratificadas: lutitas, calizas, areniscas y limolitas, con intercalaciones de yeso, coquinas y chert, afectadas localmente por metamorfismo de contacto, producto del emplazamiento de cuerpos intrusivos más recientes; en algunos sectores, las calizas se encuentran marmolizadas. También en el área aparecen cuerpos intrusivos de edad cretácica que corresponden a dioritas y monzodioritas de grano medio conocidos como Intrusivos de Azapa, datados en aproximadamente 92 Ma², y además monzodioritas y granodioritas cuarcíferas, de grano medio a grueso, designadas como Intrusivos de Lluta y datados entre 66 y 54 Ma².

Entre las formaciones del Mesozoico y Paleoceno, y las que comprenden del Oligoceno al presente, existe una discordancia angular de carácter regional, que pone en contacto las primeras, más deformadas, con las segundas en disposición subhorizontal, y que muy probablemente esté relacionada con los cambios tectónicos que marcaron el inicio del alzamiento de la cordillera principal.

Durante el Oligoceno y Mioceno las unidades de roca evidencian un ambiente continental, en el que son predominantes los productos volcánicos. En los volcanes y centros eruptivos menores del Holoceno se encuentra representado el volcanismo más reciente ocurrido en el área, constituidos por lavas andesíticas y dacíticas, depósitos piroclásticos dacíticos y andesíticos, depósitos de avalancha de detritos volcánicos y domos dacíticos.



Ilustración 1-10: Mapa geológico de la comuna de Putre



Fuente: Elaboración propia a partir de SERNAGEOMIN (2003)

i) Geología de la localidad de Putre

La geología del área de estudio de detalle situada en Putre está constituida esencialmente por secuencias volcánicas del Plioceno al Holoceno que se encuentran cubiertas por depósitos no consolidados del-Holoceno, rellenando valles y quebradas, o situados al pie de laderas, como producto de procesos fluviales, aluviales y coluviales. De acuerdo a sus características litológicas y edades, estas rocas y depósitos han sido agrupados en una serie de unidades geológicas (Ilustración 1-10y Plano N°1, fuera de texto), las que se describen a continuación:

- *Sedimentos no consolidados*
Depósitos fluviales/aluviales (Holoceno)

Sedimentos genéticamente relacionados con cursos fluviales activos. Están constituidos por rípios, gravas y bloques de las unidades volcánicas aledañas. Los clastos son de tamaño métrico, angulosos a semiredondeados y en algunos sectores se encuentran imbricados. La matriz es limosa, arcillosa o cinerítica. Estos depósitos se acumulan a partir de la actividad de los ríos y de flujos de barro y detritos, gatillados muy probablemente por precipitaciones torrenciales.

Ilustración 1-11: Depósitos aluviales encontrados en la quebrada mayor inmediatamente al NNE de la localidad de Putre.



Fuente: Archivo fotográfico de terreno

- *Depósitos coluviales (Holoceno)*

Depósitos caóticos de talud, de origen gravitacional, constituidos por bloques angulosos, de tamaño hasta métrico, monomícticos, con escasa a nula matriz de arenas y limos. Se disponen principalmente al pie de laderas de fuerte pendiente (30° - 40°). En algunos sectores, se han desarrollado terrazas de cultivos sobre ellos (Ilustración 1-12).

Ilustración 1-12: Vista al suroeste de la quebrada Chucarlasuña, donde se distinguen la Unidad Tajane, la Unidad Putre y los depósitos coluviales.



Fuente: Archivo fotográfico de terreno

- *Depósitos de remoción en masa (Holoceno)*

Depósitos polimícticos, mal seleccionados, escasamente consolidados, con fragmentos principalmente angulosos a subangulosos, ubicados al pie de laderas y a lo largo de cursos fluviales.

- *Unidades de roca*

Unidad Putre (T4pb) (Holoceno; <9 ka AP) (Clavero & Sparks, 2005)

Secuencia de depósitos piroclásticos de composición dacítica, de hasta 30 m de espesor, distribuida esencialmente hacia los flancos sur y suroeste del Complejo Volcánico Taapaca. Compuesta principalmente por depósitos de bloques y ceniza, explosiones dirigidas ('blasts'), oleadas de nube acompañante ('ash-cloud surges'), flujos piroclásticos secundarios y delgados niveles de depósitos de caída co-ignimbríticos. En algunos sectores, se identifican bloques angulosos de andesita. El poblado de Putre se encuentra asentado sobre esta unidad.

Ilustración 1-13: Depósitos piroclásticos de la Unidad Putre encontrados en la quebrada Chucarlasuña.



Fuente: Archivo fotográfico de terreno

- *Unidad Socapave (T4sa/T4pb) (Pleistoceno superior-Holoceno; 25-9 ka)(Clavero & Sparks, 2005)*

Depósito de avalancha volcánica Socapave, brechoso y polimíctico con fragmentos de hasta 15 m de diámetro; se encuentra cubierto por depósitos piroclásticos de la Unidad Putre (espesor menor a 2 m), conservando morfología de cerrillos ('hummocks') muy pronunciada. Cabe destacar que el sector Altos de Putre se encuentra asentado sobre esta unidad.

- *Unidad Tajane (T4tb) (Pleistoceno medio a superior; 430-25 ka)(Clavero & Sparks, 2005)*

Secuencia de depósitos piroclásticos de hasta 80 m de espesor, distribuida hacia los flancos occidental y austral del Complejo Volcánico Taapaca, que forma los dos abanicos piroclásticos de mayor extensión del complejo. Está formada principalmente por bloques y ceniza y oleada de nube acompañante (Ilustración 1-14).

Ilustración 1-14: Depósitos cineríticos de la Unidad Tajane.



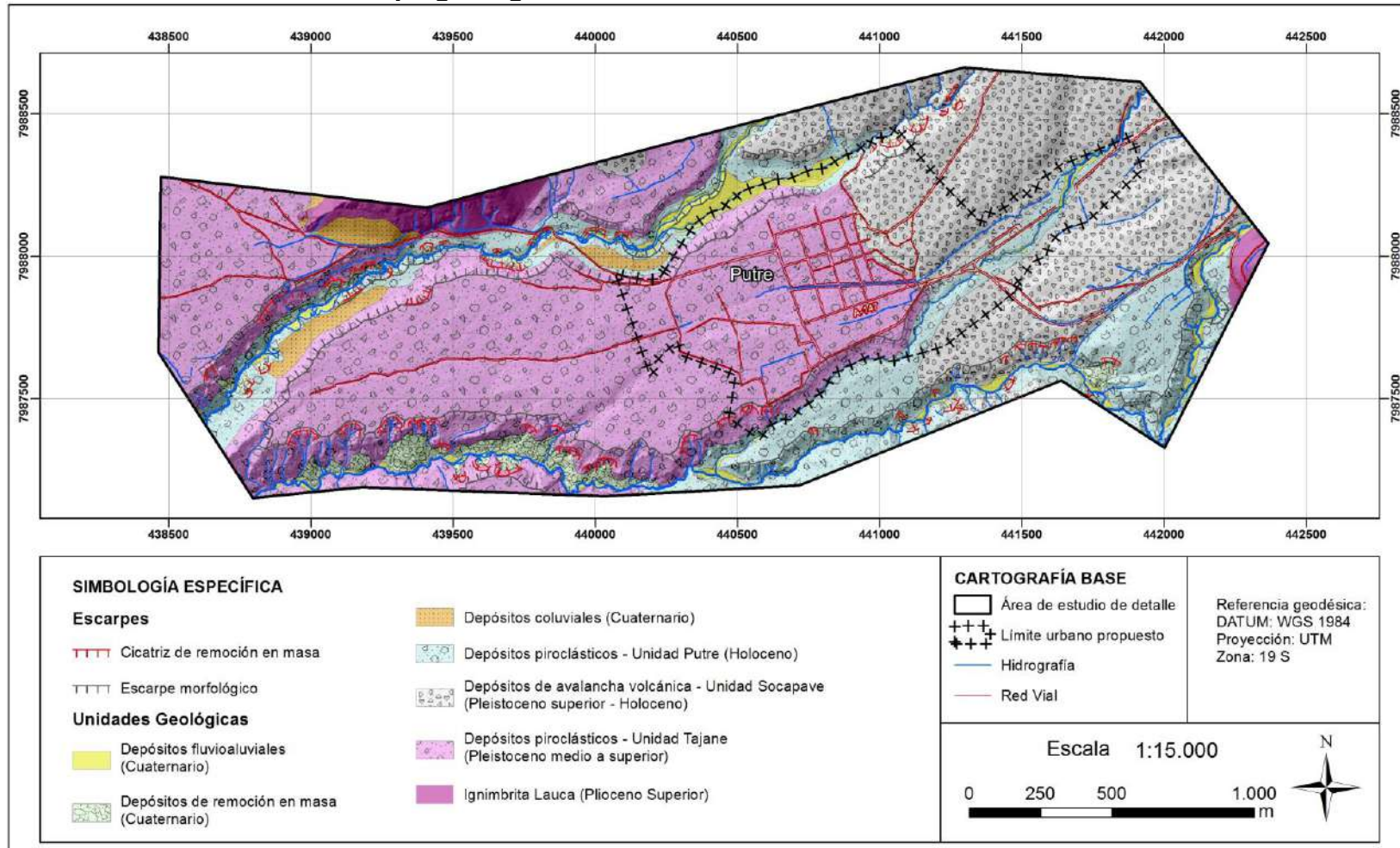
Fuente: Archivo fotográfico de terreno

- *Ignimbrita Lauca (Pil) (Plioceno superior)(Clavero & Sparks, 2005)*

Depósito de flujo piroclástico riodacítico con diversos grados de soldamiento y consolidación, de hasta 40 m de espesor en el área, formado por diversas proporciones de pómez (hasta 4 cm de diámetro), fragmentos líticos y ceniza. Localmente, desarrolla niveles de oleada piroclástica basal.



Ilustración 1-15: Mapa geológico del área de estudio de detalle en la localidad de Putre.



Fuente: Elaboración propia basada en Clavero y Sparks (2005)

ii) Geología de la localidad de Zapahuira

La geología del área de estudio de detalle situada en Zapahuira está constituida esencialmente por secuencias volcanosedimentarias del Oligoceno-Mioceno que se encuentran cubiertas por depósitos no consolidados del Cuaternario, rellenando valles y quebradas, o situados al pie de laderas, como producto de procesos fluviales, aluviales y coluviales. De acuerdo a sus características litológicas y edades, estas rocas y depósitos han sido agrupados en una serie de unidades geológicas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Plano N°2, fuera de texto), las que se describen a continuación:

- *Sedimentos no consolidados*

Depósitos fluviales/aluviales (Holoceno)

Sedimentos genéticamente relacionados con cursos fluviales activos. Están constituidos por ripios, gravas y bloques subredondeados a angulosos, con un tamaño que va desde los 8 cm hasta los 120 cm, con un promedio de 20 cm (Ilustración 1-16); en algunos sectores se encuentran imbricados.

Ilustración 1-16: Depósitos fluvioaluviales ubicados en la Quebrada Zapahuira.

Fuente: Archivo fotográfico de terreno

Depósitos coluviales (Holoceno)

Depósitos de talud, con bloques angulosos, de tamaño hasta métrico, monomícticos, con escasa a nula matriz. Se disponen, principalmente, al pie de laderas de fuerte pendiente (30° - 40°).

Depósitos de remoción en masa (Plioceno - Cuaternario)

Corresponden a depósitos de deslizamientos, polimícticos, mal seleccionados, escasamente consolidados, con fragmentos principalmente angulosos a subangulosos, ubicados al pie de laderas y a lo largo de cursos fluviales.

- *Unidades de roca*

Formación Huaylas (Mioceno Superior) (Salas et al., 1966; emend. García et al. 2004)

La Formación Huaylas está constituida, predominantemente, por depósitos sedimentarios detríticos semiconsolidados. La unidad que aflora en el área de estudio de detalle está formada por hasta 200 m de espesor de ripios, de grano fino a grueso, y gravas, semiconsolidados, de colores pardo, verde, gris claro y celeste, con intercalaciones de arenas y limos pardos rojizos. Los ripios y gravas, a menudo clastosoportados, son moderadamente seleccionados, y muestran paleocanales de ancho métrico. Están constituidos por clastos, en general imbricados, bien a moderadamente redondeados y pobremente esféricos. Estos clastos, de diámetro menor a 30 cm, corresponden principalmente a rocas volcánicas (andesíticas a riolíticas) y sedimentarias (en parte calcáreas) de la Formación Lupica (OMI) (García et al. (2004)). Cabe destacar que la localidad de Zapahuira se asienta sobre esta formación (Ilustración 1-17).

Formación Lupica (Oligoceno Superior-Mioceno Inferior) (Montecinos, 1963; emend. García et al. 2004)

La Formación Lupica corresponde a una sucesión volcánica continental de amplia distribución en la cordillera del área, que aflora en el sector norte del área de estudio de detalle de Zapahuira. Está constituida por lavas andesíticas y dacíticas, brechas y tobas ignimbríticas, dacíticas a riolíticas, con intercalaciones de rocas sedimentarias (brechas, areniscas, conglomerados, lutitas y calizas) presenta variaciones de espesor (va entre 1500 y 2500 m) y de ambientes de depositación, que permiten diferenciar cuatro miembros (García, et al., 2004), y dos de ellos se reconocen en el área de Zapahuira: uno en la zona inferior denominado "Lavas y brechas" datadas entre $25,7 \pm 1,4$ y $21,3 \pm 0,3$ Ma. Y otro miembro denominado "Ignimbritas y rocas sedimentarias de la parte media", datado en una edad entre $23,1 \pm 0,7$ y $18,7 \pm 0,7$ Ma (Mioceno Inferior).

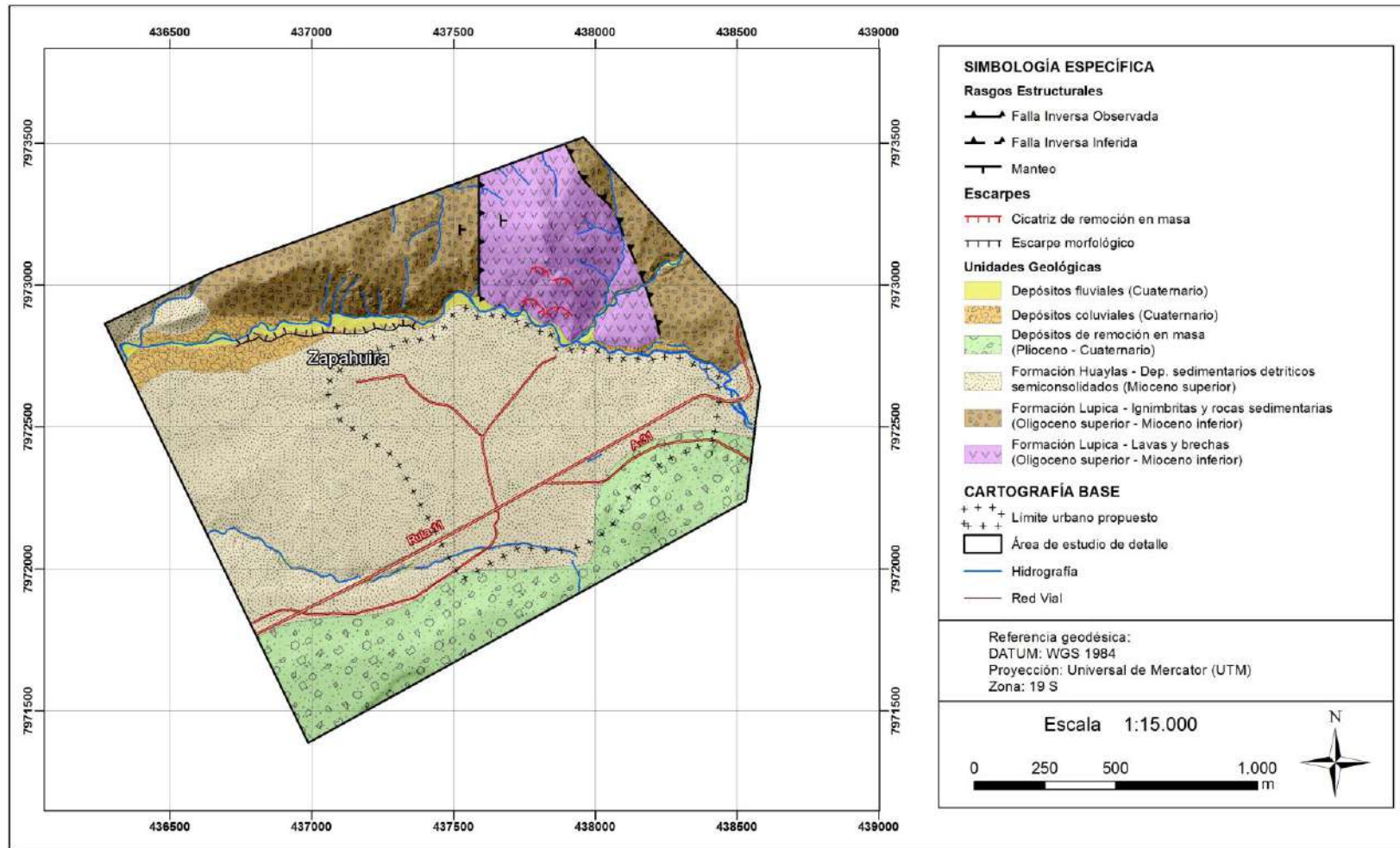
Ilustración 1-17: Localidad de Zapahuira asentada sobre la Formación Huaylas.



Fuente: Archivo fotográfico de terreno



Ilustración 1-18: Mapa geológico del área de estudio de detalle en la localidad de Zapahuira.



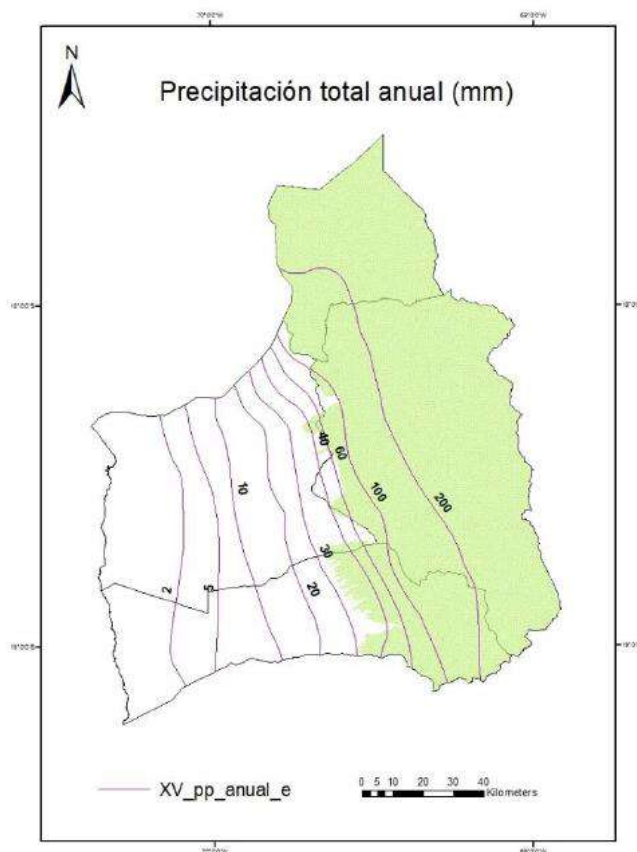
Fuente: Elaboración propia a partir García et al. (2004)

d) Marco Climático

La XV Región de Arica y Parinacota se encuentra inserta en la zona intertropical sudamericana. La variedad climática de influencia tropical en la precordillera y altiplano de esta región es una característica que la diferencia del resto de Chile. Las temperaturas en el norte de Chile presentan una mayor variación en sentido longitudinal que latitudinal (e.g. Almeyda y Sáez, 1958). En las localidades litorales uno de los factores que influye sobre la temperatura es el efecto regulador de las aguas marinas (di Castri y Hajek, 1976). En el interior, en cambio, la altitud sería un factor importante, presentándose una marcada disminución altitudinal y latitudinal. La oscilación térmica aumenta hacia el interior, como producto de la distancia al océano, siendo más abrupto el aumento a sotavento de las grandes cadenas montañosas (Luebert & Pliscoff, 2004). En la Región de Arica y Parinacota, las temperaturas medias anuales varían entre 3° y 5°C en algunos períodos invernales (IREN, 1979).

La Región de Arica y Parinacota se caracteriza por un régimen escaso de precipitaciones. No obstante, dicha condición tiene una amplia oscilación desde el desierto en el área costera e interior (normalmente sin precipitación alguna), hasta los sectores altiplánicos. En la ilustración 1-19, se evidencia la marcada intensificación que existe desde la zona litoral, donde los valores anuales no superan el milímetro y se concentran en invierno (tendencia mediterránea), hasta la región altiplánica, donde precipitaciones estivales provocadas por la llegada de masas de aire cargadas de humedad desde la cuenca amazónica (influencia tropical) permiten la acumulación de montos anuales que superan los 300 mm, en el fenómeno denominado "invierno altiplánico". Esto sugiere un régimen de precipitaciones de lluvias estivales de la XV Región, donde el 80% de la precipitación anual está concentrada en el período Diciembre – Marzo (DGA, 2010).

Ilustración 1-19: Precipitación anual (mm), XV Región de Arica y Parinacota.



Fuente: CIREN (1992)

Los años de lluvias intensas en la zona alta no son consistentes a través de los años. La Dirección General de Agua ha registrado por más de 40 años los montos de precipitaciones en el altiplano, evidenciando oscilaciones anuales de entre 100 y más de 400 mm de agua caída.

En general, las precipitaciones en la región fluctúan entre 300 y 250 mm, con una paulatina disminución hacia el sur (CIREN, 2013).

i) Climas en la Región de Arica y Parinacota

Las condiciones climáticas de las diferentes áreas de la Región de Arica y Parinacota están asociadas directamente con el relieve, la altura y la latitud. La Dirección Meteorológica de Chile ha realizado una clasificación de los tipos de clima de la Región de Arica y Parinacota, basada en la clasificación de Köppen. De esta forma, la XV Región presenta cuatro tipos de climas distintos extendidos como franjas longitudinales subparalelas: Clima Desértico con Nubosidad Abundante (BWn), Clima Desértico Normal (BW), Clima Desértico Marginal de Altura (BWH) y Clima de Estepa de Altura (BSH) que se extienden desde la costa hacia el altiplano.

1. **Clima Desértico con Nubosidad Abundante.** Definido como Clima BWn, comprende la Cordillera de la Costa y las discontinuas planicies litorales,

hasta los 1.000 metros de altitud. El régimen térmico es influenciado por las características frías de la corriente de Humboldt, moderando la temperatura ambiente, que oscila entre 13°C y 22°C. Las precipitaciones son muy escasas y se concentran en los meses de invierno. Predominan los vientos del suroeste durante todo el año.

Ilustración 1-20: Distribución de climas (Clasificación de Köppen) en la Región de Arica y Parinacota.



Fuente: Modificado de Hernández (2014)

- Clima desértico normal.** Conocido como clima BW, se presenta entre los 1.000 y los 2.000 metros, desde el extremo norte hasta el límite sur de la región, formando una franja longitudinal casi paralela a la franja del clima BWn, abarcando lo que corresponde a la Depresión Intermedia. Está caracterizado por el predominio de una masa de aire muy estable y seca que origina una gran aridez, cielos despejados todo el año, humedad baja y una alta oscilación térmica diaria, alcanzando los 25° durante el día y temperaturas mínimas cercanas a 0° en algunos sectores durante la noche.
- Clima desértico marginal de altura.** Definido como clima BWH, se presenta en las zonas próximas a la Cordillera de los Andes, por encima de los 2.000 y hasta los 3.500 a 3.800 metros, extendiéndose como una franja longitudinal en forma paralela al clima BW. Esta región se ve caracterizada por una masa de aire inestable, que por efectos de la altura produce nubosidad de desarrollo vertical que da origen a precipitaciones durante

casi todos los veranos. Si bien no son tan abundantes como para eliminar la característica desértica, crean condiciones para la existencia de una incipiente vegetación estacional. Las temperaturas muestran un régimen relativamente frío, con un promedio no superior a 15°C.

4. **Clima de estepa de altura** .Conocido como clima BSH, abarca la zona sobre los 3.500 a 3.800 metros de altitud. Se desarrolla como una franja longitudinal en la parte más oriental de la región, con un ancho medio de 50 km. La altitud hace que las temperaturas sean muy frías, lo que provoca que muchas de las precipitaciones sean de nieve. Este clima está caracterizado por una masa de aire inestable, que por efectos de la altura produce nubosidad de desarrollo vertical que da origen a precipitaciones abundantes en los meses del verano, casi todos los años.

ii) **Clima en Putre y Zapahuira**

La comuna de Putre se caracteriza por presentar, en su mayor extensión, un clima de estepa de altura. Sin embargo, en el borde occidental de la comuna, donde se ubican las localidades de Putre y de Zapahuira, se presenta un clima desértico marginal de altura.

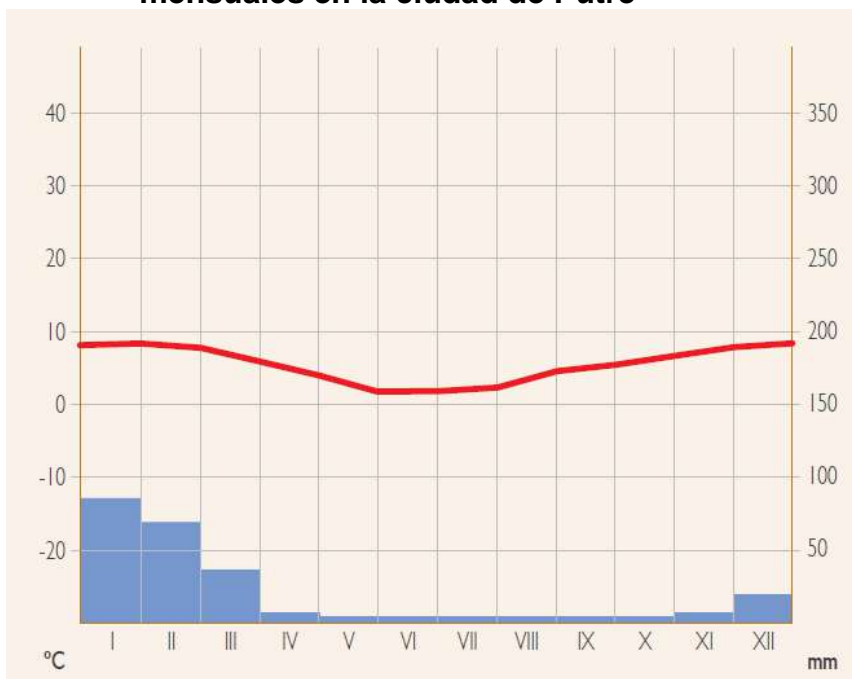
Particularmente en la ciudad de Putre, las temperaturas máximas alcanzan casi los 17°C en diciembre, mientras que las mínimas se registran en junio con -7,8°C. En concordancia al régimen de precipitaciones de lluvias estivales característico de la XV Región, las mayores precipitaciones de la zona se concentran en los meses de enero, febrero y marzo (Cuadro 1.3-1 e Ilustración 1-21), alcanzando los 210 mm anuales, cifra que no supera la demanda evaporativa total anual (Hernández, et al., 2014).

