

ESTUDIO DE RIESGOS Y PROTECCIÓN AMBIENTAL

PARTE I

ÁREAS DE RIESGO DE ORIGEN NATURAL

ETAPA DIAGNÓSTICO

**EN EL MARCO DEL PROCESO DE MODIFICACIÓN AL PLAN
REGULADOR COMUNAL (MPRC)**



2022

El presente documento corresponde a la ETAPA DE DIAGNÓSTICO de la “Actualización Estudios Complementarios a la Modificación del Plan Regulador Comunal”, encargado por la Municipalidad de Peñalolén a INFRACON S.A. con el financiamiento del Gobierno Regional Metropolitano de Santiago.

EQUIPO CONSULTOR ESTUDIO:

Pablo Badilla Ohlbaum, Arquitecto Planificador

Pedro Silva Vidal, Arquitecto Planificador

Claudia González, Arquitecto

Rodrigo Andrés Rauld Plott, Geólogo

Felipe García-Huidobro, Geólogo

Roberto Lara Venegas, Ingeniero Civil

Irene Baeza Pinto, Ingeniero Civil

Alejandro Aldea, Ingeniero Civil

Catherine Barra Campaña, Cartógrafo

CONTRAPARTE TÉCNICA:

Municipalidad de Peñalolén, Región Metropolitana



Alcalde Jorge Monckeberg 478, Nuñoa. Santiago - Chile. ☎ (56-2)26336929
pbadilla@infracon.cl www.infracon.cl



INDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1. UBICACIÓN.....	8
1.2. OBJETIVOS	8
1.3. ALCANCES Y LIMITACIONES	10
1.4. MARCO JURÍDICO.....	11
1.5 METODOLOGÍA GENERAL DEL ESTUDIO.....	12
1.5.1. Recopilación de antecedentes.....	13
1.5.2