Cuadro 1.3-1: Montos promedio de elementos climáticos en la zona de Putre.

Elemento	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Temperatura Máxima (°C)	16,4	16,1	15,9	15,4	13,5	11,7	11,3	12,5	13,9	15,8	16,5	16,8	14,7
Temperatura Mínima (°C)	5,2	0,8	-1,4	-2,4	-4,9	-7,8	-7,6	-7,1	-4,3	-3,7	-1,9	-0,5	-3,3
Temperatura Media (°C)	8,5	8,4	7,9	6,5	4,3	1,9	1,8	2,7	4,8	6,0	7,3	8,2	5,7
Precipitación (mm)	83,9	67,5	33,7	2,1	0,1	0,6	0,6	0,6	0,8	0,8	2,9	17,1	210,7

Fuente: INIA (1989) y Worldclim.org (2013)

Ilustración 1-21: Temperaturas medias del aire y precipitación promedio mensuales en la ciudad de Putre



Fuente: Hernández et al. (2014)

e) Marco Hidrológico

La XV región presenta una hidrografía bastante típica del norte de Chile, con cuencas de vertiente pacífica (que drenan al mar), y de vertiente Altiplánica que forman parte de un sistema endorreico mayor que incluye al territorio Boliviano.

Los lagos, salares y lagunas que existen en esta región se forman por la imposibilidad de evacuar parte importante de las precipitaciones estivales y el almacenamiento de nieve en las altas cumbres de la zona altiplánica hacia el océano Pacífico, generando más del 95% de los recursos hídricos de la región (Sánchez, 2009). A la vez, las condiciones climáticas, así como las características del suelo, no permiten un desarrollo y el escurrimiento constante de cursos de agua importantes. De hecho, solo existe un curso superficial de agua con llegada permanente al mar (el Río Lluta), con caudales medios que no superan los 1.500 litros por segundo (Niemeyer & Cereceda, 1984). El resto de la hidrografía regional drena desde la alta cordillera hacia la vertiente pacífica; ella presenta algunos escurrimientos estivales que logran llegar hasta el océano como las quebradas de Azapa, Vitor y Camarones (Errázuriz K, et al., 1987) y otras que se infiltran en la pampa desértica.

La Dirección General de Aguas (DGA) ha delimitado seis cuencas hidrográficas en la XV Región. Cinco de ellas son de vertiente Pacífica (dos de ellas compartidas con el Perú): Quebrada de la Concordia, Río Lluta, Río San José o Azapa, Costeras Río San José-Qda. Camarones y Río Camarones. Estas cuencas están conectadas con sus pares altiplánicas a través de una serie de tributarios alto andinos que originan los ríos que conforman las cuencas que drenan al mar. Estas

cuencas altiplánicas son de carácter endorreico y exorreico (como el Río Lauca), que llevan sus aguas hacia territorio boliviano. Las cuencas altiplánicas más relevantes son: las de Caquena-Cosapilla, Chungará, Lauca y Surire.

Cuadro 1.3-2: Cuencas hidrográficas de la XV Región

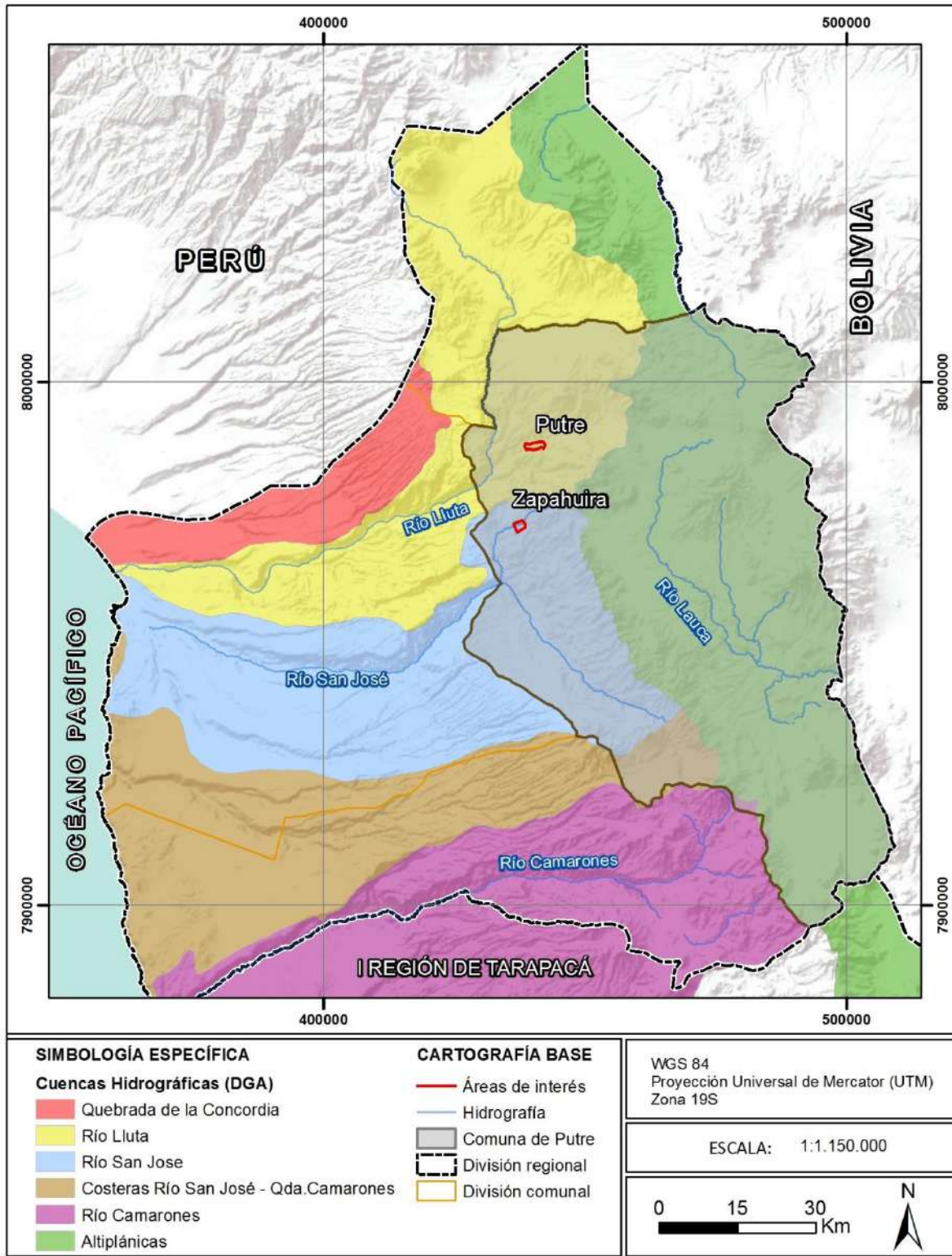
Cuenca Hidrográfica	Área (km²)	Tipo
Quebrada de la Concordia*	784,83	Exorreica
Río Lluta*	3437,15	Exorreica
Río San José	3193,95	Exorreica
Quebrada Vitor	2675,59	Exorreica
Río Camarones	4681,89	Exorreica
Altiplánica	11369,06	Endorreica

*Cuenca compartida con Perú

Fuente: Hernández et al. (2014) y DGA

Las localidades de Putre y Zapahuira se encuentran dentro de la Cuenca Río Lluta y de la Cuenca Río San José, respectivamente

Ilustración 1-22: Cuencas hidrográficas de la XV Región de Arica y Parinacota.



Fuente: Elaboración propia

1.3.2 Inventario de Peligros Geológicos

Con base en la revisión bibliográfica, el análisis de imágenes satelitales y la información recopilada en terreno, se realizó un inventario de peligros geológicos para cada uno de los peligros reconocidos en el área de estudio y en los alrededores.

Las fuentes utilizadas para la elaboración de los inventarios para los distintos peligros analizados son Urrutia y Lanza (1993), archivos de prensa y publicaciones científicas.

a) Sismos

i) Antecedentes Históricos

La costa oeste de Sudamérica está delineada por el borde occidental de la placa tectónica Sudamericana y se caracteriza por su sismicidad debido a la convergencia entre esta placa y la placa tectónica de Nazca. Esta convergencia de placas se caracteriza por un nivel particularmente alto de acoplamiento mecánico en la zona de contacto entre las placas, lo que permite la acumulación de grandes niveles de energía. Cuando la energía acumulada supera la resistencia mecánica en la zona de contacto entre las placas, se generan sismos de gran magnitud. Por lo anterior, la zona de convergencia define una banda sísmica activa angosta, de aproximadamente 150 a 200 kilómetros de ancho, y una profundidad variable que aumenta hacia el este, entre aproximadamente 5 km de profundidad en la fosa Perú-Chile y aproximadamente 150 km de profundidad bajo el cordón montañoso de Los Andes. En la zona de estudio, el contacto entre ambas placas se extiende hasta alrededor de los 40 - 53 km de profundidad (Tichelaar & Ruff (1993), Suárez y Comte(1993), Belmonte-Pool (1997), Khazaradze & Klotz (2003), Tassara et al.,(2006)).

La costa de Chile históricamente ha sido afectada por grandes terremotos, varios acompañados de maremotos destructivos. En la ilustración 1-23, se grafican los más importantes sismos de subducción que han afectado al territorio de Chile continental en el período histórico.

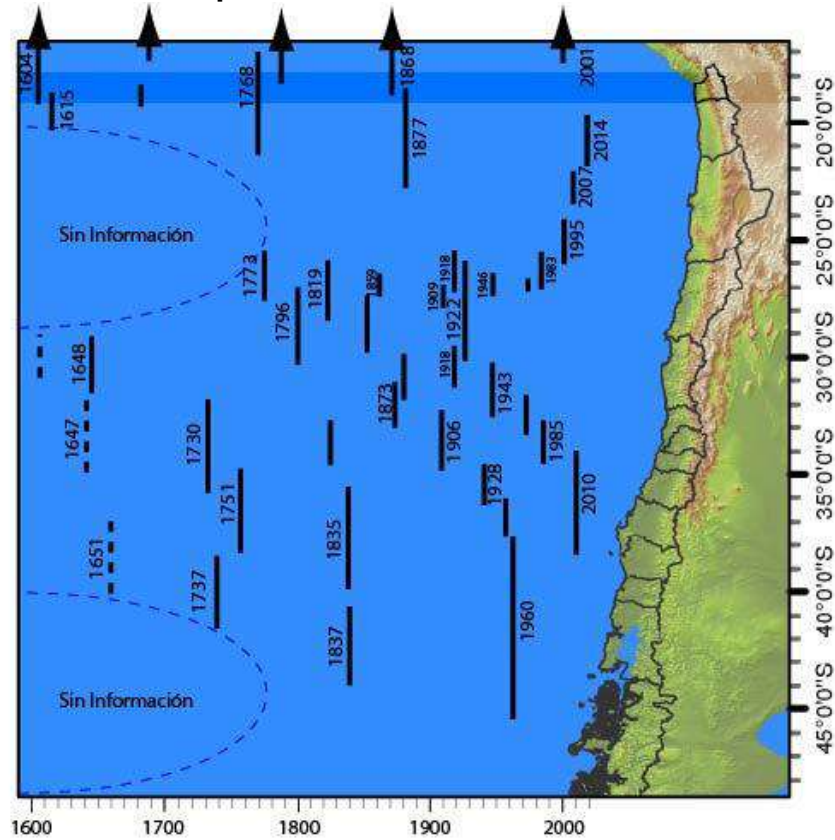
El área norte de Chile hasta la península de Mejillones posee antecedentes históricos de grandes terremotos interplaca tipo thrust (por ejemplo, los terremotos de 1877, 2007) tal como se observa en la ilustración 1-23. Los principales sismos que han afectado al área de estudio se presentan en el Cuadro 1.3-3. El epicentro de ninguno de estos eventos se ha localizado dentro de la comuna de Putre. Solo dos eventos de magnitud mayor a $M_w=6,3$ han ocurrido dentro del área de estudio desde, al menos, el año 1973: (1) el 25 de febrero del año 1983, ocurrió un sismo con epicentro a 17 km al NE de Zapahuiria, con una magnitud de $M_w=6,9$ a 146 km de profundidad y (2) el 6 de marzo del año 2011, ocurrió un sismo con epicentro a 7 km al este de la localidad de Putre, con una magnitud de $M_w=6,3$ a 110 km de profundidad.

Cuadro 1.3-3: Registro histórico de los mayores sismos ocurridos en la zona de estudio

FECHA	DESCRIPCIÓN
24 de noviembre de 1604	Terremoto en Arica (Ms=8,5) en el sur de Perú y norte de Chile. Arequipa, San Marcos de Arica e Ica, junto con todos los asentamientos entre las latitudes 16° S y 20° S fueron destruidos. Se observaron numerosos derrumbes, avalanchas, hundimientos y grietas en el terreno. Estos problemas fueron acompañados por la aparición de un maremoto que inundó la zona costera por una distancia de 1.200 kilómetros, siendo Arica la que sufrió más.
16 de diciembre de 1615	Terremoto en Arica (Ms=8,8); generó maremoto. No hay registros de daños en el entonces poblado de Putre.
10 de marzo de 1681	Terremoto en Arica (Ms=7,3). No hay registros de daños en el entonces poblado de Putre.
8 de octubre de 1831	Terremoto en Arica (Ms=7,8). No hay registros de daños en el entonces poblado de Putre.
18 de septiembre de 1833	Terremoto en Arica (Ms=7,7). No hay registros de daños en el entonces poblado de Putre.
13 de agosto de 1868	Terremoto cuyo epicentro fue cerca de las costas de Tacna (Mw=9,0). Generó un maremoto. Las zonas afectadas van desde Trujillo, al norte de Perú, hasta La Serena, Chile. Se estiman 500 personas fallecidas en todo el litoral afectado. No hay registros de daños en el entonces poblado de Putre.
9 de mayo de 1877	Terremoto en Iquique (Mw=8,8), que produjo un maremoto hasta Chiloé, y en las costas de Japón y Nueva Zelanda. En Chile se sintió desde Arica hasta Copiapó. No hay registros de daños en el entonces poblado de Putre.
24 de diciembre de 1906	Sismo en Codpa, a 1 km al sur de Arica. Violento sismo que ocasionó derrumbes en lugares aledaños. No hay registros de daños en el entonces poblado de Putre.
8 de agosto de 1987	Terremoto en Tarapacá, 60 km al norte de Pisagua (Mw=7,2). Fue percibido entre Moquegua, Perú, y La Serena en Chile. No hay registros de daños en la comuna de Putre.
7 de julio de 2001	Terremoto cerca de la costa al sur de Perú (Mw=7,6). El sismo se sintió con gran intensidad en el norte de Chile (hasta la Región de Tarapacá) donde hubo 3 personas fallecidas. No hay registros de daños en la comuna de Putre.
13 de junio de 2005	Terremoto en Tarapacá (Mw=7,8), afectando la localidades de la XV, I y II Región. Los daños y víctimas principalmente se concentraron en una zona localizada entre la quebrada de Camarones por el norte y Pozo Almonte por el sur. No hay registros de daños en la comuna de Putre.
1 de abril de 2014	Terremoto en Iquique (Mw=8,2). Afectó a todo el Norte Grande (regiones Arica-Parinacota, Tarapacá y Antofagasta). En la comuna de Putre, hubo algunas caídas de rocas en los caminos que impedían el paso a otras localidades, pero la Ruta 11 CH se encontraba expedita. Solo hubo un derrumbe en una casa desocupada de Putre.

Fuente: Elaboración propia con base en Urrutia y Lanza (1993), Madariaga (1998) y las agencias GUC y NEIC.

Ilustración 1-23: 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.



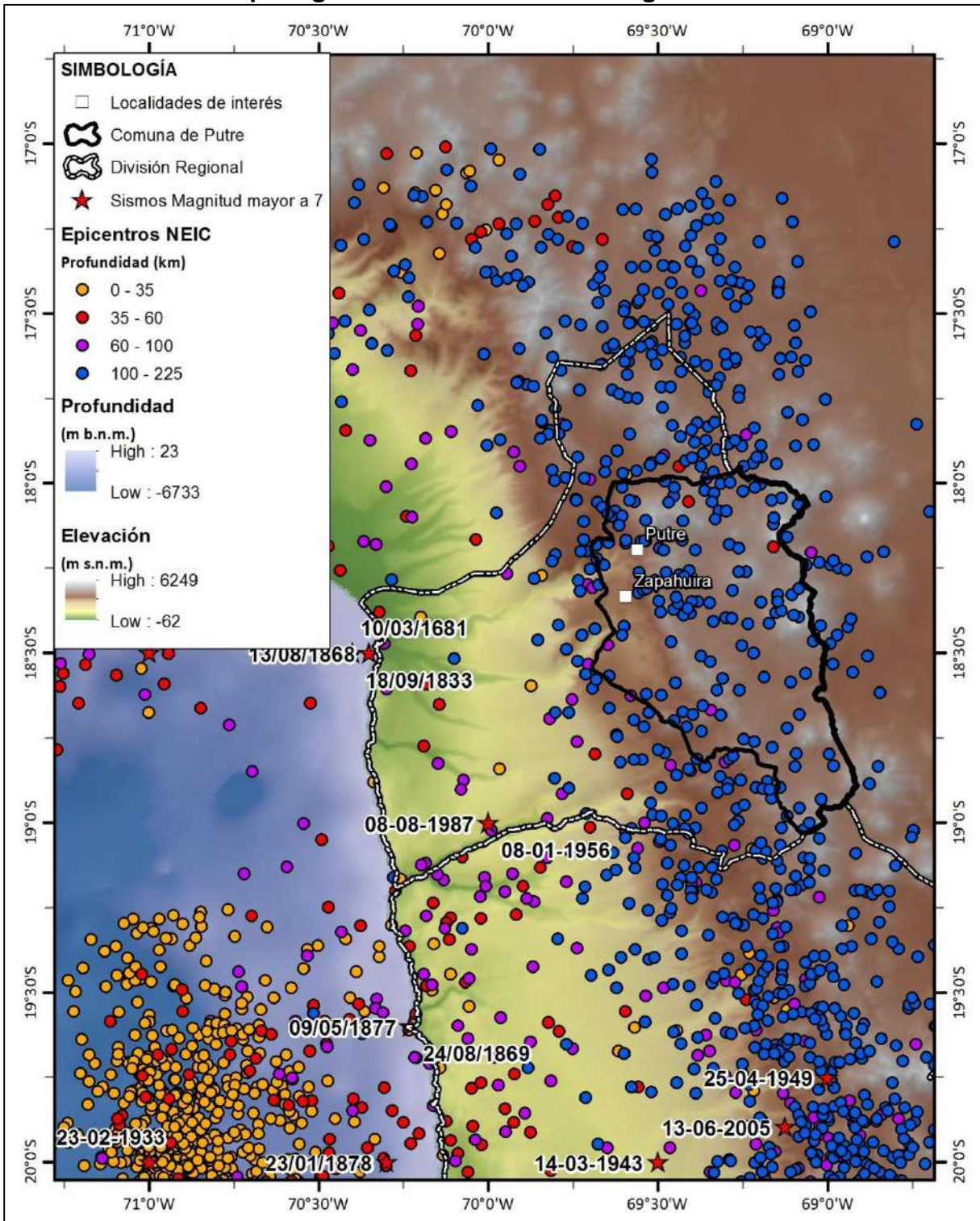
Fuente: Elaboración propia

ii) Sismos registrados por la red sismológica mundial.

En la ilustración 1-24, se presenta la sismicidad registrada por la red sismológica internacional, con magnitudes superiores a 4.0. En esta figura, se aprecia que una gran cantidad de eventos se localizan próximos al contacto entre las dos placas; estos eventos sísmicos son denominados interplaca o thrust (dado su bajo ángulo de manteo). Aquellos eventos que ocurren al interior de la placa de Nazca, con profundidades que van desde los 60 km hasta los 225 km, corresponden a sismos intraplaca de profundidad intermedia. Además, en mucho menor medida, se aprecian sismos superficiales en la placa Sudamericana, que no superan los 30 km de profundidad, correspondientes a sismos corticales cordilleranos. El registro de estos sismos, si bien están asociados a fallas corticales, no alcanza a dar cuenta de la totalidad de fallas activas reconocidas hasta la fecha en la zona (Ilustración 1-25).

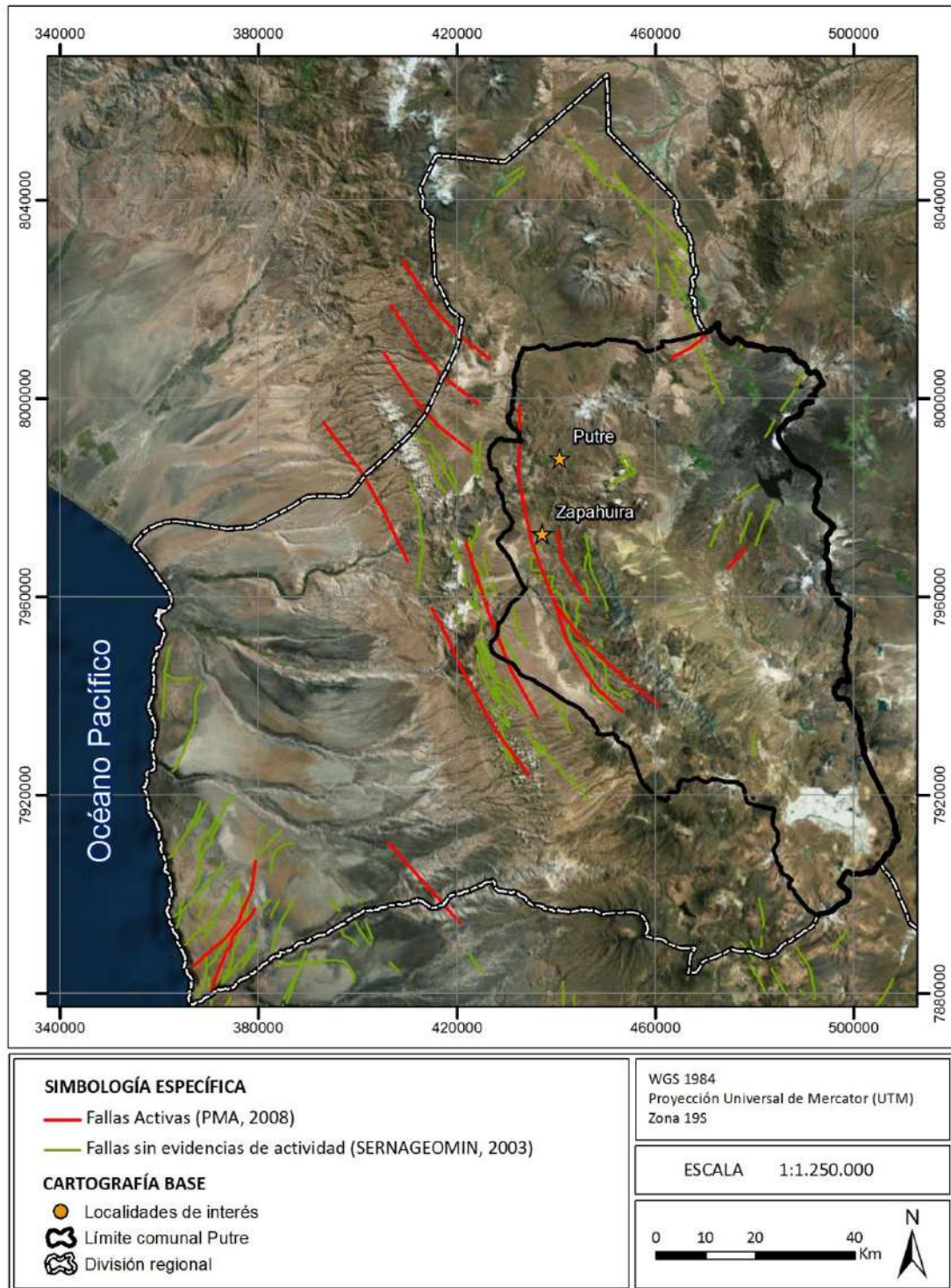
En la comuna de Putre, se han registrado mayoritariamente sismos intraplaca de profundidad intermedia con hipocentros que superan los 100 km de profundidad.

Ilustración 1-24: Mapa regional con la sismicidad registrada instrumentalmente



Fuente: Elaboración propia con base en el Catálogo NEIC (sismos sobre magnitud 4.0).

Ilustración 1-25: Fallas activas e inactivas que se encuentran cercanas a la comuna de Putre



Fuente: Elaboración propia a partir de PMA (2008) y SERNAGEOMIN (2003)

iii) Principales fuentes sísmicas reconocidas en el área de estudio

En el área de estudio se reconocen tres fuentes sismogénicas principales: (1) interplaca tipo thrust, (2) intraplaca de profundidad intermedia y (3) eventos corticales.

- *Sismos Interplaca tipo Thrust*

Corresponden a aquellos eventos que se producen en el contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana, producto de los esfuerzos comprometidos en el proceso de la subducción. Este tipo de eventos alcanzan grandes magnitudes y son aquellos que poseen potencial de generar maremotos. Los sismos de este tipo que han afectado a la zona de estudio se resumen en el Cuadro 1.3-3.

- *Sismos Intraplaca de Profundidad Intermedia*

Esta fuente corresponde a los sismos que ocurren en el interior de la placa de Nazca, a continuación de la zona de acople; alcanzando profundidades mayores de 50 km y hasta los 150 -200 km.

La zona de estudio no ha sido afectada en períodos históricos por terremotos del tipo intraplaca de profundidad intermedia de magnitud importante. Sin embargo, en el norte de Chile han ocurrido terremotos intraplaca de profundidad intermedia de gran magnitud (Calama 1950, $M_s \approx 8$; Tarapacá 2005, $M_w = 7.5$), son del tipo del terremoto de Chillán de 1939, que ha sido el terremoto que más daño y mortandad ha generado en Chile. Por lo que esta fuente de sismicidad no debe ser desestimada.

Cabe destacar que no existen registros más detallados de la ocurrencia previa a 1950 de grandes sismos intraplaca de profundidad intermedia; esto es, en gran parte, debido a las limitaciones del registro instrumental e histórico.

- *Sismos Corticales*

No existen registros de ocurrencia de este tipo de sismos en el área de estudio, pues no existen evidencias de fallas activas en la comuna de Putre. Sin embargo, la existencia del sistema de falla de Atacama, de fallas consideradas como activas, en las cercanías no permite descartar la ocurrencia de este tipo de sismos y que tengan consecuencias en el área estudiada en el futuro.

b) Centros volcánicos y evidencias de actividad volcánica

En la ilustración 1-26, se muestran los centros volcánicos activos próximos a la comuna de Putre. Dentro de ella, se encuentran los siguientes volcanes activos: el grupo Nevados de Putre, el volcán Pomerape, volcán Parinacota, Volcanes de Ajata, volcán Acotango, volcán Guallatiri y volcán Arintica. Todos estos volcanes pertenecen al segmento denominado Zona Volcánica de los Andes Centrales, que se desarrolla entre los 14°S y 28°S. Esta zona volcánica se caracteriza por la relativa abundancia de productos volcánicos altamente diferenciados de composiciones riolítica y dacítica. Además, esta zona constituye una de las mayores provincias de ignimbritas del Terciario superior del mundo.

Los volcanes más importantes que se encuentran cerca de las áreas de estudio de detalle son:

- **Nevados de Putre (Complejo Volcánico Taapaca).** El grupo Nevados de Putre es un complejo volcánico, compuesto por lavas domo dacíticas, flujos piroclásticos y lavas andesítico dacíticas, que se disponen sobre rocas volcánicas de la Formación Lupica del Mioceno Medio y de la Ignimbrita Lauca. La mayor parte del complejo se construyó durante el Pleistoceno, pero inició su actividad en el Plioceno Superior y aún está activo. La historia eruptiva del Complejo se ha desarrollado en cuatro etapas, evolucionando de un estrato volcán de Grandes dimensiones en sus etapas iniciales (en el sector norte del complejo) a un complejo de domos en las más recientes. El estratovolcán antiguo (Taapaca I) está compuesto por lavas andesíticas a dacíticas y domos dacíticos. La actividad efusiva estuvo acompañada por la generación de numerosos depósitos de bloques y ceniza dacíticos que se ubicaron en el flanco norte del volcán y que llegó hasta las quebradas de Allane y Lluta (unos 12 – 13 km de su origen). Durante el Pleistoceno Medio y Superior, la actividad eruptiva, de la Unidad Taapaca II, se desplazó hacia el sur unos 2 – 3 km del centro volcánico, formando un complejo de domos, y los depósitos piroclásticos fueron dirigidos principalmente hacia la vertiente occidental y suroccidental del complejo. Dentro de esta actividad explosiva fueron emitidos flujos de bloques y ceniza, flujos piroclásticos, avalanchas de detritos volcánicos, explosiones laterales y lahares. Los productos más recientes generados durante el Pleistoceno Superior han sido dirigidos hacia el suroeste, e incluso la localidad de Putre se encuentra parcialmente construida sobre depósitos de avalancha y piroclásticos de menos de 25000 años. La última etapa (Taapaca IV) se ha desarrollado con formación y colapso de domos. Mediante dataciones se ha determinado que depósitos piroclásticos de este complejo tienen edades entre los 1.7 Ma y 15000 años, lo que evidencia que la actividad eruptiva ha sido continua hasta antes del Holoceno.

La actividad eruptiva durante el Holoceno está representada al menos por tres domos de composición dacítica, que se ubican en la parte sur del complejo. La formación de estos domos generó una serie de depósitos piroclásticos y lahares, dirigidos al sureste del Complejo y que cubren un área aproximada de 18 km², y se extienden a más de 16 km del complejo. Estos depósitos tienen un espesor

máximo expuesto de 50 m en las cercanías de Putre. Dataciones realizadas ubican la última actividad explosiva entre 9000 y 2000 años atrás (Clavero, 2002), dirigida principalmente hacia el suroeste del Complejo, donde se ubica Putre.

- **Nevados del Payachata.** Está constituido por dos centros eruptivos: Pomerape y Parinacota. El volcán Pomerape concentró toda su actividad en el Pleistoceno superior (300.000 – 200.000 años) mientras que solo la parte basal del Parinacota se construyó en ese período (Clavero, 2002). Estos centros emitieron productos muy variados en términos de composición, y de génesis muy diversa, desde domos y lavas, depósitos de bloques y ceniza, flujos piroclásticos y avalanchas de detritos volcánicos. El volcán Parinacota es el más joven de los dos centros eruptivos que conforman los Nevados de Payachata y constituye uno de los volcanes activos principales de esta región volcánica. La actividad del volcán Parinacota ha sido dividida en tres etapas (Clavero, et al., 2002):

La primera, Unidad Parinacota I, corresponde a un complejo de domos riolacíticos con productos piroclásticos asociados; está datada entre 300.000 y 70.000 años.

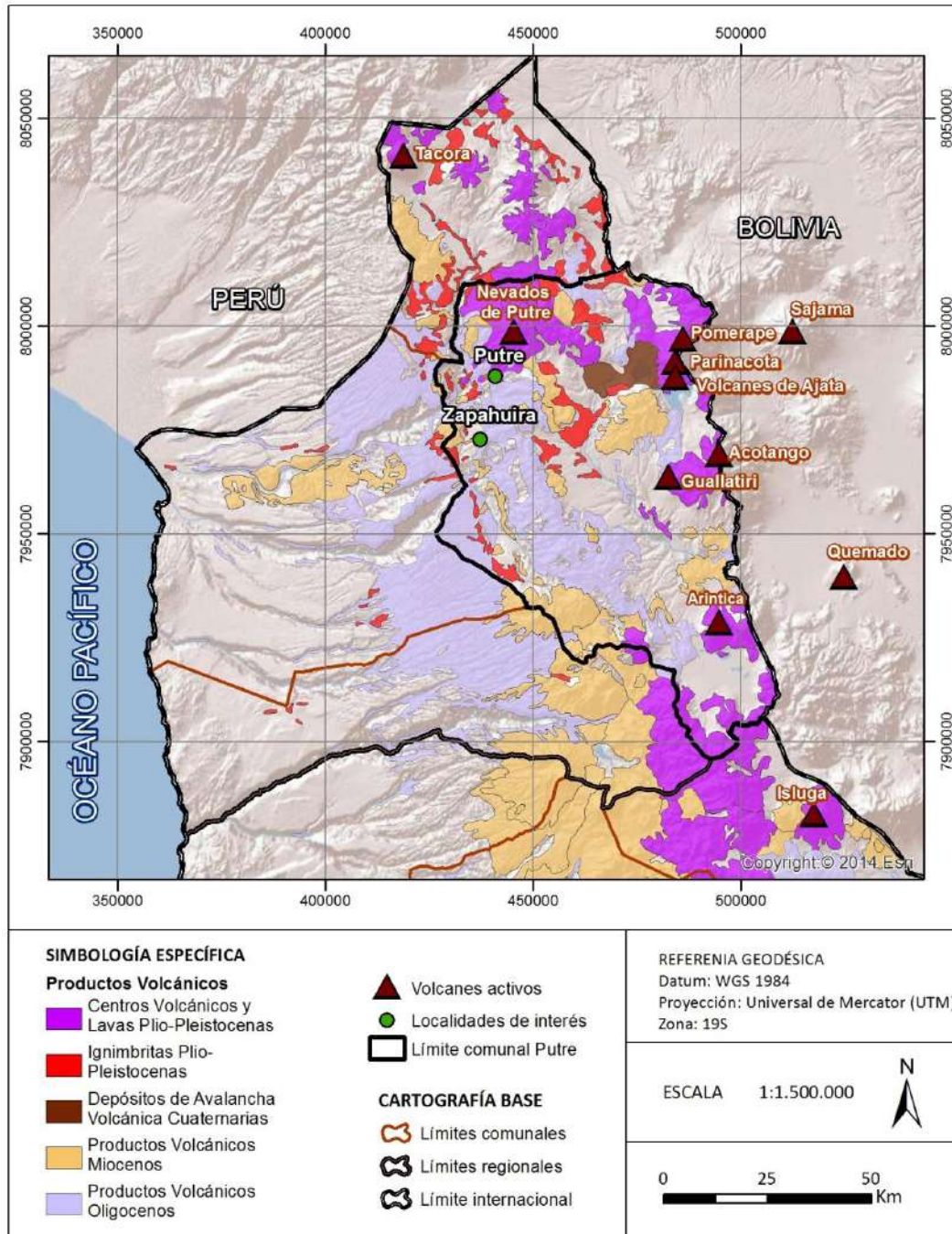
La segunda, Unidad Parinacota II, corresponde a la construcción de un edificio volcánico (estratovolcán) de lavas y depósitos piroclásticos entre los 70.000 y 14.000 años. Este estratovolcán colapsó parcialmente hacia el oeste unos 8.000 años atrás (Clavero, et al., 2002), generando el depósito de avalancha de Parinacota, de más de 140 km² de superficie y de un volumen estimado cercano a 6 km³.

La tercera, Unidad Parinacota III, corresponde a la formación del cono principal del volcán, el cual se ha edificado completamente en el Holoceno, con posterioridad a la ocurrencia de la avalancha, presentando una forma cónica casi perfecta. Está compuesto por una alternancia de lavas, predominantemente andesíticas, depósitos de flujos piroclásticos y depósitos piroclásticos de caída. Las lavas tienen extensiones máximas de unos 7 km, con anchos máximos de 1200 m y espesores entre 10 y 40 m (García, et al., 2004). Los depósitos en partes se encuentran cortados por depósitos laháricos provenientes del volcán. Mediante dataciones ¹⁴C se ha determinado que el cono principal se formó en el Holoceno, desde 8000 años hasta el presente, incluso relatos de una erupción explosiva en tiempos históricos han sido confirmados con la datación en 200 años de una muestra de pasto calcinado. Esto significa que el volcán Parinacota, durante el Holoceno, debe ser considerado uno de los más activos de los Andes Centrales del Norte de Chile.

A pesar que de que no se ha registrado actividad histórica reciente en los centros volcánicos más cercanos a las áreas de estudio de detalle, estas sí han sido afectadas por productos volcánicos que han abarcado extensas áreas de la comuna de Putre desde, al menos, el Plioceno (Ilustración 1-26). Además, la presencia de numerosas fuentes termales de aguas calientes y sulfurosas del

grupo Nevados de Putre, están indicando la existencia de una importante actividad hidrotermal, asociada a la fuente calórica aún activa.

Ilustración 1-26: Ubicación de los centros volcánicos próximos a la comuna de Putre



Fuente: Elaboración propia a partir de SERNAGEOMIN (2003).

c) Procesos de remoción en masa

La comuna de Putre frecuentemente se ve afectada por remociones en masa, las que son en su mayoría gatilladas por las intensas lluvias que se producen durante los meses de verano. Históricamente, estos fenómenos han sido recurrentes, con variaciones en intensidad y en el área afectada, tal como lo indican diversas fuentes consultadas (verCuadro 1.3-4).

La mayor parte de los eventos reconocidos corresponden a flujos de barro o detritos y a deslizamientos de suelo. De acuerdo a la información recopilada (verCuadro 1.3-4) también hay algunos reportes de caídas de rocas (rodados) que han afectado a las principales rutas de la comuna.

En las laderas de la quebrada Chucarlasuña, al poniente de la localidad de Putre, se han registrado una serie de deslizamientos de suelo que se generan en la Unidad Putre. Estos deslizamientos fueron identificados a partir del análisis de imágenes satelitales de GoogleEarth, las que abarcan el período Abril 2004 – Agosto 2013. De este análisis se desprende que los deslizamientos han presentado actividad posterior al año 2004, concentrándose gran parte de la actividad durante el verano del año 2012 (se desconoce la fecha exacta de su ocurrencia, pero se sabe que fue posterior al 29/10/2011 y anterior al 10/03/2012). En la ilustración 1-27 y la ilustración 1-28, se presentan ejemplos de estos procesos, reconocidos en la quebrada Chucarlasuña. Fenómenos similares también fueron identificados al norte y nororiente de Putre, así como también en diferentes sectores de la quebrada Chucarlasuña y aledaños a la ruta 11-CH, justo al suroeste de su intersección con la ruta A-149 (verIlustración 1-29 e Ilustración 1-30).

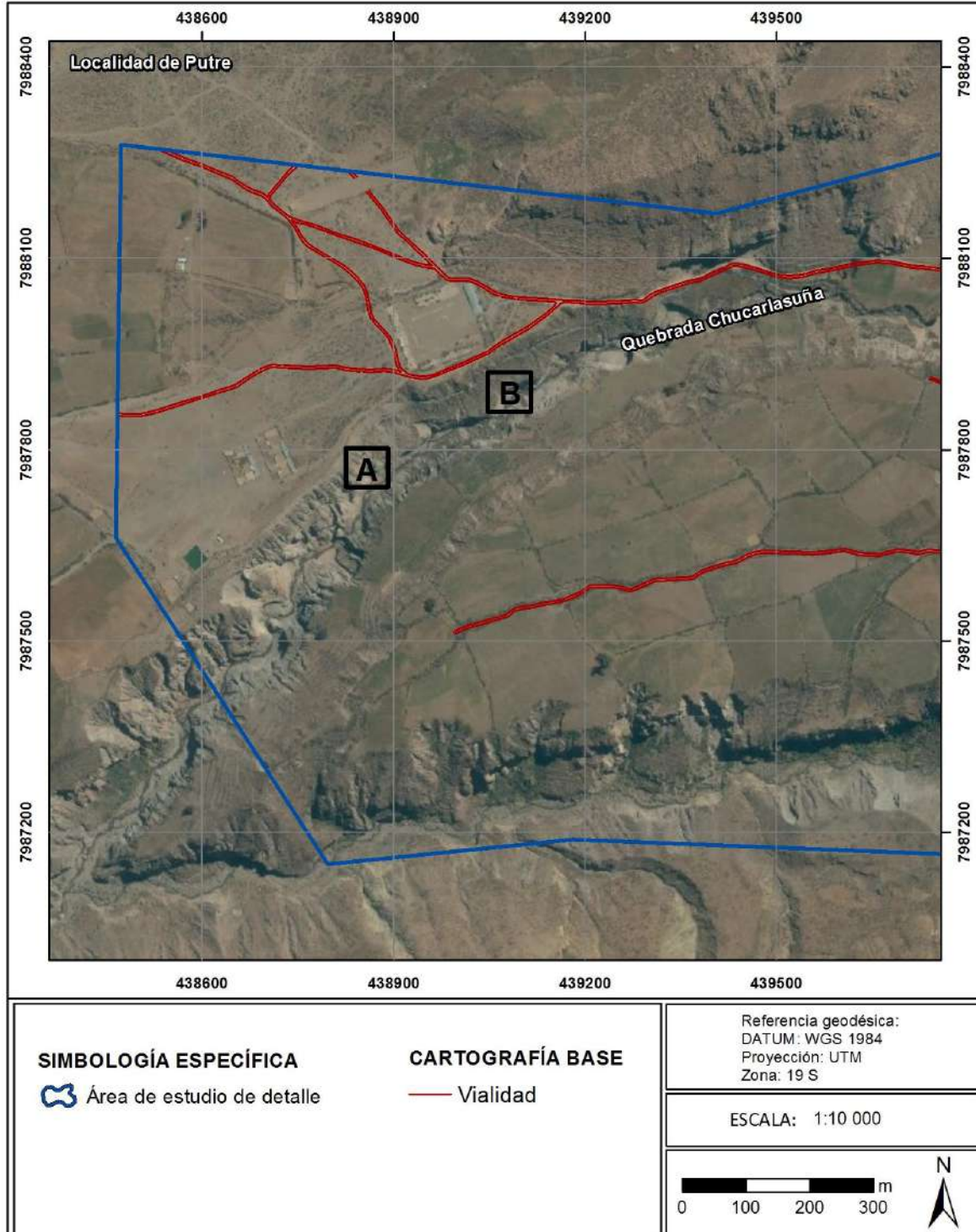
De la información recopilada se infiere que los deslizamientos de suelo se asocian principalmente a laderas escarpadas conformadas por sedimentos volcánicos con poca a nula consolidación y suelen ser más frecuentes en aquellas laderas que se encuentran directamente expuestas a la erosión fluvial en su base, debido a la desestabilización basal de la ladera producida durante las crecidas.

Además, se cuenta con los antecedentes expuestos en el Plan de Desarrollo Comunal de Putre (I.M. de Putre, 2008), el cual señala que la abundancia de lluvias durante el período estival provoca frecuentemente aluviones e inundaciones que producen pérdidas en las tierras de cultivos, y cortan las vías de acceso y comunicación de varias localidades que quedan completamente aisladas por un número variable de días. Las vías comúnmente afectadas son las siguientes:

- El Camino Arica - Tambo Quemado (11-Ch): En esta ruta son comunes los aludes desencadenados por lluvias que interrumpen o destruyen el camino.
- Camino Zapahuira Belén – Ticnamar: Camino ripiado, posee sectores que van siguiendo la topografía con constantes desprendimientos de rodados. El Camino Zapahuira – Ticnamar está trazado al pie de la cordillera de Chapiquiña y a cierta distancia del Río Ticnamar. Aun cuando se han construido badenes para facilitar

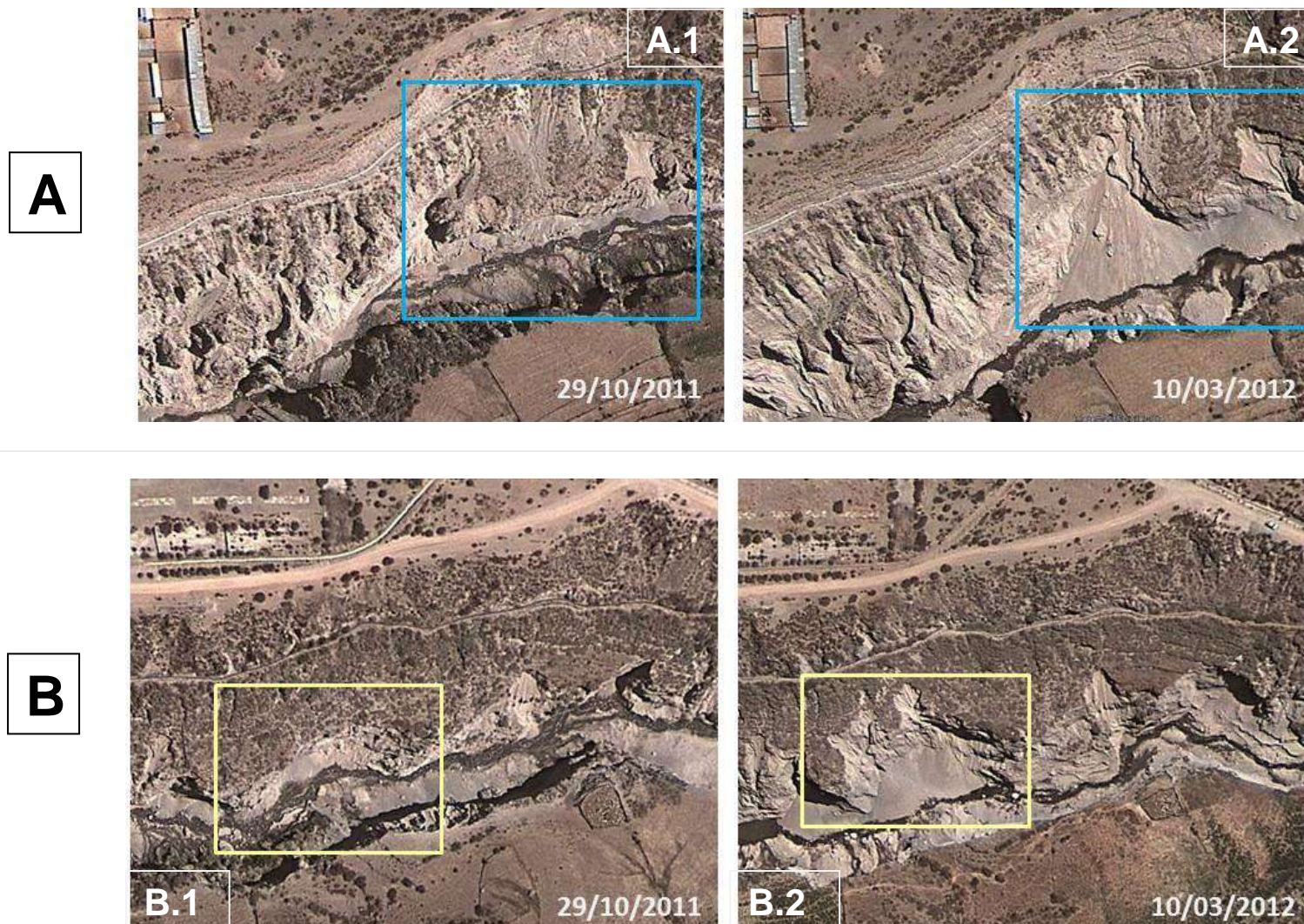
el desplazamiento de aluviones, el camino continúa siendo afectado por aludes y pequeños aluviones que se desencadenan en tiempo de lluvias muy intensas.

Ilustración 1-27 Ubicación de dos ejemplos de deslizamientos activos en la quebrada Chucarlasuña (ver Ilustración 1-28).



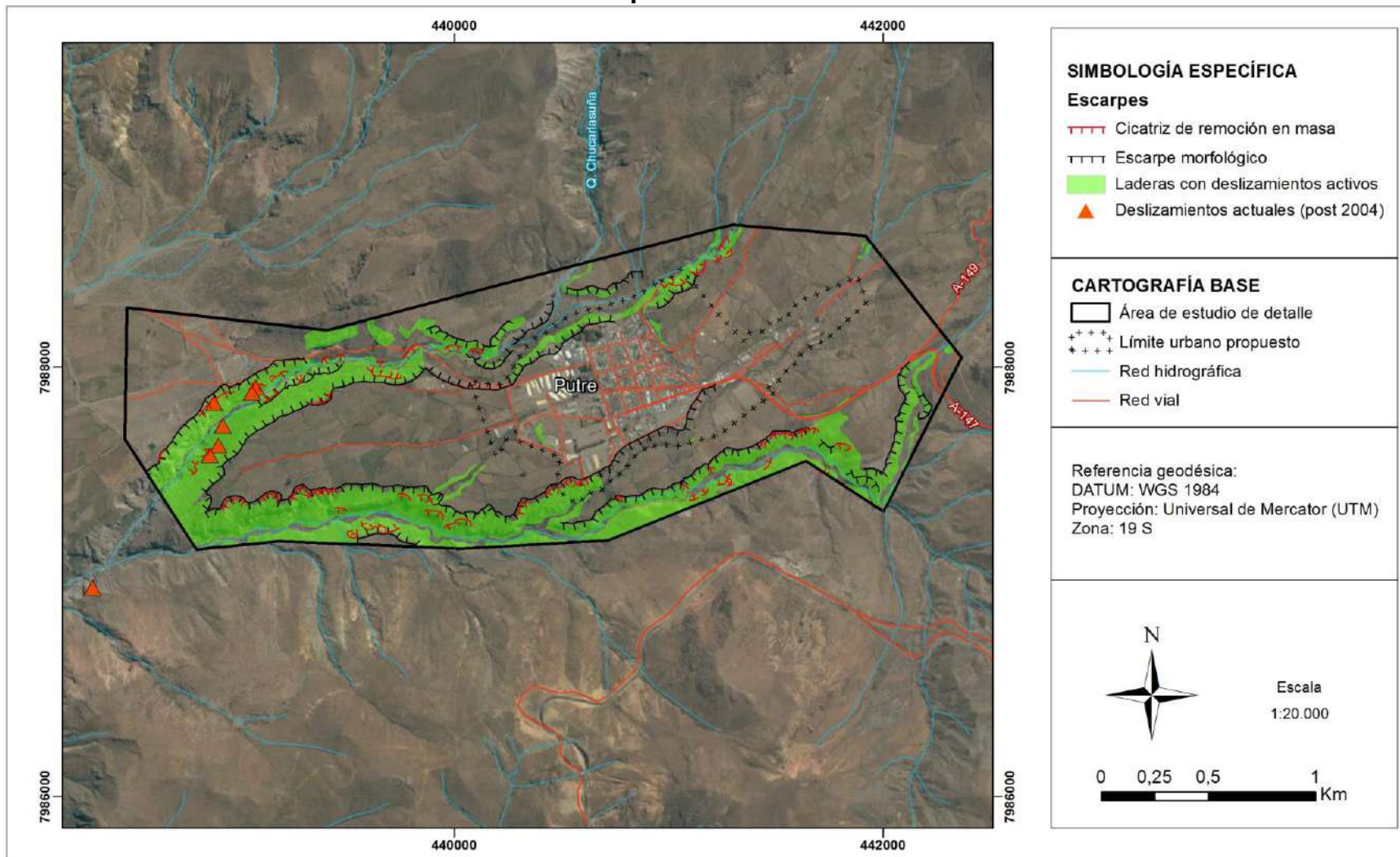
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 1-28: Imágenes de GoogleEarth mostrando dos sectores (A y B) afectados por deslizamientos de suelo en la quebrada Chucarlasuña, antes (A.1 y B.1) y después (A.2 y B.2) de su ocurrencia



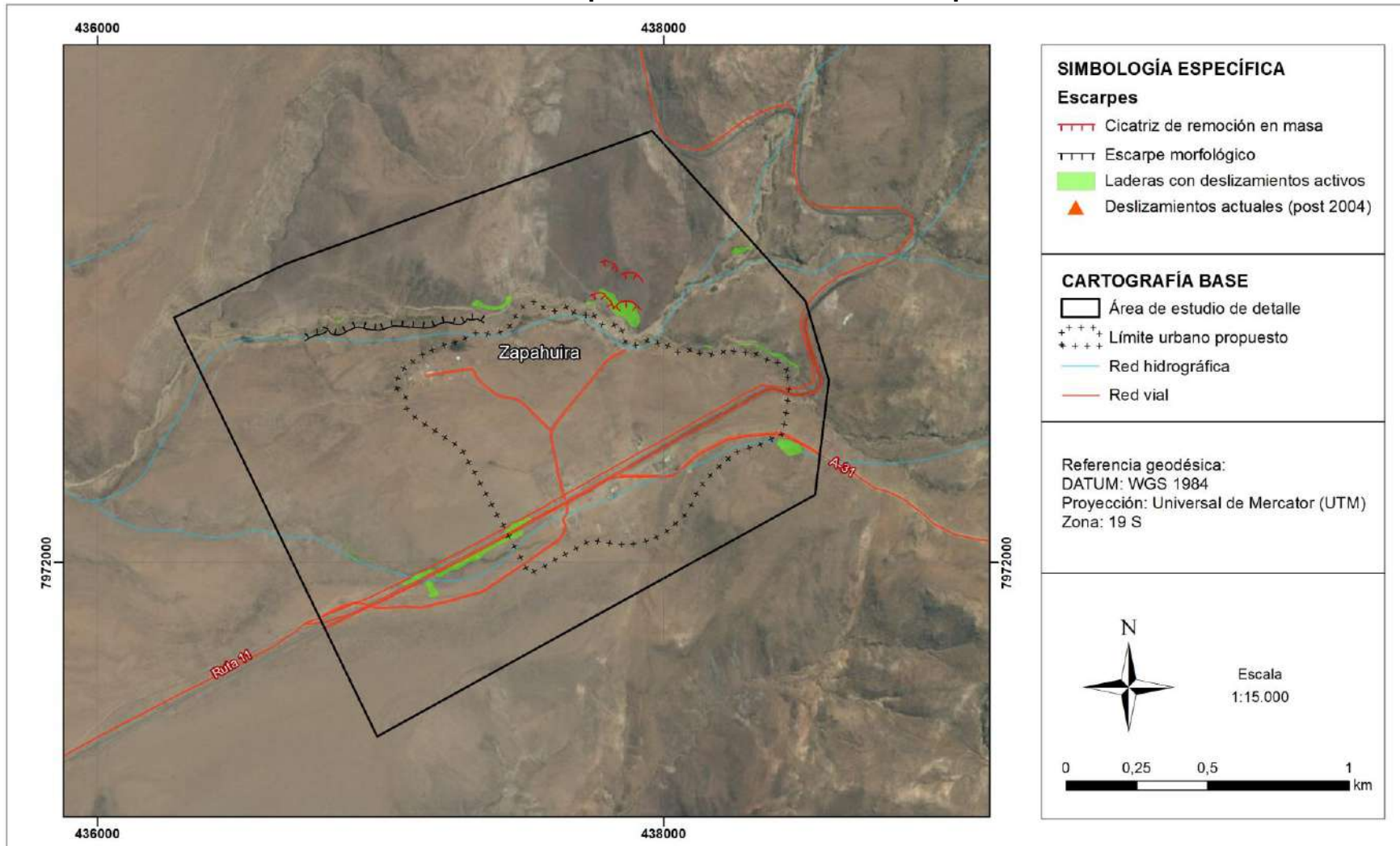
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 1-29: Mapa inventario del sector de Putre



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 1-30 Mapa inventario del sector de Zapahuira



Fuente: Elaboración propia

d) Inundaciones terrestres (desbordes de cauces y anegamientos)

Al igual que las remociones en masa, las inundaciones históricas han sido recurrentes en la comuna de Putre y estas se producen durante la época estival, asociadas a las intensas lluvias y tormentas características del "invierno altiplánico" (ver Cuadro 1.3-4).

Según el Plan de Desarrollo Comunal de Putre (I.M. de Putre, 2008), las frecuentes inundaciones que se producen durante el verano, sumadas a fenómenos de remociones en masa (ver Capítulo c)), provocan pérdidas en las tierras de cultivos, y cortan las vías de acceso y comunicación de varias localidades que quedan completamente aisladas por un número variable de días. Las vías que frecuentemente sufren daños producto de las inundaciones son las siguientes:

- El Camino Chucuyo – Caquena – Visviri sufre de cortes en períodos de lluvias intensas, formándose lagunas que impiden el tránsito de los vehículos por varios días.
- El Camino Chucuyo - Guallatire – Surire, que bordea el Río Lauca, sufre inundaciones en las áreas de topografía baja, impidiéndose el tránsito de vehículos por varios días.

Cuadro 1.3-4: Inventario de inundaciones y remociones en masa históricas

Año	Fecha	I	R.M	Sector	Daños	Referencia revisada
2015	12 de Febrero	X		Canal Quillane, Pampa Yuscuma	Desbordes del canal Quillane que pasa por el sector Alto de Putre, provocaron la inundación de calles, interrumpiendo el tránsito de vehículos y personas. La fuerte afluencia produjo además, el derrumbe del puente del mismo nombre, incomunicando parcelas que se encuentran en Pampa Yuscuma.	Portal AricaMia (consultado el 24/02/2015)
2012	12 de Marzo	X		Comunas de Putre y Camarones	Emergencia agrícola en zonas afectadas por inundaciones. Graves daños en infraestructura de riego de las comunas de Putre y Camarones.	Diario El Ariqueño
2012	Previo al 10 de marzo		X	Quebrada Chucarlasuña	Deslizamientos en laderas de la quebrada Chucarlasuña, retroceso de laderas.	Análisis de imágenes de GoogleEarth del periodo 2004-2012
2011	6 de Marzo		X	Ruta 11-CH	Deslizamientos en la ruta 11-CH, las comunicaciones sufrieron cortes	Diario La Tercera*
2011	2 de Febrero	X		Putre, Canal de Ancomacha	Hubo cortes de caminos y puentes afectados, por lo que personas quedaron aisladas	Diario La Tercera*
2004	12 de Febrero	X	X	Sector de Taipicagua, quebrada Cubrimani, camino internacional	Camión quedó atrapado en las aguas de la quebrada Cubrimani en el sector de Taipicagua. La ruta 11-Ch fue afectada por rodados.	Diario La Estrella de Arica.
1999	28 de marzo	X		Putre, Canal de Ancomacha	Aislamiento de lugareños que paseaban, producto de las inundaciones	Diario El Mercurio*
1997	3 de marzo	X		Camino a Bolivia	Camino a Bolivia interrumpido por inundaciones	Diario El Mercurio*
1976	12-sep	X		Socoroma, Zapahuira y Putre	Socoroma, Zapahuira, Putre y otras localidades quedaron aisladas	Diario El Mercurio*

Fuente: Elaboración propia. *Información tomada del catálogo DESINVENTAR - Sistema de Inventario de Efectos de Desastres, disponible online en <http://online.desinventar.org/>

1.4 DIAGNÓSTICO Y ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS PELIGROS GEOLÓGICOS

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

- Peligros No Zonificables: 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: casos en los que se puede categorizar la susceptibilidad y por lo tanto determinar una zonificación de la misma.

Para la zonificación de peligros geológicos se consideró toda la información recopilada en el presente trabajo, como son los antecedentes históricos, información recopilada en terreno, análisis de imágenes satelitales, línea base geológica y geomorfológica y los factores condicionantes en la zona de estudio.

a) Peligros No Zonificables

i) Peligro Sísmico

El riesgo sísmico está sujeto a la dinámica tectónica del país y a su contexto regional. Considerando lo discutido anteriormente, se puede concluir que el área de estudio ha sido afectada por sismos importantes, al igual que casi todo Chile y conociendo 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.

Particularmente para el área de estudio, el resultado del análisis anterior indica que el peligro sísmico del área se debe considerar uniforme, lo que no justifica una zonificación por generación de sismos.

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, por lo que no se puede descartar un evento de magnitud importante en el futuro.

b) Peligros Zonificables

i) Peligro Volcánico

El centro volcánico activo más cercano a las áreas de estudio de detalle de Putre y Zapahuira es el Complejo Volcánico Taapaca, situado a 12 km al NNE de la localidad de Putre y a 25 km al NNE de la localidad de Zapahuira.

La investigación llevada a cabo por Clavero y Sparks (2005) demuestra que el Complejo Volcánico Taapaca está lejos de ser un centro eruptivo extinto, pues este complejo volcánico ha tenido actividad eruptiva persistente y cíclica.

De acuerdo a Clavero (2007), existe una zona de alto peligro susceptible de ser afectada por avalanchas volcánicas, lahares, explosiones laterales y/o flujos piroclásticos de bloques y cenizas originados por colapso de columnas eruptivas o colapso de domos (Ilustración 1-31). El material volcánico proveniente de una eventual erupción, así como la removilización de sedimentos volcánicos producto de intensas lluvias, podría descender directamente por los valles-quebradas del edificio volcánico, pudiendo afectar a los asentamientos humanos emplazados en ellos. Es importante señalar que la dirección preferencial de tales escurrimientos de material, es decir, aquella dirección que tiene mayor probabilidad de ocurrencia, es hacia el SO, precisamente hacia donde se encuentra ubicada la localidad de Putre. Por lo tanto, este volcán representa una amenaza importante para el área de estudio de detalle de Putre.

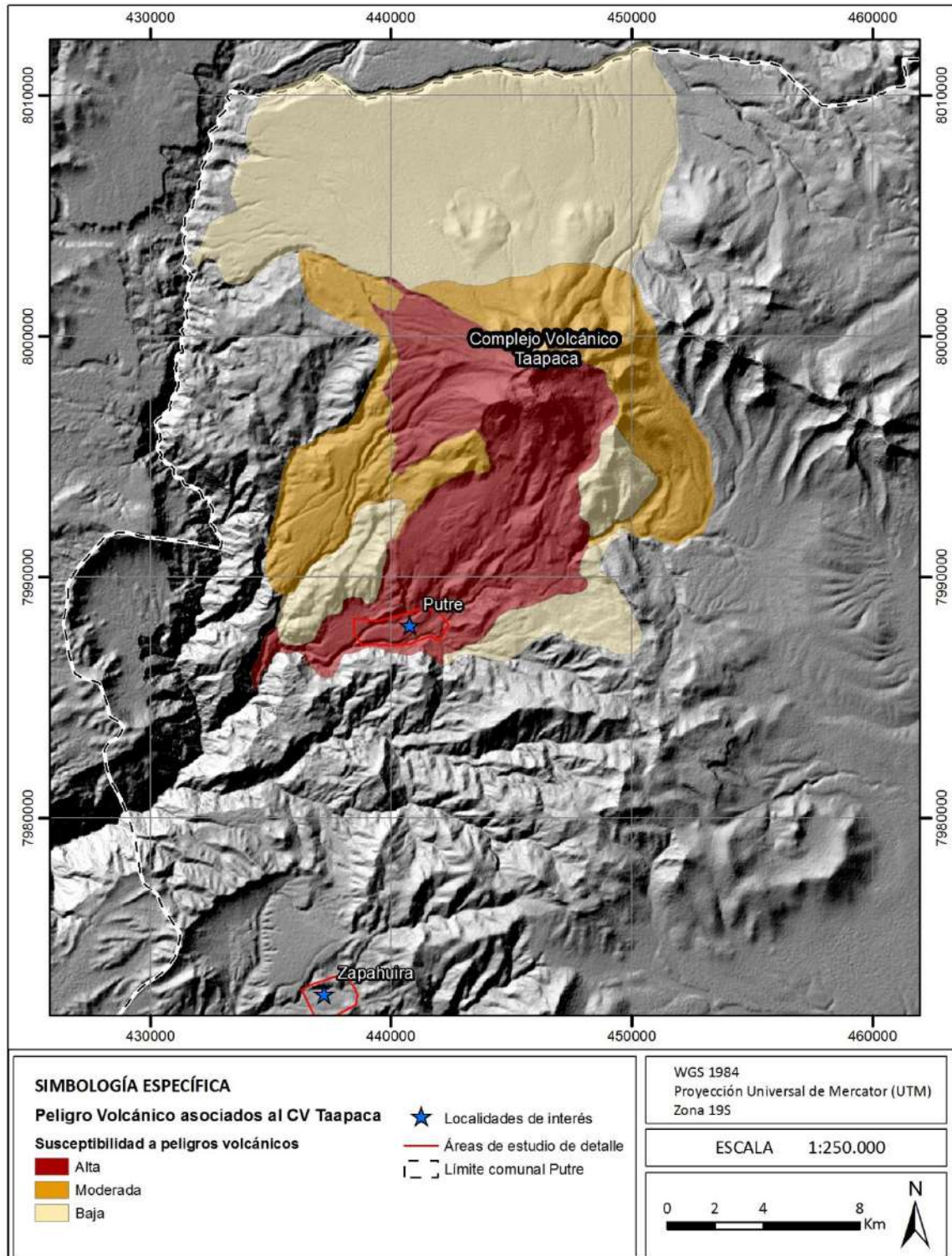
En particular, en el escenario de una reactivación del volcán, Clavero (2007) indica que existe una alta posibilidad de desestabilización del edificio volcánico actual, debido a las fuertes pendientes que presenta. Los efectos de un evento como este sobre la localidad de Putre podrían ser severos.

Con base en el análisis de la información obtenida a través de los equipos de monitoreo y vigilancia volcánica, el SERNAGEOMIN plantea a través de un Reporte de Actividad Volcánica publicado en febrero del año 2016 (SERNAGEOMIN, 2016), que el nivel de actividad del volcán Taapaca permanece en nivel verde, lo que significa que el volcán se encuentra activo y con comportamiento estable, sin riesgos inmediatos y con un tiempo probable para una erupción de meses/años.

Considerando este análisis y el alto peligro volcánico al que se encuentra sometido el área estudio de detalle de Putre (Ilustración 1-31), se sugiere la elaboración de un plan de contingencia que contemple vías de evacuación a partir de la red de vigilancia volcánica que ejecuta el SERNAGEOMIN.

Por otra parte, el volcán Parinacota, situado 40 km al este de Putre y 50 km al este de Zapahuira (Ilustración 1-26), es un centro volcánico eruptivo que podría volver a activarse, y sus erupciones generar lluvias de tefra y lahares por fusión de la cubierta de hielo. Existe riesgo para las poblaciones y asentamientos aledaños a la base del volcán, por lo tanto, no representa una amenaza para las localidades de Putre y Zapahuira. Sin embargo, erupciones de este centro volcánico o de otros aledaños a las áreas de estudio, podrían causar efectos indirectos sobre ellas, como contaminación de aguas y problemas de transporte o abastecimiento.

Ilustración 1-31: Peligros volcánicos asociados al Complejo Volcánico Taapaca.



Fuente: Elaboración propia con base en Clavero (2007).

ii) Peligro de Remociones en Masa

Para la zonificación de los sectores susceptibles de ser afectados por remociones en masa, se consideró la información recopilada en la línea de base geológica y geomorfológica, en el inventario de peligros geológicos y durante la visita a terreno.

El presente análisis consideró los siguientes tipos de remociones en masa:

- Peligro de caída de bloques: generación y alcance.
- Peligro de deslizamiento: generación.
- Peligro de Retroceso de Laderas

A continuación se detalla la metodología específica utilizada para la zonificación de estos peligros.

- *Caída de Rocas*

El análisis de susceptibilidad de caída de rocas se realizó considerando la distribución y características de las caídas de rocas identificadas en el catastro de peligros geológicos, analizando e interpretando las imágenes satelitales y considerando las observaciones realizadas en terreno. De esta información se infiere que las caídas de rocas se generan en los afloramientos rocosos de los sectores montañosos, generalmente en las áreas con pendientes altas. Los bloques rocosos desprendidos descienden por las laderas hasta frenar en zonas con pendientes menores, usualmente depositándose en fondos de quebradas, abanicos aluviales o sectores del piedemonte.

Luego, para la zonificación del peligro de caída de rocas se consideraron dos factores principales:

- Presencia de afloramientos rocosos
- Pendiente del terreno

Además, se analizaron de manera separada los sectores susceptibles de generar estos procesos y los sectores susceptibles de ser alcanzados por los bloques caídos.

Para la **susceptibilidad de generación** de caída de rocas se identificaron los afloramientos rocosos presentes en las áreas de estudio de detalle, tarea que fue realizada a partir del análisis de fotografías aéreas y observaciones de terreno. Una vez que se contó con una delimitación de los afloramientos, se calculó su pendiente, a partir de lo cual se derivó la siguiente zonificación:

- **Muy Alta Susceptibilidad:** Zonas con afloramientos de roca y pendientes mayores a 35°.
- **Alta Susceptibilidad:** Zonas con afloramientos de rocas y pendientes entre 25° y 35°.
- **Moderada Susceptibilidad:** Zonas con afloramientos de roca y pendientes entre 15° y 25°.

Luego, para la **susceptibilidad de alcance** de caída de rocas se consideraron las áreas ubicadas ladera abajo de las zonas de generación y cuyas pendientes fueran superiores a 10°. La categoría de susceptibilidad de alcance se consideró dependiente

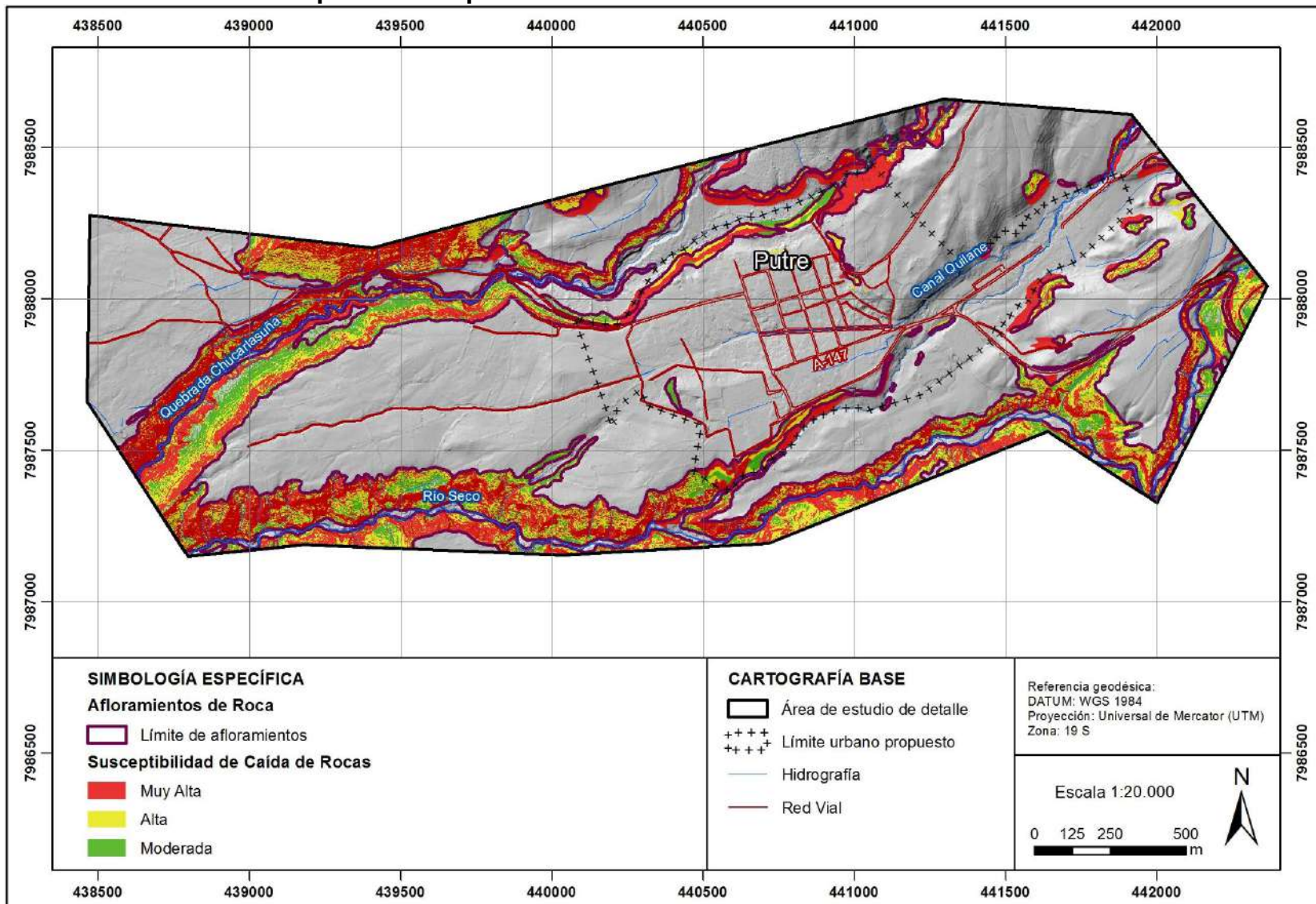
del grado de susceptibilidad de la fuente de los bloques desprendidos (zona de generación), con lo cual se obtuvo la siguiente zonificación:

- **Muy Alta Susceptibilidad:** Zonas con pendientes mayores a 10° ubicadas ladera abajo de las zonas de muy alta susceptibilidad de generación de caídas de rocas.
- **Alta Susceptibilidad:** Zonas con pendientes mayores a 10° ubicadas ladera abajo de las zonas de alta susceptibilidad de generación de caídas de rocas.
- **Moderada Susceptibilidad:** Zonas con pendientes mayores a 10° ubicadas ladera abajo de las zonas de moderada susceptibilidad de generación de caídas de rocas.

La zonificación de Susceptibilidad de Caída de Rocas de las áreas de estudio de detalle de Putre y Zapahuira se presenta a escala 1:20.000 en la ilustración 1-32 y la ilustración 1-33, respectivamente, y a escala 1:5.000, fuera de texto, en el Plano N°3 y Plano N°4.

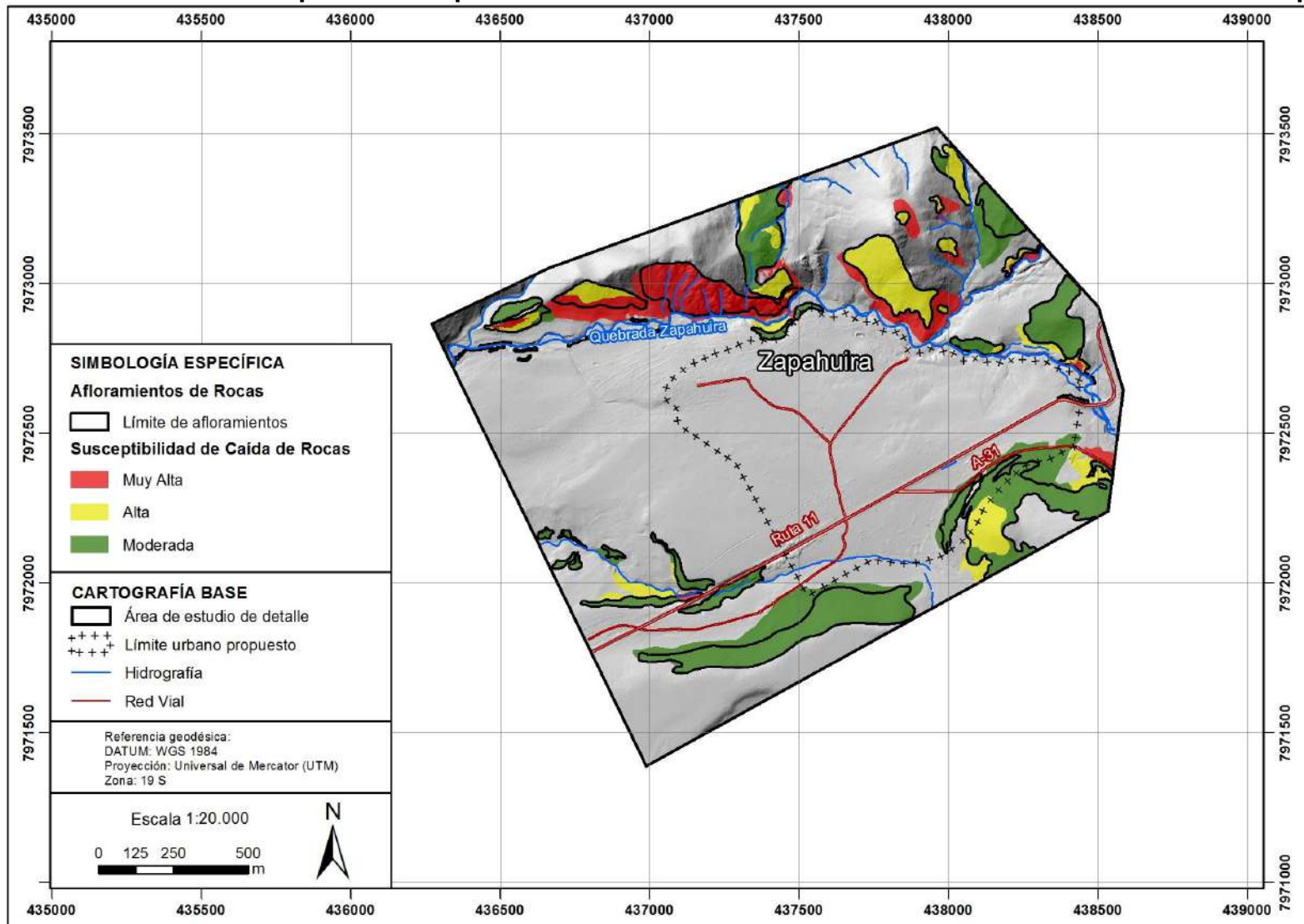
De lo anterior se desprende que las zonas con mayor susceptibilidad de ser afectadas por caídas de rocas se concentran en los afloramientos de rocas y las respectivas laderas asociadas a quebradas principales, *i.e.* en la Quebrada Chucarlasuña y en la quebrada del río Seco del área de Putre y en la Quebrada Zapahuira del área de Zapahuira.

Ilustración 1-32: Mapa de Susceptibilidad de Caída de Rocas en el área de estudio de detalle de Putre.



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 1-33: Mapa de Susceptibilidad de Caída de Rocas en el área de estudio de detalle de Zapahuira.

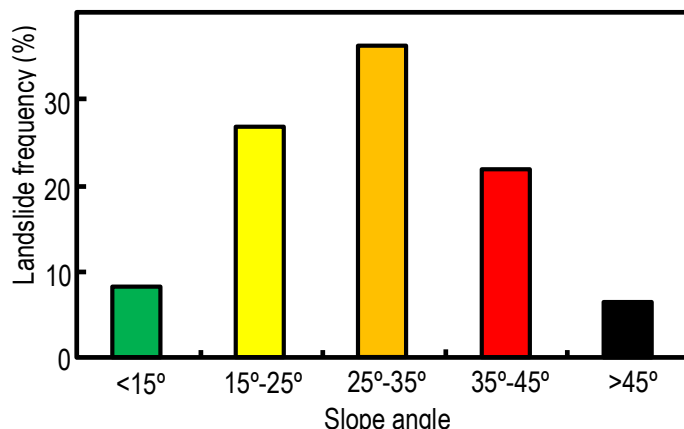


Fuente: Elaboración propia

- *Deslizamientos*

Uno de los principales factores que determina la generación de remociones en masa es la pendiente de las laderas. Para diferenciar qué 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, relacionado principalmente al ángulo de fricción interno del material (Ilustración 1-34), siendo también frecuentes entre los 15° y 25° y sobre los 35° de pendiente. Luego, las pendientes del terreno pueden ser utilizadas como criterio para una clasificación general del territorio frente a potenciales deslizamientos.

Ilustración 1-34: Frecuencia de deslizamientos en función de la pendiente del terreno



Fuente: Esaki et al.(2005)

El análisis de susceptibilidad de deslizamientos se realizó analizando e interpretando las imágenes satelitales, considerando las observaciones realizadas en terreno y considerando la información morfométrica de las áreas de estudio mediante cartas de pendientes. En la Ilustración 1-35 e Ilustración 1-36, se presentan las cartas de pendiente de las áreas de detalle de las localidades de Putre y Zapahuira, respectivamente. Estas fueron elaboradas a partir de modelos de elevación construidos con la topografía (curvas de nivel cada 2 m) detallada de cada sector.

Con base en lo anterior, se determinaron las siguientes categorías para la zonificación:

- **Muy Alta Susceptibilidad:** Zonas con pendiente mayor a 15° con evidencia de deslizamientos activos.
- **Alta Susceptibilidad:** Zonas con pendiente mayor a 25° sin evidencia de deslizamientos activos.

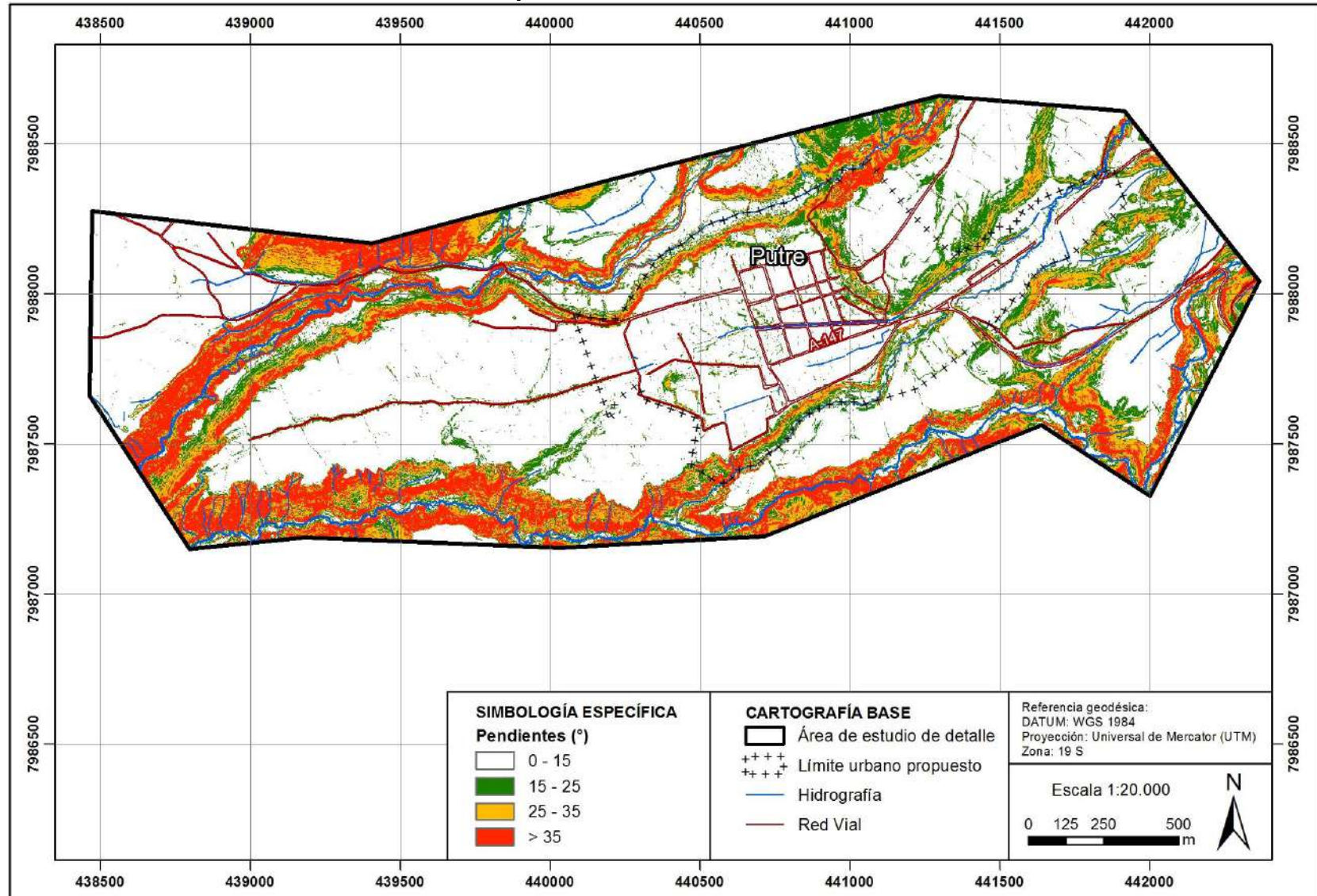
- **Moderada Susceptibilidad:** Zonas con pendiente moderada (15°-25°) sin evidencia de deslizamientos activos.

La zonificación de Susceptibilidad de Deslizamientos de las áreas de estudio de detalle de Putre y Zapahuiria se presenta a escala 1:20.000 en la ilustración 1-37 e ilustración 1-38, respectivamente, y a escala 1:5.000, fuera de texto, en el Plano N°5 y Plano N°6.

De lo anterior se desprende lo siguiente:

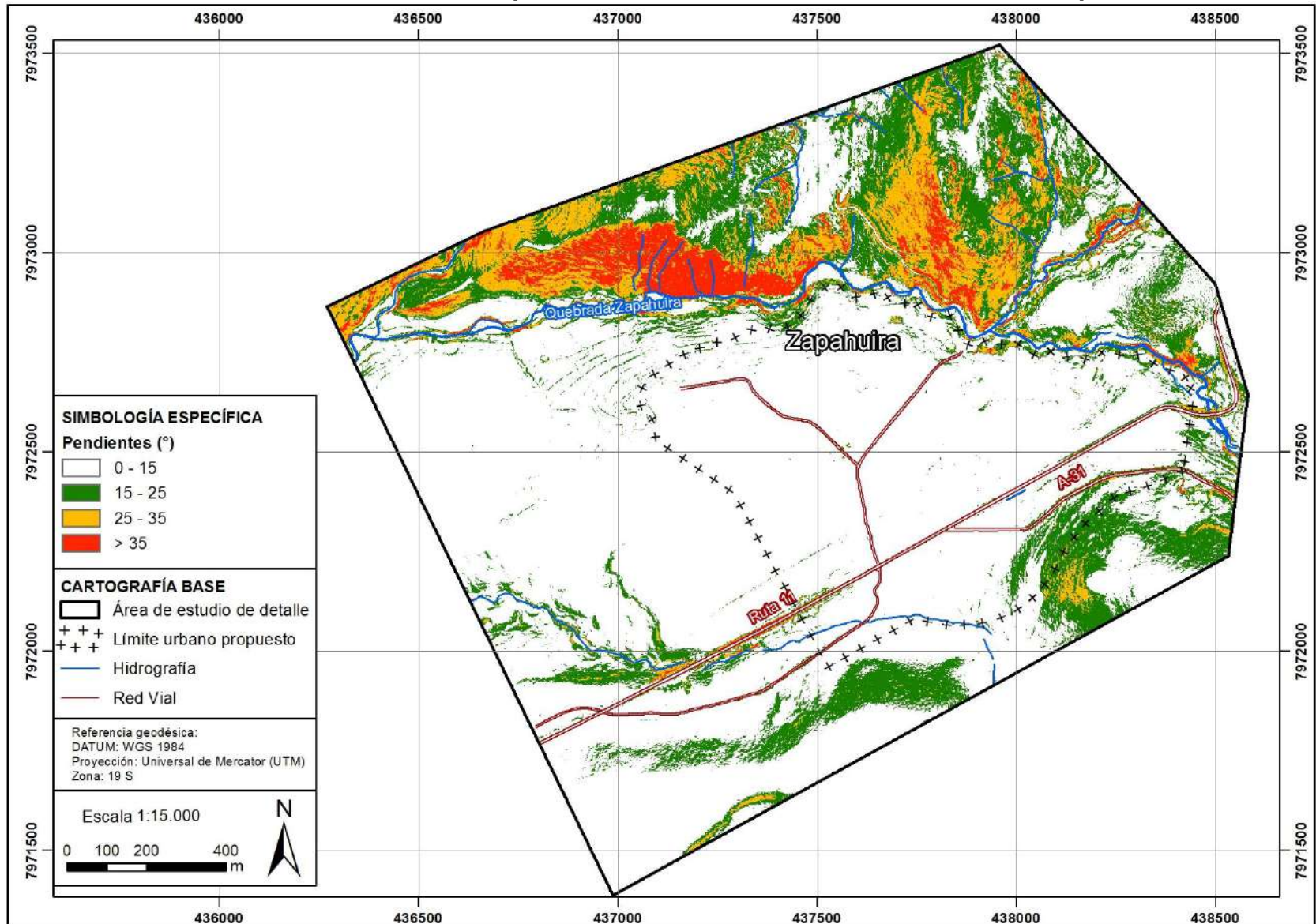
1. En el área de Putre, las zonas con mayor susceptibilidad de ser afectadas por deslizamientos se concentran en laderas asociadas a quebradas principales, *i.e.* en la Quebrada Chucarlasuña y en la quebrada del río Seco.
2. En el área de Zapahuiria, las zonas con mayor susceptibilidad de ser afectadas por deslizamientos se encuentran, principalmente, en algunas laderas asociadas a la Quebrada Zapahuiria, la Ruta 11 y a la Ruta A-31.

Ilustración 1-35: Carta de pendientes del área de estudio de detalle de Putre.



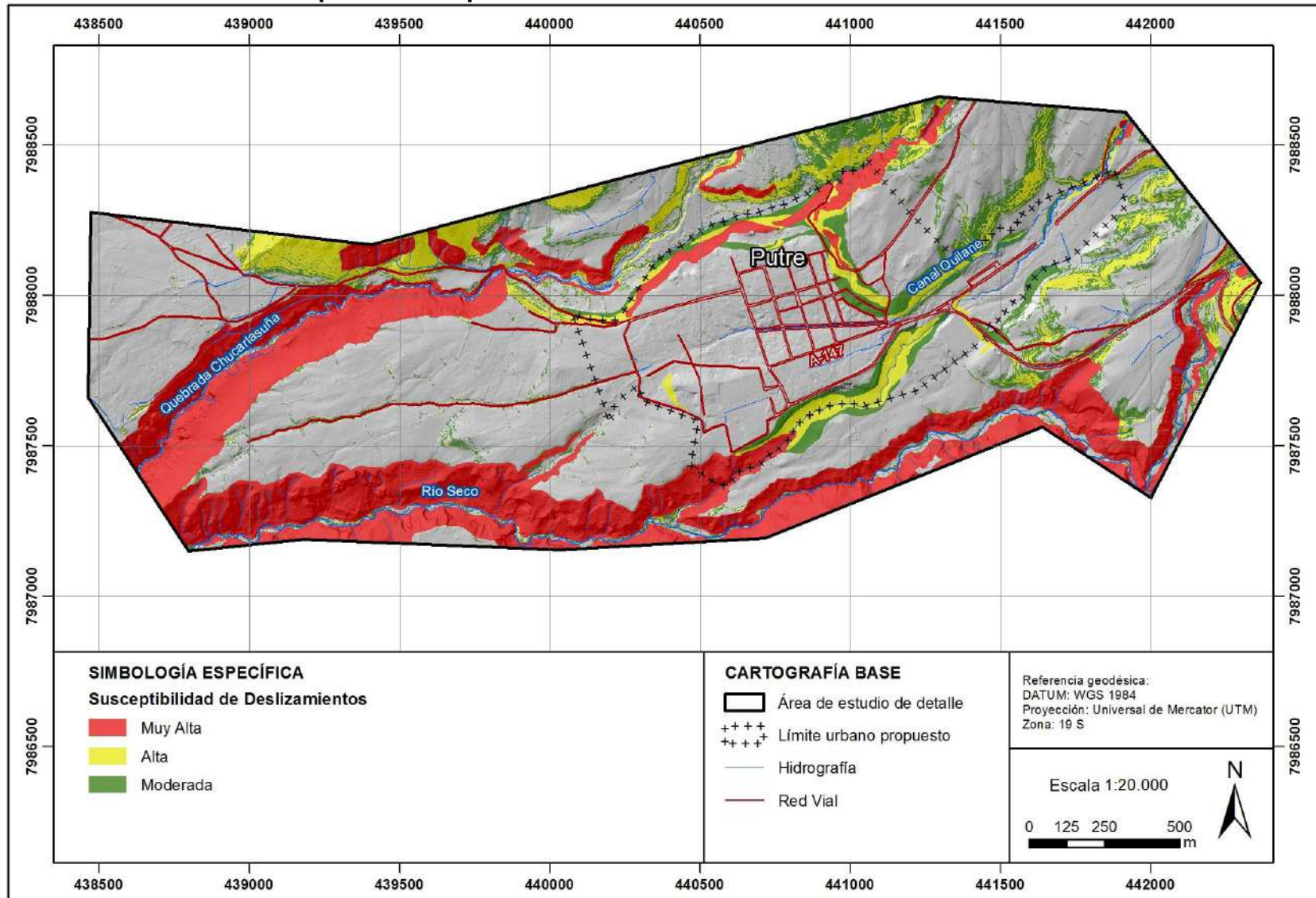
Fuente: Elaboración propia a partir de un DEM con un tamaño de celda de 0,25 m.

Ilustración 1-36: Carta de pendientes del área de estudio de detalle de Zapahuira.



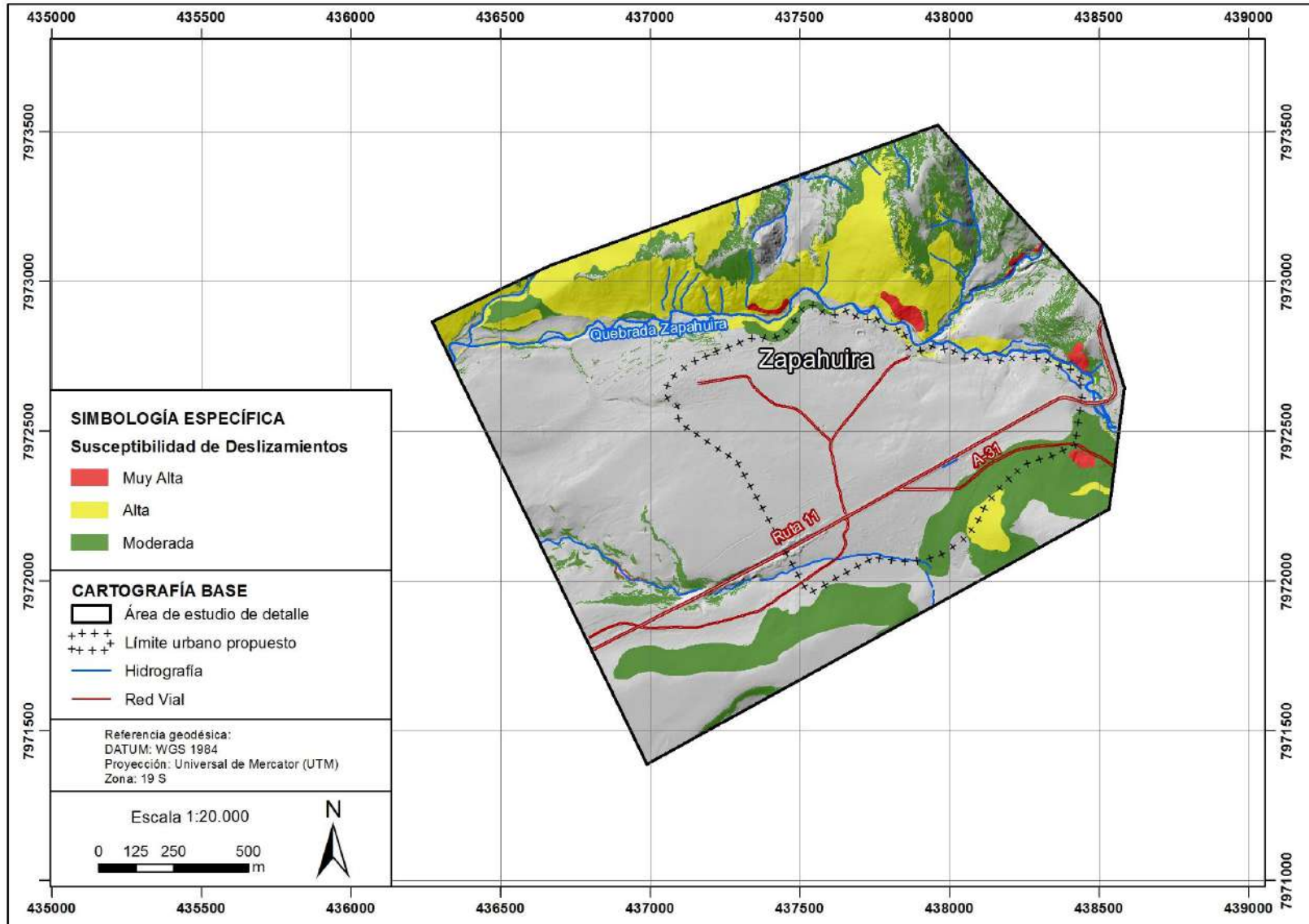
Fuente: Elaboración propia a partir de un DEM con un tamaño de celda de 0,25 m.

Ilustración 1-37: Mapa de Susceptibilidad de Deslizamientos en el área de estudio de detalle de Putre.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 1-38: Mapa de Susceptibilidad de Deslizamientos en el área de estudio de detalle de Zapahuira.



Fuente: Elaboración propia.

- *Retroceso de Laderas*

La zonificación de susceptibilidad de retroceso de laderas se realizó a partir del análisis e interpretación de imágenes satelitales, de las observaciones realizada durante la visita a terreno y del mapeo de los escarpes presentes en depósitos no consolidados.

En el área de estudio de detalle de Putre, los escarpes identificados se han originado como consecuencia de procesos de erosión que han sido recurrentes. Por otro lado, en el área de Zapahuira estos procesos han sido menos intensos debido a la menor incisión en las quebradas. Debido a esto, se hizo una distinción en los escarpes identificados en Putre, estableciendo dos criterios de zonificación de susceptibilidad de retroceso de laderas para el área de Putre.

- *Criterio 1:*

Considera aquellos escarpes que presentan una erosión fluvial intensa y activa en la base de la ladera, y escarpes con erosión fluvial solo en caso de eventos meteorológicos extremos. Se definieron las siguientes categorías de susceptibilidad:

- **Muy Alta Susceptibilidad:** corresponde a zonas ubicadas a menos de 50 m de los escarpes con evidencias de erosión fluvial.
- **Moderada Susceptibilidad:** corresponde a zonas ubicadas entre 50 y 100 m de los escarpes con evidencias de erosión fluvial.

- *Criterio 2:*

Considera aquellos escarpes asociados a quebradas menores, es decir, a quebradas que son afectadas por erosión fluvial en su base solamente y en caso de eventos meteorológicos extremos. Se definieron las siguientes categorías de susceptibilidad:

- **Muy Alta Susceptibilidad:** corresponde a zonas ubicadas a menos de 25 m de los escarpes.
- **Moderada Susceptibilidad:** corresponde a zonas ubicadas entre 25 y 50 m de los escarpes.

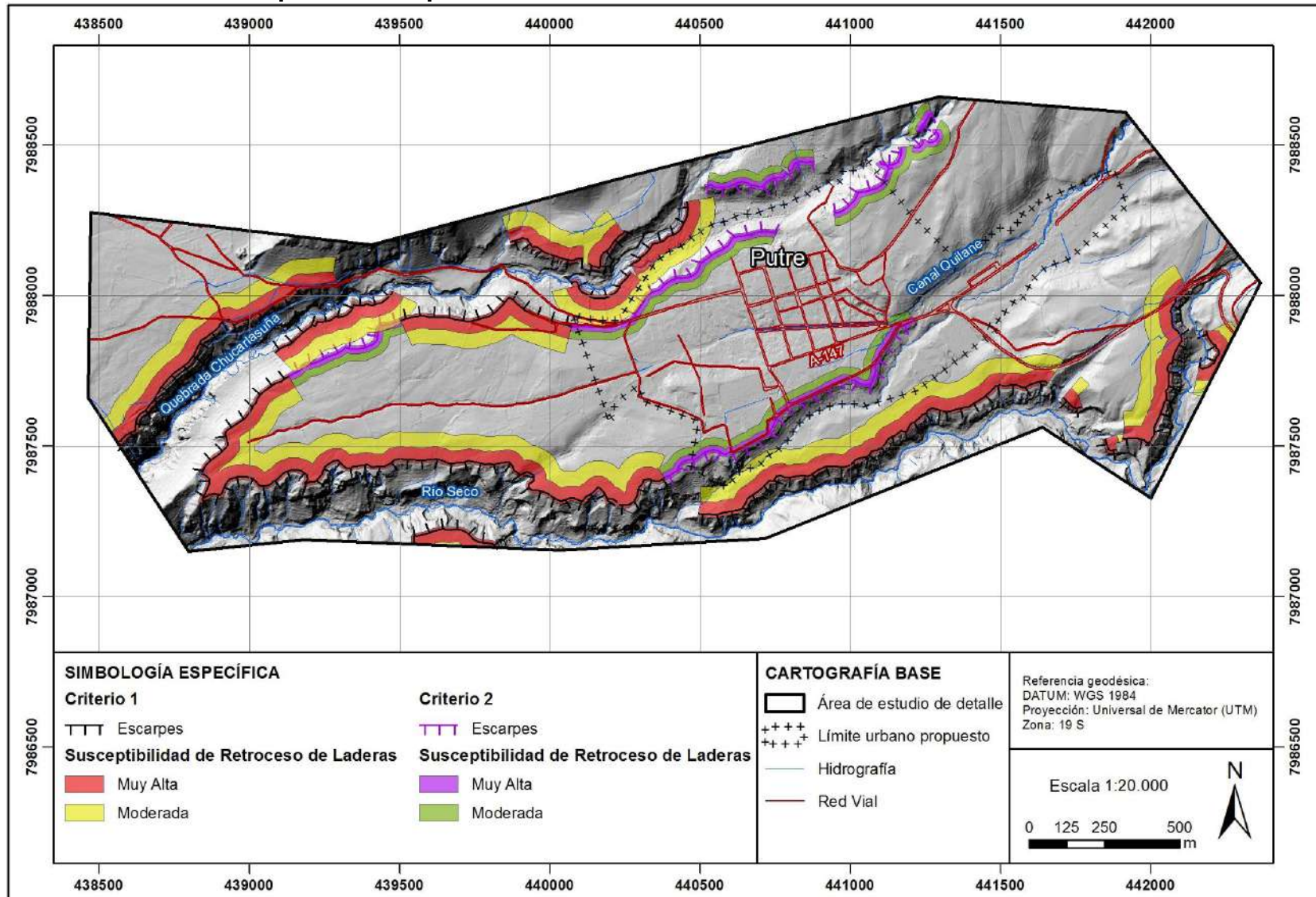
En el área de Zapahuira, se considera solamente el Criterio 2 para la zonificación.

La zonificación de Susceptibilidad de Retroceso de Laderas de las áreas de estudio de detalle de Putre y Zapahuira se presenta a escala 1:20.000 en la Ilustración 1-39 e Ilustración 1-40, respectivamente, y a escala 1:5.000, fuera de texto, en el Plano N°7 y Plano N°8.

De lo anterior se desprende que las zonas con mayor susceptibilidad de ser afectadas por retroceso de laderas se concentran en los escarpes asociados a

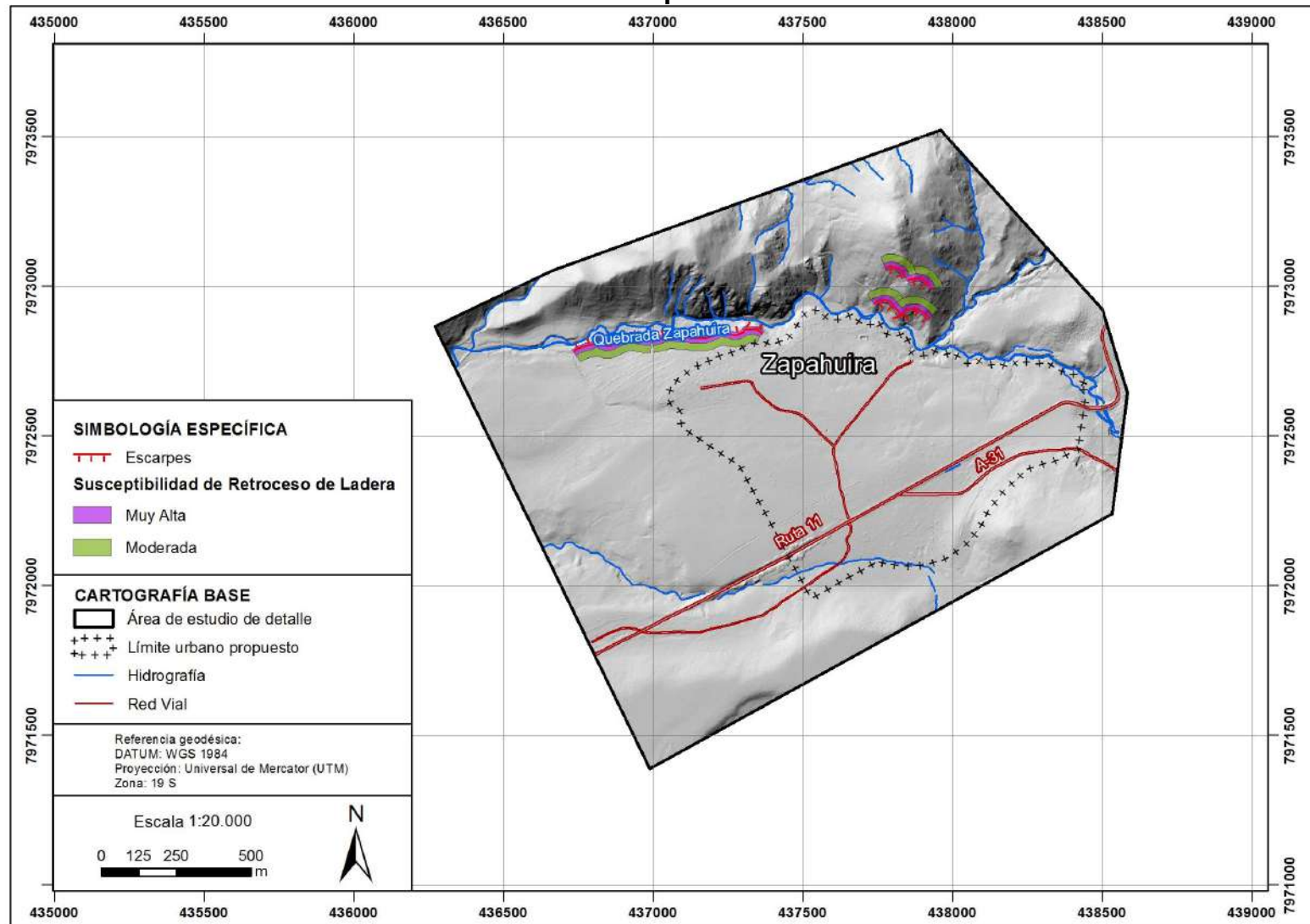
quebradas principales, *i.e.* en la Quebrada Chucarlasuña y en la quebrada del río Seco del área de Putre y en la Quebrada Zapahuirá del área de Zapahuirá.

Ilustración 1-39: Mapa de Susceptibilidad de Retroceso de Laderas en el área de estudio de detalle de Putre.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 1-40: Mapa de Susceptibilidad de Retroceso de Laderas en el área de estudio de detalle de Zapahuira.



Fuente:

Elaboración propia.

iii) Peligro de Flujos de Barro y/o Detritos e Inundaciones por Desborde de Cauces.

La zonificación de susceptibilidad de flujos de barro y/o detritos e inundaciones por desborde de cauce se realizó tomando en cuenta lo siguiente:

- Se consideraron las unidades geológicas reconocidas en el área de estudio a partir de la recopilación de antecedentes, identificando los depósitos aluviales de piedemonte y de quebradas del Holoceno y depósitos fluviales del mismo tiempo geológico.
- Se utilizaron marcadores geomorfológicos como escarpes de terrazas, barras, depresiones y sobresaltos del terreno para la identificación de las áreas susceptibles.
- Se consideraron los antecedentes históricos de flujos y/o inundaciones ocurridas en las áreas de estudio y la información bibliográfica recopilada.
- Se analizaron e interpretaron fotografías aéreas e imágenes satelitales.

En la visita de terreno, se pudieron verificar algunas zonas susceptibles a ser afectada por flujos e inundaciones. A partir de las consideraciones anteriores, se definieron las siguientes categorías para realizar la zonificación de susceptibilidad de flujos e inundaciones:

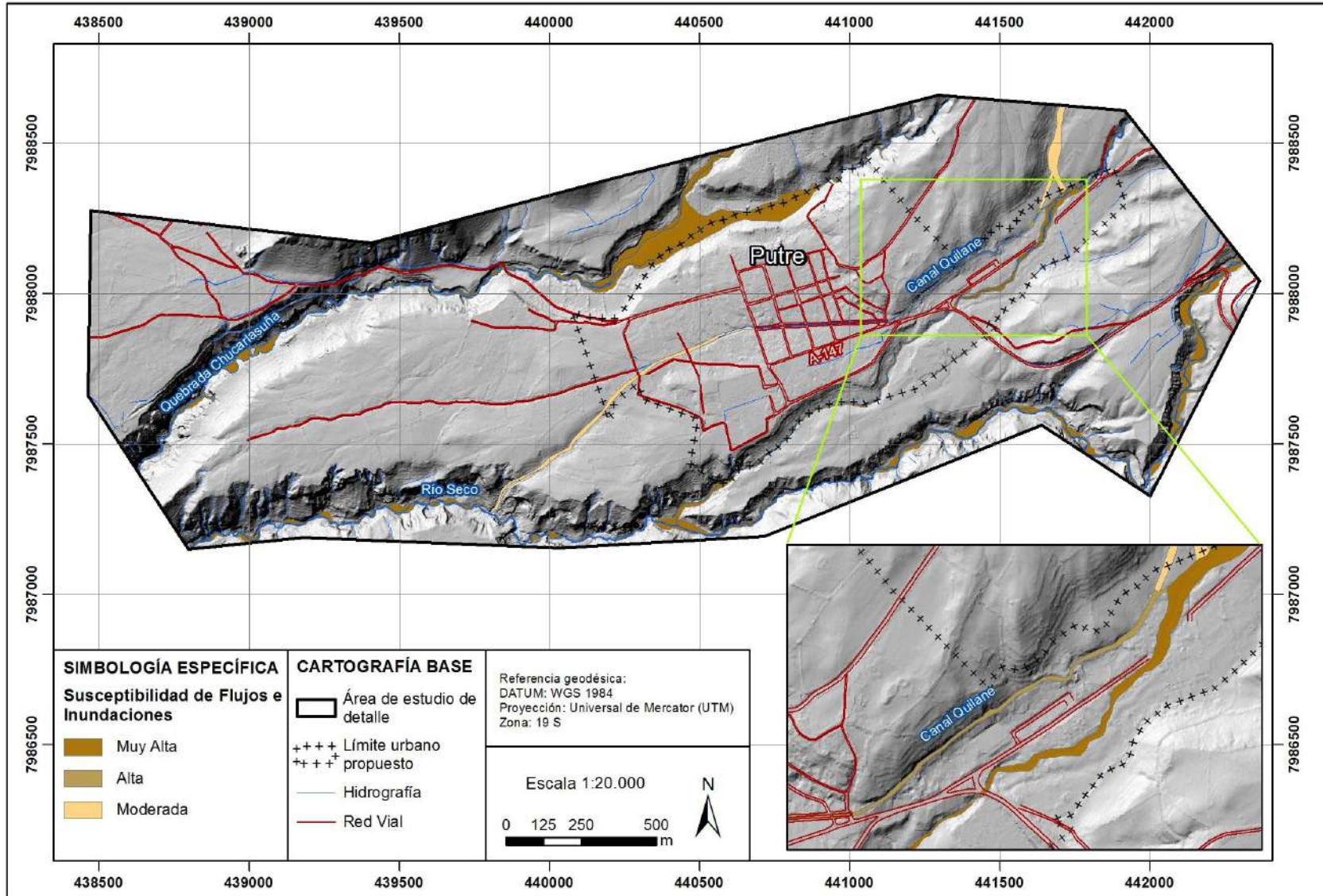
- **Muy Alta Susceptibilidad:** corresponden a sectores de cauces naturales activos de quebradas mayores.
- **Alta Susceptibilidad:** corresponden a sectores de cauces naturales activos de quebradas menores.
- **Moderada Susceptibilidad:** corresponden a sectores de cauces naturales activos de quebradas menores sin escurrimiento activo, que pueden ser reactivados en caso de eventos meteorológicos extremos.

Estos sectores se consideran como susceptibles debido a que en caso de fallo de las obras realizadas en el sector (mal mantenimiento, fin de la vida útil de la instalación, colmatación de los drenes, etc.) o de eventos meteorológicos extremos, que no se tuvieron en cuenta durante su etapa de estudio, pueden suponer un riesgo potencial.

La zonificación de Susceptibilidad de Flujos de Barro y/o Detritos e Inundaciones por Desborde de Cauce de las áreas de estudio de detalle de Putre y Zapahuiria se presenta a escala 1:15.000 en la Ilustración 1-41 e Ilustración 1-42, respectivamente, y a escala 1:5.000, fuera de texto, en el Plano N°9 y Plano N°10.

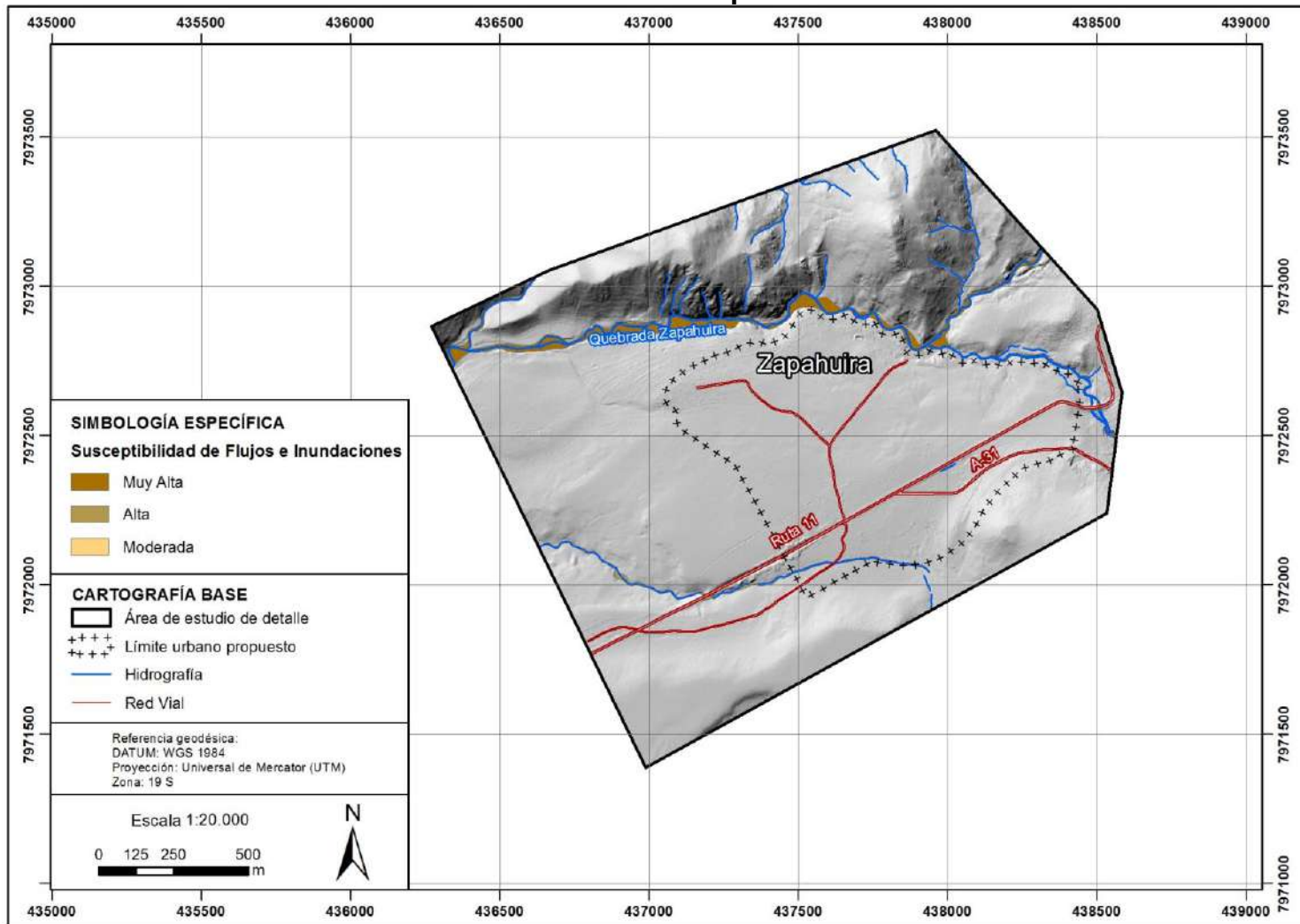
De lo anterior se desprende que las zonas con mayor susceptibilidad de ser afectadas por flujos e inundaciones se concentran en los escarpes asociados a quebradas principales, *i.e.* en la Quebrada Chucarlasmuña y en la quebrada del río Seco del área de Putre y en la Quebrada Zapahuiria del área de Zapahuiria. Cabe destacar que se le asignó una Susceptibilidad "Alta" al canal Quillane que pasa por el sector Alto de Putre, considerando el reciente desborde que sufrió (febrero del 2015) y que provocó la inundación de calles, interrumpiendo el tránsito de vehículos y personas (ver Sección 1.3.2d)).

Ilustración 1-41: Mapa de Susceptibilidad de Flujos e Inundaciones en el área de estudio de detalle de Putre.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 1-42: Mapa de Susceptibilidad de Flujos e Inundaciones en el área de estudio de detalle de Zapahuira.



Fuente: Elaboración propia.

1.5 RECOMENDACIÓN DE CRITERIOS PARA LA ZONIFICACIÓN

Una vez identificados los peligros, definidos los grados de susceptibilidad y el alcance territorial de ellos, es necesario incorporar estos resultados en la zonificación urbana. Esto debe realizarse a través de la aplicación del artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) y/o tomando otras medidas de planificación acordes a las atribuciones que otorga la LGUC y la OGUC al Plan Regulador Comunal, como por ejemplo diferenciación de usos de suelo y regulación de la forma e intensidad de su ocupación.

Para poder definir los criterios que permitan incorporar los peligros naturales dentro de la zonificación urbana, es necesario tener claros los criterios utilizados para la definición de las diferentes categorías de susceptibilidad y la zonificación resultante. Resulta muy relevante comprender que la categorización de susceptibilidad se relaciona con la posibilidad de ocurrencia de un fenómeno dado en un área determinada, pero corresponde a una categorización cualitativa de carácter relativo y no cuantitativa (para mayor detalle ver la sección 2). Pese a que el concepto de susceptibilidad no contempla la cuantificación de períodos de retorno ni probabilidades de ocurrencia, sí clasifica en niveles que indican de manera relativa si existe mayor o menor posibilidad de que ocurra un cierto fenómeno. En este sentido, las zonas de muy alta susceptibilidad son aquellas que muy probablemente serán afectadas en caso de ocurrir un evento del peligro analizado, las zonas de alta susceptibilidad serán aquellas afectadas por eventos extremos (en muchos casos son los más grandes de los que se tengan registros históricos) y las de moderada susceptibilidad se asocian a eventos excepcionales, de los que muchas veces no existen registros históricos. En términos prácticos, se recomienda que mientras mayor sea la susceptibilidad de un área específica, mayores sean las restricciones y/o condicionantes para su utilización.

Desde esta perspectiva, y con el fin de homologar las categorías de susceptibilidad al lenguaje de la OGUC, se propone aplicar el artículo 2.1.17 a las zonas de muy alta y alta susceptibilidad (ver Cuadro 1.5-1). Para las zonas de moderada susceptibilidad se recomienda aplicar normas urbanísticas que regulen la forma e intensidad de su ocupación y excluir el equipamiento crítico en el caso de las áreas no consolidadas (educación, salud y seguridad), como se muestra en el Cuadro 1.5-1. En las zonas de moderada susceptibilidad no se recomienda aplicar el artículo 2.1.17, debido a que esta categoría de susceptibilidad está asociada a eventos excepcionales de un peligro dado.

1.5.1 Recomendaciones para el Peligro Volcánico

Teniendo en consideración el hecho de que toda la localidad de Putre se ubica dentro del área de Alta Susceptibilidad de Peligro Volcánico (Ilustración 1-31), se recomienda la implementación de sistemas de alerta temprana y evacuación de la población. Estos sistemas deben contemplar un plan de emergencia que sea comunicado adecuada y oportunamente 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.

Dentro del plan deberían identificarse zonas seguras, o de la menor susceptibilidad en la comuna, que permitan establecer y atender a la población en caso de algún evento.

1.5.2 Otras Recomendaciones

Con respecto a las inundaciones, se recomienda realizar estudios hidrológicos detallados en las zonas susceptibles a ser afectadas por inundaciones, con el fin de acotar los períodos de retornos asociados. Para las áreas susceptibles a estos fenómenos se debe condicionar la utilización a resultados de estudios de detalle, los que deben ser realizados por profesionales especialistas en el tema, como indica la OGUC, que determinen el tipo de medidas de mitigación y su adecuado dimensionamiento a los factores locales y tamaño del proyecto. Se recomienda realizar estudios en detalle, que incluyan la instalación de piezómetros para medir cómo se comportan los suelos frente a períodos de precipitación intensos, con el objetivo de determinar el comportamiento geomecánico del suelo y, de esta manera, generar alertas tempranas a la población. En terrenos altamente susceptibles de ser afectados por estos peligros, se recomienda proponer usos sólo con fines recreativos y prohibir la utilización de estas áreas con fines habitacionales.

Finalmente, se recomienda realizar capacitaciones a la población con respecto a los peligros geológicos, considerando sus causas y consecuencias, en las que además se informe adecuadamente acerca de las medidas a adoptar frente a situaciones de emergencia (sistemas de alerta, vías de evacuación, zonas seguras). En caso de 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 condiciona una reacción correcta y autónoma por parte de la población. Como ejemplo se puede citar lo ocurrido durante el terremoto y maremoto del 27 Febrero de 2010, en la zona centro sur de Chile, donde los pobladores de varias localidades se alejaron de la costa por iniciativa propia después del sismo, o la evacuación de la localidad de Chaitén el año 2008 a causa de la erupción del volcán del mismo nombre, y que evitó desgracias personales a causa de un evento que resultó en la casi completa destrucción de la ciudad.

Cuadro 1.5-1: Recomendación de criterios para la zonificación en áreas de riesgo

TIPO DE PELIGRO	GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD	DESCRIPCIÓN	CRITERIO DE ZONIFICACIÓN URBANA	
			ÁREA NO CONSOLIDADA	ÁREA CONSOLIDADA
CAÍDA DE ROCAS	MUY ALTA	Zonas con afloramientos de roca y pendientes mayores a 35°(zonas de generación) y sectores con pendientes mayores a 10°, ubicados pendiente abajo de las zonas de muy alta susceptibilidad de generación de caída de rocas (zonas de alcance).	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde
	ALTA	Zonas con afloramientos de roca y pendientes entre 25° y 35°(zonas de generación) y sectores con pendientes mayores a 10°, ubicados pendiente abajo de las zonas de alta susceptibilidad de generación de caída de rocas (zonas de alcance).	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde	Riesgo (2.1.17) Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial*
	MODERADA	Zonas con afloramientos de roca y pendientes entre 15° y 25°(zonas de generación) y sectores con pendientes mayores a 10°, ubicados pendiente abajo de las zonas de moderada susceptibilidad de generación de caída de rocas (zonas de alcance).	Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial	Mitigación con Normas Urbanísticas Todos los usos
DESLIZAMIENTOS Y RETROCESO DE LADERAS	MUY ALTA	Zonas con pendiente mayor a 15° con evidencia de deslizamientos activos. (Deslizamientos) y sectores ubicados a menos de 50 m de escarpes con evidencias de erosión fluvial (Criterio 1) y sectores ubicados a menos de 25 m de los escarpes asociados a quebradas menores (Criterio 2) (Retroceso de Laderas).	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde
	ALTA	Zonas con pendiente mayor a 25° sin	Riesgo (2.1.17)	Riesgo (2.1.17)

TIPO DE PELIGRO	GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD	DESCRIPCIÓN	CRITERIO DE ZONIFICACIÓN URBANA	
			ÁREA NO CONSOLIDADA	ÁREA CONSOLIDADA
		evidencia de deslizamientos activos (Deslizamientos).	Uso Área Verde	Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial*
	MODERADA	Zonas con pendiente moderada (15°-25°) sin evidencia de deslizamientos activos. (Deslizamientos) y sectores ubicados entre 50 y 100 m de escarpes con evidencias de erosión fluvial (Criterio 1) y sectores ubicados entre 25 y 50 m de los escarpes asociados a quebradas menores (Criterio 2) (Retroceso de Laderas).	Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial	Mitigación con Normas Urbanísticas Todos los usos
FLUJOS DE BARRO O DETRITOS E INUNDACIONES POR DESBORDE DE CAUCE	MUY ALTA	Sectores de cauces naturales activos de quebradas mayores.	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial*
	ALTA	Sectores de cauces naturales activos de quebradas menores.	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde	Riesgo (2.1.17) Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial*
	MODERADA	Sectores de cauces naturales activos de quebradas menores sin escurrimiento activo, que pueden ser reactivados en caso de eventos meteorológicos extremos.	Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial	Mitigación con Normas Urbanísticas Todos los usos
VOLCANISMO	MUY ALTA	Area urbana, actividades equipamientos y sectores productivos del área de influencia inmediata.	Restringir áreas de crecimiento urbano.	Aperturas de vías para evacuación.

Fuente: Elaboración propia. (*) El equipamiento esencial corresponde a la infraestructura y actividades de educación, salud y seguridad.

1.6 REFERENCIAS

- Antinao, J., Fernández, J., Naranjo, J. & Villarroel, P., 2002. *Peligro de Remociones en Masa e Inundaciones en la Cuenca de Santiago*, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Ambiental, No. 2, 1 mapa escala 1:100.000.
- Belmonte-Pool, J., 1997. *Análisis del contacto sismogénico interplaca a lo largo de Chile*, Santiago: Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias, mención Geofísica, Universidad de Chile..
- Centeno, J., Fraile, M., Otero, M. & Pividal, A., 1994. *Geomorfología Práctica. Ejercicios de fotointerpretación y planificación geoambiental.*. Madrid: Ed. Rueda.
- Charrier, R. y otros, 2005. "Rapid tectonic and paleogeographic evolution associated with the development of the Chucal anticline and the Chucal-Lauca Basin in the Altiplano of Arica, northern Chile." *Journal of South American Earth Sciences* 19(1): 35-54., s.l.: s.n.
- CIREN, 1992. *Actualización extensión de la información climática normalizada a nivel nacional. Escala 1:1.000.000.*, s.l.: s.n.
- CIREN, 2013. *Caracterización de Humedales Altoandinos para una gestión sustentable. Antecedentes Climáticos. XV Región de Arica y Parinacota.*, s.l.: s.n.
- Clavero, J., 2002. *Evolution of Parinacota Volcano and Taapaca Volcanic Complex, Central Andes of Northern Chile". PhD. University of Bristol. 248 p. pp.*, s.l.: s.n.
- Clavero, J., 2007. *Peligros del Complejo Volcánico Taapaca, Región de Arica y Parinacota. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile (mapa escala 1:50.000). Serie Geología Ambiental. 10. Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería.* , s.l.: s.n.
- Clavero, J. & Sparks, R., 2005. *Geología del complejo volcanico Taapaca, Region de Tarapaca, Serie geologia basica, No 93, Subdireccion nacional de geologia, Gobierno de Chile.*, s.l.: s.n.
- Clavero, J., Sparks, R., Huppert, H. & Dade, W., 2002. *Geological constraints on the emplacement mechanism of the Parinacota debris avalanche, northern Chile." Bulletin of Volcanology* 64(1): 40-54., s.l.: s.n.
- Costa, J., 1984. Physical geomorphology of debris flows. In *Developments and Applications of Geomorphology*. En: J. E. Costa & P. J. Fleisher, edits. *Developments and Applications of Geomorphology*. Berlin: Springer-Verlag, pp. 268-317.
- Cruden, D. & Varnes, D., 1996. *Landslide types and processes*, Washington D.C.: Special Report 247: Landslides: Investigation and Mitigation, Transportation Research Board.
- DeMets, C., Gordon, R., Argus, D. & Stein, S., 1994. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters*, 21(20), pp. 2191-2194.
- Díez-Herrero, A., Laín-Huerta, L. & Lloremte-Isidro, M., 2008. *Mapas de Peligrosidad por avenidas e inundaciones: Guía metodológica para su elaboración*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. Serie Riesgos Geológicos/Geotecnia No. 1, 190 pág.
- Errázuriz K, A. M. y otros, 1987. *Manual de Geografía de Chile*, s.l.: Andrés Bello.

- 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*. Vancouver, En: Eberhardt, E., Hungr, O., Fell, R., Couture, E. (eds), Proceedings, International Conference on Landslide Risk Management, p. 657-669..
- García, M., Gardeweg, M., Clavero, J. & Hérail, G., 2004. *Hoja Arica, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 84, 150 p., 1 mapa escala 1:250.000, s.l.: s.n.*
- García, M. & Hérail, G., 2005. "Fault-related folding, drainage network evolution and valley incision during the Neogene in the Andean Precordillera of Northern Chile." *Geomorphology* 65(3-4): 279-300., s.l.: s.n.
- Gonzalez de Vallejo, L., Ferre, M., Ortuño, L. & Oteo, C., 2002. *Ingeniería Geológica*. Segunda ed. Madrid: Pearson Educación.
- González-Ferrán, O., 1995. *Volcanes de Chile*. Santiago: Instituto Geográfico Militar, 410 pág.
- González-Ferrán, O., 1995. *Volcanes de Chile. Instituto Geográfico Militar, VI., Santiago: s.n.*
- Hauser, A., 1985. Flujos aluvionales de 1870 y 1896 ocurridos en la ladera norte del volcán Yates, X Región: su implicancia en la evaluación de riesgos naturales. *Revista Geológica de Chile*, Volumen 25-26, pp. 125-133.
- Hauser, A., 1997. *Los aluviones del 18 de Junio de 1991 en Antofagasta: un análisis crítico, a 5 años del desastre*, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín N° 49, 47 pág.
- Hauser, A., 2000. *Remociones en masa en Chile*. 2da ed. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín N° 59, versión actualizada, 89 pág.
- Hernández, J., Estades, C., Faúndez, L. & Herreros, J., 2014. *Biodiversidad Terrestre de la Región de Arica y Parinacota. Primera Edición. 418 p. I.S.B.N. 978-956-19-0847-5., s.l.: Ministerio de Medio Ambiente.*
- Hernández, J., Estades, C., Faúndez, L. & Herreros, J., 2014. *Biodiversidad Terrestre de la Región de Arica y Parinacota. Primera Edición. I.S.B.N. 978-956-19-0847-5, s.l.: Ministerio de Medio Ambiente.*
- I.M. de Putre, 2008. *Plan de Desarrollo Comunal 2008 – 2012 Comuna de Putre*, s.l.: s.n.
- INIA, 1989. *Mapa Agroclimático de Chile. Editores: Novoa, R. y Villaseca, S. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Santiago, Chile. 211 p. 14 mapas, s.l.: s.n.*
- IREN, 1979. *Fragilidad de los ecosistemas naturales de Chile. Informe 40. Instituto Nacional de Recursos Naturales-CORFO, s.p, s.l.: s.n.*
- JTC-1, 2008. Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102(3-4), pp. 85-98.
- Keeper, D., 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of América Bulletin*, 95(4), pp. 406-421.
- Keller, E. & Blodgett, R., 2004. *Riesgos Naturales*. Madrid: Pearson Education S.A., 448 pág.

Khazaradze, G. & Klotz., 2003. Short and long-term effects of GPS measured crustal deformation rates along the South-Central Andes. *Journal of Geophysical Research*, Volumen 108, p. 1–13.

Luebert, F. & Pliscoff, P., 2004. *Informe 3. Pisos de vegetación de la Zona Norte de Chile (I-III). Clasificación de Pisos de Vegetación y Análisis de Representatividad de Áreas propuestas para la Protección en Chile.*, s.l.: s.n.

Madariaga, R., 1998. *Sismicidad de Chile*, s.l.: Física de La Tierra. tS5N: 0214-4557, nº 10: 221-255.

Martin, G. & Lew, M., 1999. *Recommended Procedures for Implementation of DMG Special Publication 117: Guidelines for Analyzing and Mitigating Liquefaction Hazards in California*. Los Angeles: Southern California Earthquake Center, University of Southern California, 63 pág.

Mpodozis, C. & Ramos, V. A., 1989. *The Andes of Chile and Argentina In: Ericksen, G. E.; Cañas, M. T.; Reinmund, J. A. (eds) Geology of the Andes and its Relation to Hydrocarbon and Energy Resources. Circum-Pacific Council for Energy and Hydrothermal Resources, American Association of Pet.* 11 ed. Houston, Texas: Earth Science Series.

Myers, B. & Brantley, S., 1995. *Hazardous phenomena at volcanoes*, Vancouver, Washington.: USGS Open File Report, pág. 95-231.

Naranjo, J. & Varela, J., 1996. *Debris and mud flows that affected the eastern area of Santiago on May 3, 1993*, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería. Boletín No. 47, 42 pág.

Niemeyer, H. & Cereceda, P., 1984. *Hidrografía. En: Geografía de Chile. Instituto Geográfico Militar. Santiago de Chile.*, s.l.: s.n.

ONU/EIRD, 2004. *Vivir con el Riesgo, Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres, Versión en español 2004*, Nueva York: Organización de las Naciones Unidas.

Pierson, T. & Scott, K., 1985. Downstream dilution of Lahar: transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow. *Water Research*, 21(10), pp. 1511-1524.

PMA, 2008. *Proyecto Multinacional Andino. Geociencia para las Comunidades Andinas. Atlas de Deformaciones Cuaternarias de los Andes.* Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, no. 7, 320 p., 1 CD-ROM..

PMA-GCA, 2007. *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas*. Santiago: Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 4, 432 p..

PMA-GCA, 2008. *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas*. Santiago: Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 4, 432 p..

PMA-GCA, 2008. Proyecto Multinacional Andino: Geociencia para las Comunidades Andinas. (PMA-GCA). Atlas de deformaciones cuaternarias de los Andes. Servicio Nacional de Geología y Minería. *Publicación Geológica Multinacional, 1 mapa en CD-ROM*, Issue 7, p. 320.

Ramos, V. A. y otros, 1986. Paleozoic Terranes of the Central Argentine-Chilean Andes. *Tectonics*, pp. 855-880.

Sánchez, R., 2009. *Las nuevas regiones de Arica y Parinacota y de Los Ríos, Chile: Algunos antecedentes sobre su estructura y funcionamiento. Revista Geográfica Venezolana [online]. Vol.50, n.1 [cited 2014-12-17], pp. 87-107.*, s.l.: s.n.

Sancho, C., 1997. Los mapas de riesgos. En: J. Peña, ed. *Cartografía geomorfológica básica y aplicada*. Zaragoza: Geomorfa, pp. 181-200.

Scholz, C., 1990. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge: Cambridge University Press, 439 pág.

Sepúlveda, S., Murphy, W., Jibson, R. & Petley, D., 2005. Seismically-induced Rock Slope Failures Resulting from Topographic Amplification of Strong Ground Motions: The Case of Pacoima Canyon, California.. *Engineering Geology*, Volumen 80, pp. 336-348.

Sepúlveda, S. & 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), pp. 131-136..

Sepúlveda, S. y otros, 2010. Landslides induced by the April 2007 Aysén Fjord earthquake, Chilean Patagonia.. *Landslides*, pp. doi: 10.1007/s1034VI-010-0203-2.

SERNAGEOMIN, 2003. *Mapa Geológico de Chile, Versión Digital*, Santiago: Publicación Geológica Digital, N°4. Santiago, Servicio Nacional de Geología y Minería..

SERNAGEOMIN, 2003. *Mapa Geológico de Chile: Versión Digital. Publicación Geológica Digital, N°4.*, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería..

SERNAGEOMIN, 2015. *Reporte de Actividad Volcánica, Región de Arica y Parinacota, Año 2015, enero. Volumen 01*, s.l.: s.n.

Somoza, R., 1998. Updated Nazca (Farallon)- South America relative motions during the last 40 My: implication for mountain building in the central Andean region.. *Journal of South American Earth Sciences*, Issue 11, pp. 211-215.

Sruoga, P., 2002. *El volcanismo reciente y riesgo asociado en la Provincia de Mendoza*, Mendoza: IANIGLA, 30 Años de Investigación Básica y Aplicada en Ciencias Ambientales, pág. 255-259.

Suárez, G. & Comte, D., 1993. Comment on "Seismic coupling along the Chilean subduction zone" by B.W. Tichelaar and L.R. Ruff. *Journal of Geophysical Research*, Volumen 98, pp. 15825-15828.

SUBDERE, 2011. *Guía Análisis de Riesgos Naturales para el Ordenamiento Territorial*, Santiago: Subsecretaría de Desarrollo Regional.

Tassara, A., Götze, H.-J., Schimdt, S. & Hackney, R., 2006. Three dimensional density model of the Nazca plate and the Andean continental margin.. *Journal of Geophysical Research*, Volumen 111.

Tichelaar, B. W. & Ruff., L. J., 1993. *Depth of seismic coupling along subduction zones, Jour. Geoph. Res., 98, pp. 2017-2037.*, s.l.: s.n.

Urrutia, R. & Lanza, C., 1993. *Catástrofes en Chile 1541 - 1992*. Santiago: La Noria.

Urrutia, R. & Lanza, C., 1993. *Catástrofes en Chile 1541 - 1992*. Santiago: La Noria. 440 pp..

USGS, 2008. *The landslide handbook—A guide to understanding landslides*, Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p..

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

Varnes, D., 1984. Hazard Zonation: A Review of Principal and Practice. Commission of Landslide of IAEG, UNESCO. *Natural Hazards*, Volumen 3, pp. 1-61.

Western Washington University, 2011. *RELIEF GLOBE SLIDES*. [En línea] Available at: <http://www.smate.wvu.edu/teched/geology/GeoHaz/global/globe-17.jpg> [Último acceso: 28 11 2011].

Worldclim.org, 2013. *En: http://www.worldclim.org/bioclim.*, s.l.: s.n.

2 ANEXO

2.1 DEFINICIONES DE PELIGRO Y RIESGO USADAS EN ESTE INFORME

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. Se entiende como **Peligro Natural** a cualquier fenómeno de origen natural que puede tener efectos negativos en el territorio (personas, infraestructura, medio ambiente, etc.). Los peligros naturales pueden subdividirse en distintas categorías: geológicos, hidrológicos, climáticos, incendios, etc.

Asociados a los peligros naturales se reconocen cuatro conceptos principales: **susceptibilidad**, **vulnerabilidad**, **amenaza** o peligrosidad (hazard) y **riesgo** (risk). La **susceptibilidad** corresponde a una estimación cualitativa o cuantitativa de la distribución espacial de un fenómeno dado que existe o que potencialmente podría ocurrir en un área. Aunque se espera que un cierto fenómeno peligroso ocurra con mayor frecuencia en las áreas de mayor susceptibilidad, debe tenerse en cuenta que el análisis de susceptibilidad no considera el período de retorno de los eventos, es decir, el factor tiempo (JTC-1, 2008). La susceptibilidad depende directamente de los factores que controlan o condicionan la ocurrencia de los procesos, como la geomorfología o factores intrínsecos de los materiales geológicos, y de factores externos que pueden actuar como desencadenantes (por ejemplo precipitaciones intensas, sismos, etc.). Para la construcción de mapas de susceptibilidad se utilizan los mapas de inventario, en los que se identifican las áreas que han sido afectadas por 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.

El concepto de **amenaza** o **peligrosidad** (hazard*) corresponde a la probabilidad de ocurrencia de un proceso, con una magnitud determinada dentro de cierto período de tiempo y en un área específica (Varnes, 1984). La estimación de la amenaza o peligrosidad implica necesariamente una consideración de la variable temporal, es decir, el período de recurrencia de un evento (período de retorno). Por otro lado, la amenaza para períodos de retorno infinitos tiende a ser similar que la susceptibilidad. Por lo anterior, cuando no se cuenta con datos suficientes para estimar períodos de retorno, resultan útiles los mapas de susceptibilidad, que consideran solo las variables intrínsecas del material para la zonificación de peligros geológicos.

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

Los **elementos expuestos** pueden ser personas, bienes, propiedades, infraestructuras, servicios, actividades económicas, etc., que pueden sufrir las consecuencias directas o indirectas de un proceso geológico en una determinada zona (Gonzalez de Vallejo, et al., 2002).

La **vulnerabilidad** corresponde al grado de pérdidas o daños potenciales de un elemento o conjunto de elementos dados, como consecuencia de la ocurrencia de un fenómeno de magnitud determinada. Se expresa en una escala de 0 (sin daños) a 1 (pérdida o destrucción total del elemento) o entre 0% y 100% de daños (Varnes, (1984); González de Vallejo et al., (2002); JTC1, (2008)).

Por otro lado, el concepto de **riesgo** (risk) incorpora consideraciones socio-económicas, y se define como las potenciales pérdidas debidas a un fenómeno natural determinado, por ejemplo vidas humanas, pérdidas económicas directas o indirectas, daños en infraestructura, etc. (Gonzalez de Vallejo, et al., 2002).

Según Varnes (1984), se denomina riesgo específico al grado de pérdidas esperado durante un período de tiempo dado, como consecuencia de la ocurrencia de un determinado proceso, expresado en términos de probabilidad. Puede ser expresado como el producto $A \times V$, donde A corresponde a la amenaza y V a la vulnerabilidad. En este caso no es posible obtener una evaluación cuantitativa de las pérdidas (Gonzalez de Vallejo, et al., 2002).

De acuerdo a las definiciones de la UNESCO (Varnes, 1984) el riesgo total corresponde al número esperado de vidas, personas heridas, daños a la propiedad, o a las actividades económicas debido a un fenómeno natural específico y se expresa como el producto del riesgo específico y los elementos expuestos, esto es:

$$R_t = R_e \times E = A \times V \times E$$

Donde R_t corresponde al riesgo total, R_e al riesgo específico y E a los elementos expuestos considerados. La ilustración 2-1 muestra la relación entre el conocimiento y la estimación de la susceptibilidad, amenaza y riesgo.

La definición de riesgo, o áreas de riesgo, utilizadas internacionalmente difieren a la nomenclatura propuesta por la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción en su artículo 2.1.17. En la OGUC, el concepto utilizado de riesgo corresponde a la definición de "Peligro Natural" definida internacionalmente.

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 adecuado para 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 (ONU/EIRD, 2004).

Es importante destacar que las definiciones previamente presentadas corresponden a una terminología aceptada y utilizada a nivel internacional, tanto en el ámbito científico (ver por ejemplo JTC-1, (2008)) como en instituciones públicas de diversos países. Estas definiciones son usadas por la Estrategia Internacional para la reducción de Desastres de la ONU (ONU/EIRD, 2004), por UNESCO (ver por ejemplo Varnes, (1984)) y por los servicios geológicos de diversos países (ver por ejemplo USGS, (2008) y PMA-GCA(2007)). A nivel nacional, estas definiciones han sido adoptadas por la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo en la "Guía Análisis de Riesgos Naturales para el Ordenamiento Territorial" (SUBDERE, 2011) y por el Servicio Nacional de Geología y Minería (ver por ejemplo PMA-GCA(2007)).

Se recomienda incorporar esta terminología en el ejercicio de los instrumentos de planificación territorial, lo que permitirá que exista concordancia en la terminología y las metodologías adoptadas, tanto a nivel nacional, entre los diferentes servicios públicos relacionados, como a nivel internacional.

Ilustración 2-1: Etapas de la evaluación de un evento geológico peligroso



Fuente: Elaboración propia basado en Varnes (1984)

Referencias

González de Vallejo, L., Ferrer, M, Ortuño, L., Oteo, C. 2002. *Ingeniería Geológica*. Pearson Education, Madrid. 744 pp.

JTC-1, 2008. *Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes, 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning, for land use planning. Engineering Geology 103, 85–98.*

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>*

ONU/EIRD, 2004, *Vivir con el Riesgo, Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres, Versión en español 2004 en CD.*

Urrutia, R. y Lanza, C. 1993. *Catástrofes en Chile 1541-1992. Editorial La Noria. 440p. Facultad de Ingeniería, Universidad de Chile. Santiago, Chile.*

Varnes, D.J., 1984. *Hazard Zonation: A Review of Principal and Practice. Commission of Landslide of IAEG, UNESCO, Natural Hazades, No.3,61 p*

González de Vallejo, L., Ferrer, M, Ortuño, L., Oteo, C. 2002. *Ingeniería Geológica*. Pearson Education, Madrid. 744 pp.

JTC-1, 2008. *Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes, 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning, for land use planning. Engineering Geology 103, 85–98.*

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>*

ONU/EIRD, 2004, *Vivir con el Riesgo, Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres, Versión en español 2004 en CD.*

Urrutia, R. y Lanza, C. 1993. *Catástrofes en Chile 1541-1992. Editorial La Noria. 440p. Facultad de Ingeniería, Universidad de Chile. Santiago, Chile.*

Varnes, D.J.,1984. *Hazard Zonation: A Review of Principal and Practice. Commission of Landslide of IAEG, UNESCO, Natural Hazades, No.3,61 p*

a) Descripción Peligros Geológicos Analizados

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

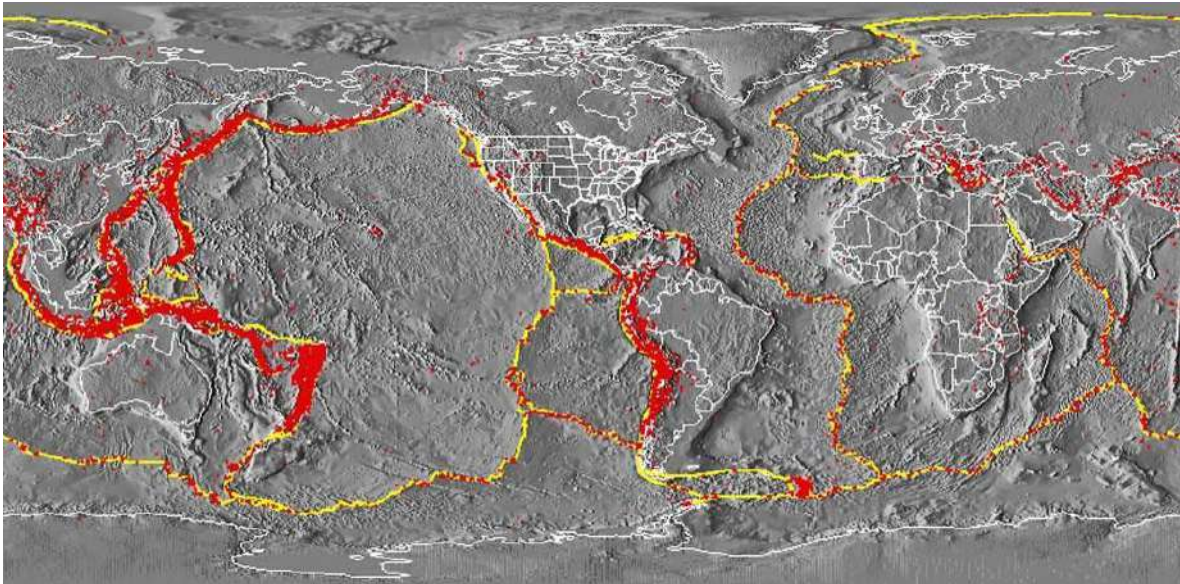
Para cada peligro, se describe en qué consiste, cuáles son sus factores condicionantes, y los principales efectos para la población y sus actividades. El análisis se realiza dividiendo los peligros geológicos en dos grupos, procesos internos o endógenos de la tierra (peligro sísmico y volcánico), y los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

- *Procesos Internos o Endógenos de la Tierra*

- *Sismicidad*

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 Ilustración 2-2 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.

Ilustración 2-2 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

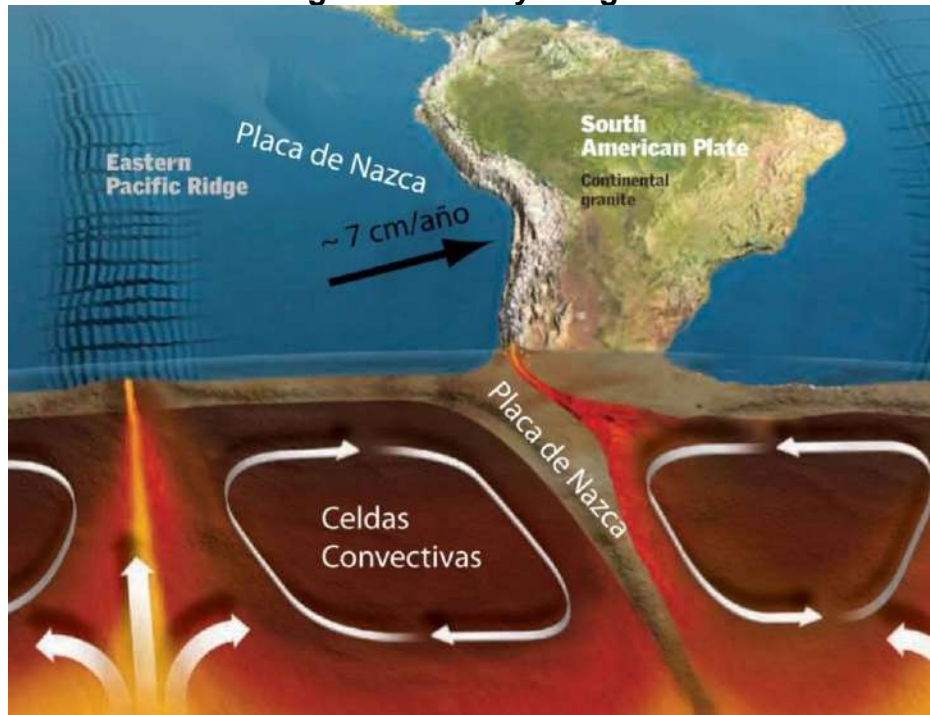


Fuente: Western Washington University(2011).

El margen de subducción donde se ubica Chile está caracterizado por una convergencia del orden de 8 cm/año(DeMets, 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. 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).

Ilustración 2-3: Contexto geodinámico y margen de subducción de Chile



Fuente: Modificado de Enciclopedia Britannica (2008).

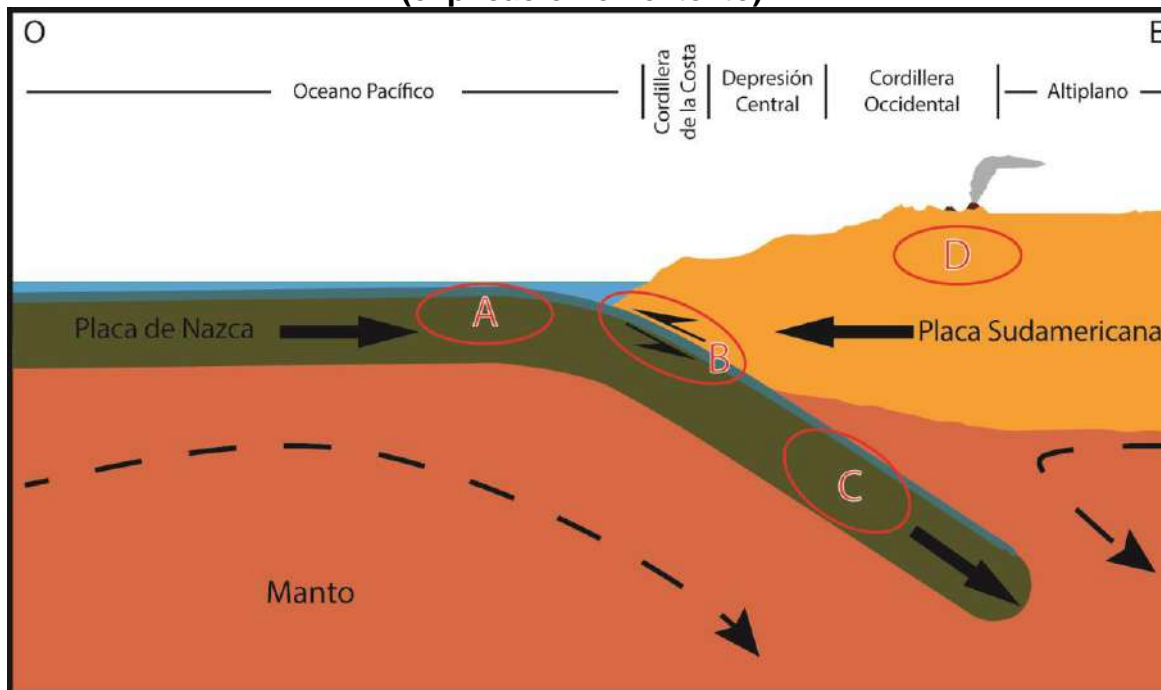
El sistema de subducción, además de acumular energía que se libera por sismos de interplaca, genera campos de esfuerzos en la placa continental, en la oceánica y en la zona de acople entre ambas. El método para descargar la energía acumulada es a través de diferentes tipos de sismos, ejemplificados en la FIGURA B-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 que pueden superar 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, Curicó en 2004 y Aysén, 2007. 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.

Ilustración 2-4: Tipos de sismos que ocurren en un margen de subducción (explicación en el texto)

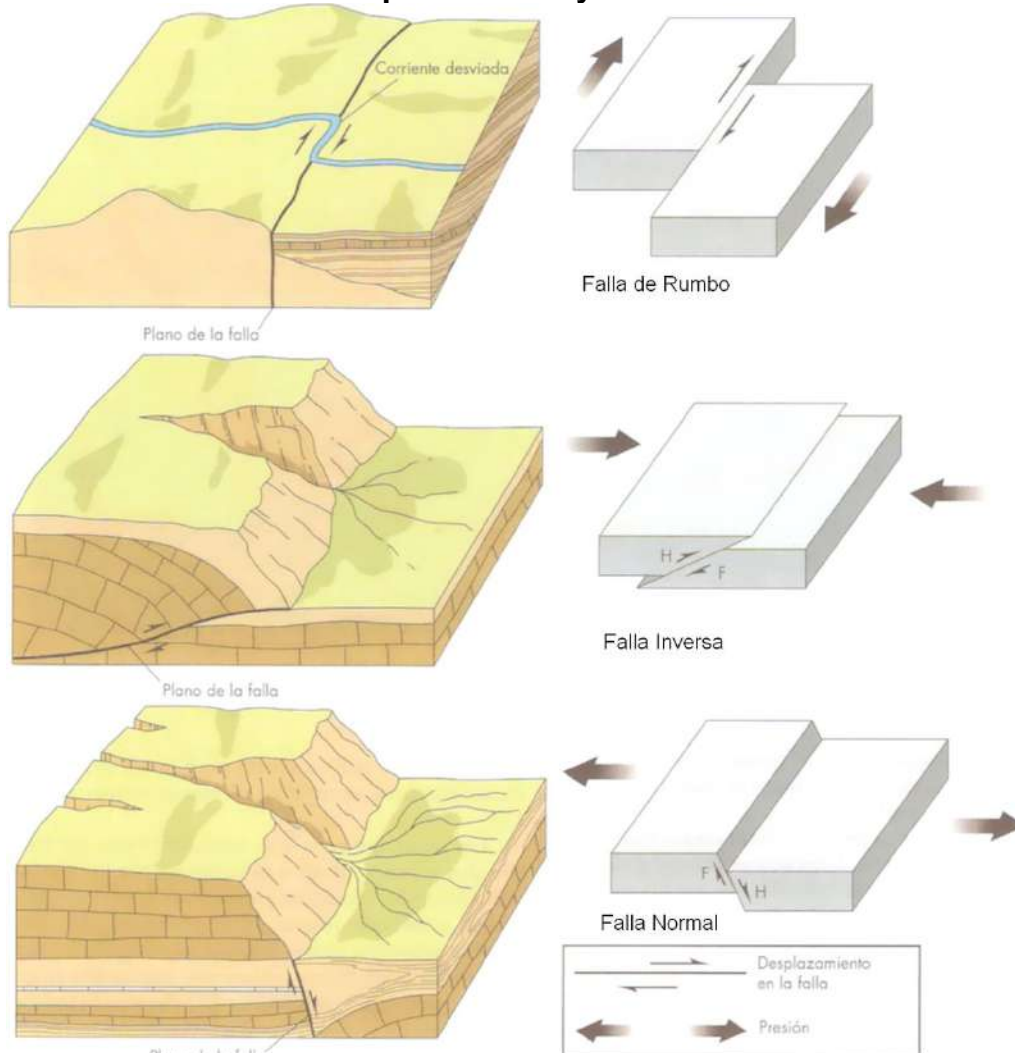


Fuente: Elaboración propia.

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. A su vez, esta ruptura conlleva una liberación de energía que se propaga por medio de ondas sísmicas.

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. 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. Aun 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.

Ilustración 2-5: Tipos de Falla y esfuerzos asociados

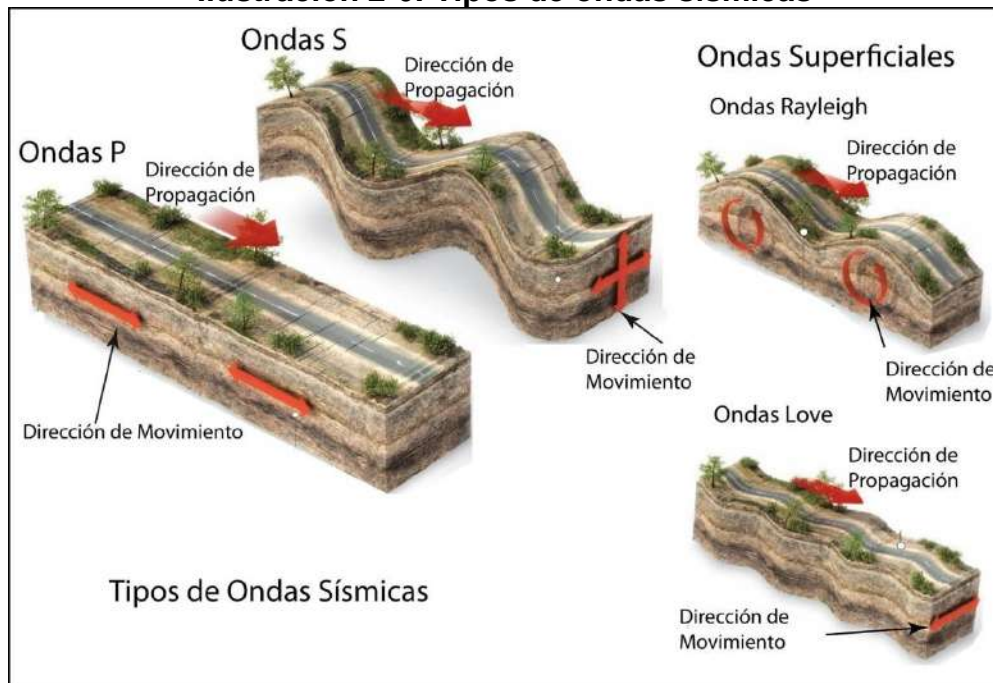


Fuente: Keller y Blodgett(2004).

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

Finalmente, debe destacarse el llamado "efecto sitio", que indica un condicionamiento de carácter local bajo el cual para un mismo terremoto y dependiendo del tipo de terreno donde uno se encuentra ubicado, las ondas sísmicas pueden amplificarse durante el desarrollo del terremoto.

Ilustración 2-6: Tipos de ondas sísmicas



Fuente: Modificado de Enciclopedia Britannica (2008).

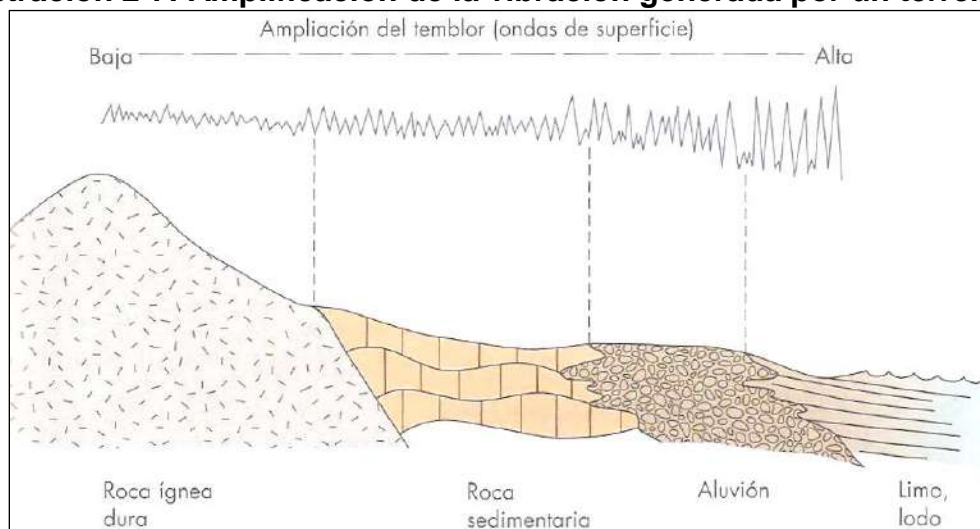
El principal efecto asociado a la ocurrencia de sismos son fuertes movimientos del terreno, que originan un peligro directo sobre las estructuras y sobre las personas, debido a las fuertes aceleraciones generadas por las ondas sísmicas. Sumado a lo anterior, la ocurrencia de estos fenómenos es generalmente 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 innumerable efectos adversos para la sociedad que provocan este tipo de fenómenos.

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 Keeper (1984); Sepúlveda, et al.(2005); (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 "Procesos de Remoción en Masa".

Ilustración 2-7: Amplificación de la vibración generada por un terremoto



Fuente: Keller y Blodgett(2004).

Los maremotos o tsunamis 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 (Martin & Lew, 1999):

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.

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.

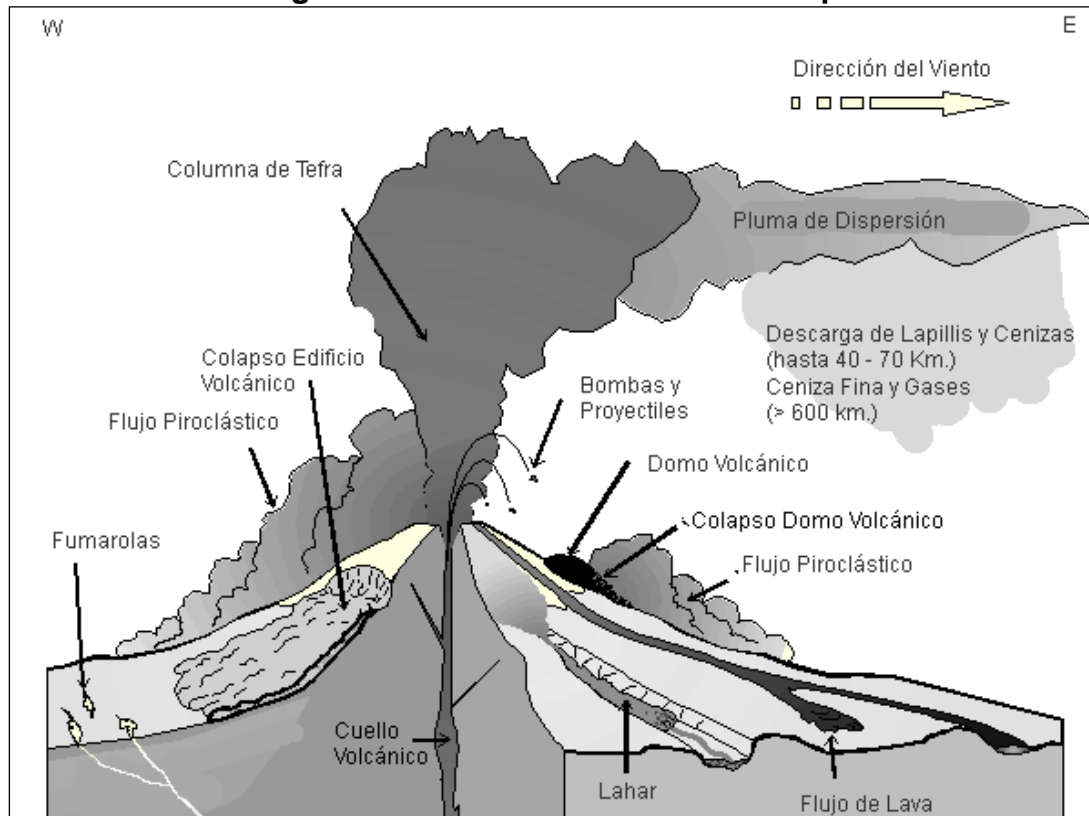
Fuertes movimientos sísmicos, durante los cuales las ondas sísmicas aumentan la presión del agua contenida en los depósitos. Cabe destacar, que todo Chile, en especial desde la península de Taitao al norte, tiene el potencial de ser afectado por grandes terremotos.

- *Volcanismo*

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 la FIGURA B-7.

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.

Ilustración 2-8: Peligros volcánicos asociados a la erupción de un volcán



Fuente: Myers y Brantley(1995).

Los flujos de lava se producen cuando material magmático se desplaza aguas abajo del centro de emisión. El alcance que tendrán estos flujos está determinado por la tasa de efusión (emisión del centro volcánico), la pendiente del terreno sobre el cual la lava escurre y la viscosidad de la lava. Además, en las cercanías del centro de emisión se producen comúnmente temblores de magnitud inferior a 6

en la escala de Richter (Mw), pero a poca profundidad (entre 1 y 20 km), los que están asociados a intensidades mayores a VI en las cercanías del epicentro. Estos sismos provienen de diversos procesos, tales como ascenso del magma y fracturamiento de la corteza, explosiones volcánicas y esfuerzos tectónicos compresivos y expansivos asociados al ciclo eruptivo (González-Ferrán, 1995).

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

Cuadro 2.1-1: Peligros asociados al volcanismo

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

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

El colapso, total o parcial, del edificio volcánico puede producirse como consecuencia de una gran cantidad de energía liberada durante la erupción. Este proceso puede provocar tsunamis 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:

- Pérdida de tierras cultivables
- Colapso de techos y obras civiles
- Pérdidas de vidas humanas y forraje
- 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), y pueden afectar grandes áreas de terreno, como por ejemplo la erupción del volcán Quizapú en el año 1932, cuya pluma de ceniza alcanzó la ciudad de Johannesburgo, Sudáfrica o la erupción del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle en curso (noviembre 2011), cuya pluma de ceniza dio la vuelta al mundo.

b) Procesos Exógenos o Externos de la Tierra

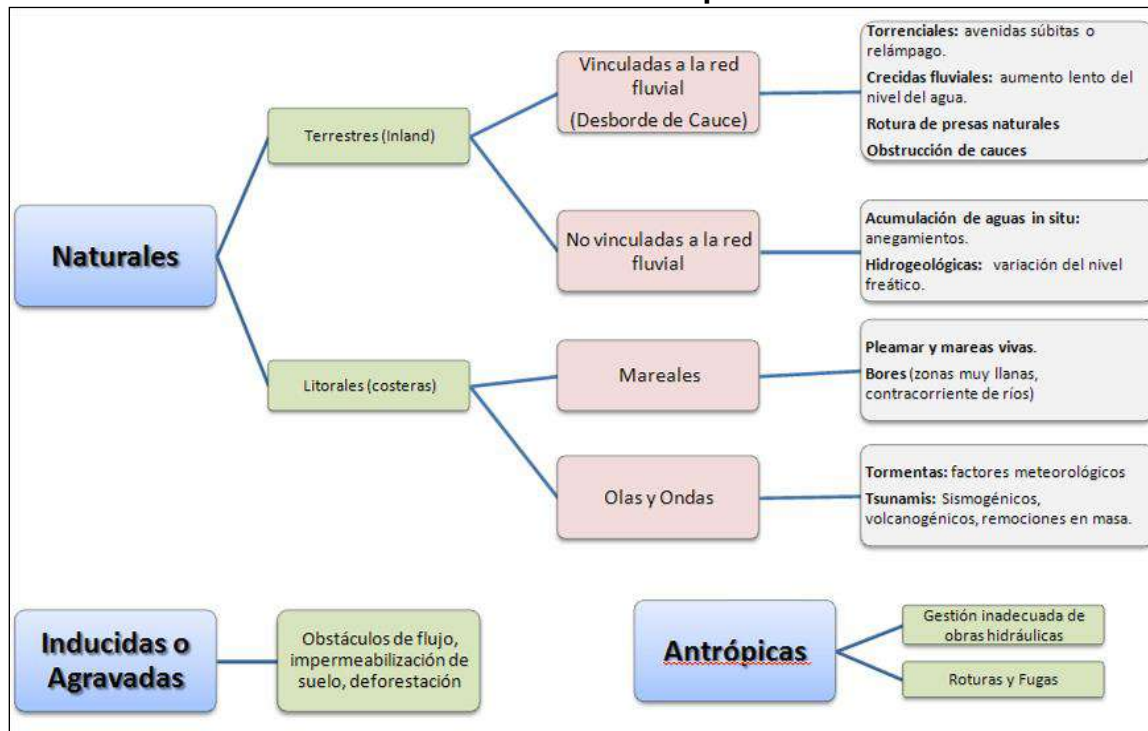
i) Inundaciones Terrestres y Litorales

Las inundaciones, sin considerar aquellas generadas por causas antrópicas, pueden ser de dos tipos: (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.

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

Ilustración 2-9: Clasificación de los tipos de inundaciones



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

ii) 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:

- **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.

- **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:

- **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.
- **La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno**
- **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.

iii) **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.

iv) Inundaciones Costeras asociadas a maremotos

Los tsunamis o 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. Se conocen tres orígenes posibles:

- a) Maremotos generados producto de un sismo mayor
- b) Maremotos generados por erupción volcánica submarina
- c) Maremotos generados por deslizamientos.

Debido a la ausencia de este peligro en la zona de estudio, en este anexo no se profundiza en las implicancias que estos eventos suelen tener sobre el territorio.

v) Procesos de Remoción en Masa

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. El movimiento de estos materiales puede ser por caída, volcamiento, deslizamiento, propagación lateral o flujo (PMA-GCA, 2007).

Desprendimientos o Caída de Rocas:

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

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

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

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

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. Esto implica que las superficies de ruptura son ya sea curvas y cóncavas o a lo largo de un plano o superficie ondulada, respectivamente.

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


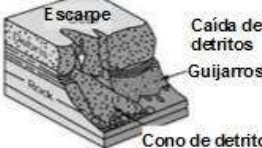

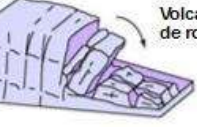
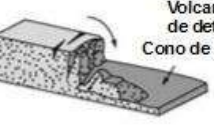


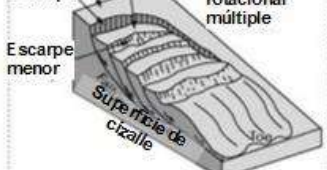
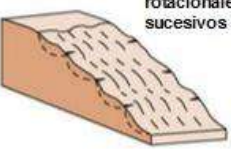




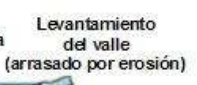

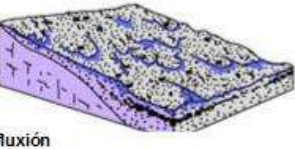
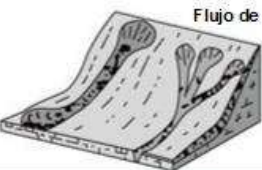
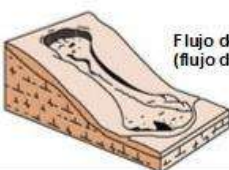

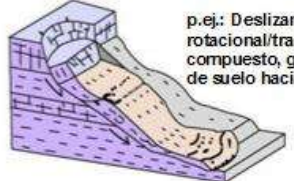
Los factores condicionantes de un deslizamiento corresponden principalmente a: los factores intrínsecos del suelo y la roca, las características geológicas (litología, estructuras, grado de alteración y meteorización, etc.), los factores geomorfológicos (pendiente, aspecto, curvatura, elevación, entre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

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

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



Ilustración 2-10: Clasificación de tipos de remoción en masa en relación al movimiento que lo origina y el material constituyente de la ladera

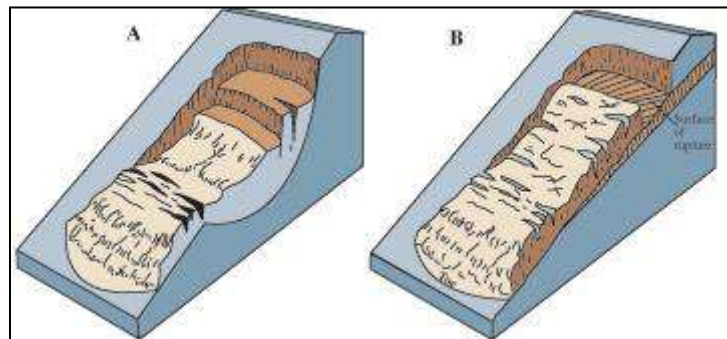
Material		ROCA	DETRITO	SUELO
Tipo de movimiento				
CAIDA		 Caída de roca	 Caída de detritos Guijarros Cono de detrito	 Escarpe Caída de suelo Coluvio Cono de detrito
		 Volcamiento de roca	 Volcamiento de detrito Cono de detrito	 Fracturas Volcamiento de tierra Cono de detrito
VOLCAMIENTO	Rotacional	 Deslizamiento rotacional simple (slump) Superficie de cizalle	 Cima Cabeza Escarpe Escarpe menor Superficie de cizalle	 Deslizamientos rotacionales sucesivos
	Traslacional (planar)	 Deslizamiento de roca	 Deslizamiento de detrito	 Deslizamiento de suelo
PROPAGACION	 Estructura subhorizontal normal Quebradas Cobertura de roca Limolita arcillosa Adelgazamiento de estratos Sustrato competente		 Levantamiento del valle (arrasado por erosión) Estructura inclinada	 Propagación de suelo
FLUJO	 Solifluxión (Flujo de detritos periglacial)	 Flujo de detritos		 Flujo de suelo (flujo de barro)
COMPLEJO	 p.ej.: Deslizamiento de suelo con detritos de caída de rocas		 p.ej.: Deslizamiento rotacional/traslacional compuesto, gradando a flujo de suelo hacia el pie	

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

El grado en que un deslizamiento afecta a la población depende de:

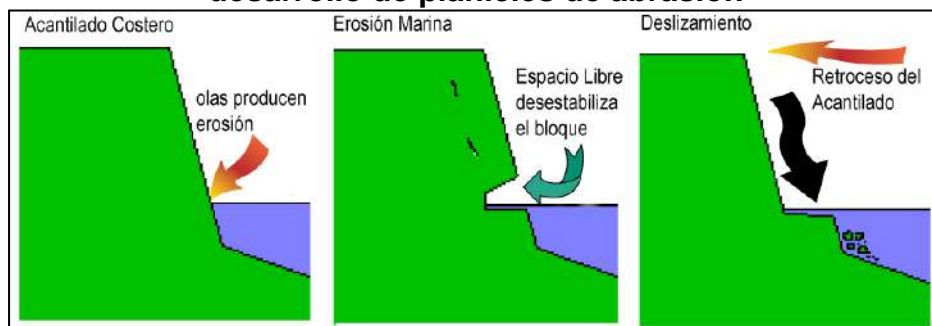
- Distancia al origen del fenómeno: Por lo general, los deslizamientos son procesos que afectan un área limitada (radios menores a 1 km., incluso menores a 500 m). Hay que considerar que este punto depende directamente del tamaño de volumen desplazado.
- La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno: En general, dado que estos procesos son de alta velocidad los daños potenciales son altos.
- 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.
- Tiempo de aviso: Sin estudios de detalle no hay forma de predecir este tipo de procesos. Si se realizan estudios específicos, es posible conocer el o los factores gatillantes de las remociones en masa en un área determinada. Si estos factores gatillantes pueden ser monitoreados, es posible generar sistemas de alerta. Por ejemplo, si el factor gatillante son las precipitaciones sobre un cierto nivel umbral de intensidad, es posible generar sistemas de alerta que se activen cuando se sobrepasa dicho umbral.

Ilustración 2-11: 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>

Ilustración 2-12: Ejemplo de erosión por retroceso de terrazas, aplicado al desarrollo de planicies de abrasión



Fuente: Elaboración propia.

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 & Scott, 1985).

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

En Chile, el factor desencadenante más común de flujos de detritos son las lluvias esporádicas, de corta duración y de intensidad excepcional. Por otro lado, en nuestro país existen muy pocos estudios que relacionen las intensidades de precipitaciones y este tipo de fenómenos, debido, principalmente, a los escasos registros de intensidad de precipitaciones y de flujos de detritos históricos. Sólo durante las últimas décadas se han instalados pluviógrafos que miden la intensidad instantánea u horaria de precipitaciones (mm por hora). Sólo se disponen de registros más sostenidos en el tiempo de precipitaciones diarias (mm

en 24 horas). Esto dificulta los análisis de relación a estas variables ya que a veces basta una lluvia "corta" pero extremadamente intensa para generar un flujo de detritos.

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

- 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.
- 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.
- 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.



- 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., tal como ocurrió en los casos de Antofagasta (1991) y Quebrada de Macul (1993). Si el cauce no afecta directamente a la población, pueden producirse cortes de caminos y daños a la infraestructura sanitaria (por ejemplo, destrucción de captaciones de agua para el consumo humano), lo que se traduce en 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 fenómenos comparten una serie de características comunes que permiten estudiarlos como un mismo proceso.

REFERENCIAS

Antinao, J., Fernández, J., Naranjo, J. & Villarroel, P., 2002. Peligro de Remociones en Masa e Inundaciones en la Cuenca de Santiago, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Ambiental, No. 2, 1 mapa escala 1:100.000.

Centeno, J., Fraile, M., Otero, M. & Pividal, A., 1994. Geomorfología Práctica. Ejercicios de fotointerpretación y planificación geoambiental. Madrid: Ed. Rueda.

Costa, J., 1984. Physical geomorphology of debris flows. In Developments and Applications of Geomorphology. En: J. E. Costa & P. J. Fleisher, edits. Developments and Applications of Geomorphology. Berlin: Springer-Verlag, pp. 268-317.

Cruden, D. & Varnes, D., 1996. Landslide types and processes, Washington D.C.: Special Report 247: Landslides: Investigation and Mitigation, Transportation Research Board.

DeMets, C., Gordon, R., Argus, D. & Stein, S., 1994. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. Geophysical Research Letters, 21(20), pp. 2191-2194.

Díez-Herrero, A., Laín-Huerta, L. & Lloremte-Isidro, M., 2008. Mapas de Peligrosidad por avenidas e inundaciones: Guía metodológica para su elaboración. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. Serie Riesgos Geológicos/Geotecnia No. 1, 190 pág.

González-Ferrán, O., 1995. Volcanes de Chile. Santiago: Instituto Geográfico Militar, 410 pág.

Hauser, A., 1985. Flujos aluvionales de 1870 y 1896 ocurridos en la ladera norte del volcán Yates, X Región: su implicancia en la evaluación de riesgos naturales. Revista Geológica de Chile, Volumen 25-26, pp. 125-133.

Hauser, A., 1997. *Los aluviones del 18 de Junio de 1991 en Antofagasta: un análisis crítico, a 5 años del desastre*, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín N° 49, 47 pág.

Hauser, A., 2000. *Remociones en masa en Chile*. 2da ed. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín N° 59, versión actualizada, 89 pág.

Iida, K., 1963. *A relation of earthquake energy to tsunami energy and the estimation of the vertical displacement in a tsunami source*. *Journal of Earth Science*, 2(1), pp. 49-67.

Inamura, A., 1942. *History of Japanese Tsunamis*. *Kayo-No-Kagaku*, Volumen 2, pp. 74-80.

Inamura, A., 1949. *List of Tsunamis in Japan*. *Journal of Seismological Society of Japan*, Volumen 2, pp. 23-28.

Keeper, D., 1984. *Landslides caused by earthquakes*. *Geological Society of América Bulletin*, 95(4), pp. 406-421.

Keller, E. & Blodgett, R., 2004. *Riesgos Naturales*. Madrid: Pearson Education S.A., 448 pág.

Martin, G. & Lew, M., 1999. *Recommended Procedures for Implementation of DMG Special Publication 117: Guidelines for Analyzing and Mitigating Liquefaction Hazards in California*. Los Angeles: Southern California Earthquake Center, University of Southern California, 63 pág.

Myers, B. & Brantley, S., 1995. *Hazardous phenomena at volcanoes*, Vancouver, Washington.: USGS Open File Report, pág. 95-231.

Naranjo, J. A., 1987. *Interpretación de la actividad cenozoica superior a lo largo de la Zona de Falla de Atacama, norte de Chile*. *Revista Geológica de Chile*, Issue 31, pp. 43-55.

Naranjo, J. & Varela, J., 1996. *Debris and mud flows that affected the eastern area of Santiago on May 3, 1993*, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería. Boletín No. 47, 42 pág.

Natural Resources Canadá, 2011. *Natural Resources Canadá*. [En línea]

Available at:
<http://atlas.nrcan.gc.ca/auth/english/maps/environment/naturalhazards/tsunami/1>
[Último acceso: 25 11 2011].

Pierson, T. & Scott, K., 1985. *Downstream dilution of Lahar: transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow*. *Water Research*, 21(10), pp. 1511-1524.

PMA-GCA, 2007. *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas*. Santiago: Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, Servicio Nacional de Geología y Minería, *Publicación Geológica Multinacional*, No. 4, 432 p.

Sancho, C., 1997. Los mapas de riesgos. En: J. Peña, ed. *Cartografía geomorfológica básica y aplicada*. Zaragoza: Geomorfa, pp. 181-200.

Scholz, C., 1990. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge: Cambridge University Press, 439 pág.

Sepúlveda, S., Murphy, W., Jibson, R. & Petley, D., 2005. *Seismically-induced Rock Slope Failures Resulting from Topographic Amplification of Strong Ground Motions: The Case of Pacoima Canyon, California.. Engineering Geology, Volumen 80, pp. 336-348.*

Sepúlveda, S. & Serey, A., 2009. *Tsunamigenic, earthquake-triggered rock slope failures during the April 21, 2007 Aisén earthquake, southern Chile (45.5°S)*. *Andean Geology*, 26(1), pp. 131-136.

Sepúlveda, S. y otros, 2010. *Landslides induced by the April 2007 Aysén Fjord earthquake, Chilean Patagonia.. Landslides*, pp. doi: 10.1007/s1034VI-010-0203-2.

Sruoga, P., 2002. *El volcanismo reciente y riesgo asociado en la Provincia de Mendoza, Mendoza: IANIGLA, 30 Años de Investigación Básica y Aplicada en Ciencias Ambientales*, pág. 255-259.

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

Watt, S., Pyle, D., Naranjo, J. & Mather, T., 2009. *Landslide and tsunami hazard at Yate volcano, Chile as an example of edifice destruction on strike-slip fault zones*. *Bulletin of Volcanology*, 71(5), pp. 559-574.

Western Washington University, 2011. *RELIEF GLOBE SLIDES*. [En línea]. Available at: <http://www.smate.wvu.edu/teched/geology/GeoHaz/global/globe-17.jpg>. [Último acceso: 28 11 2011].

Wiegel, R., 1970. *Tsunamis*. En: Wiegel et al., ed. *Earthquake Engineering*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, pp. 253-306.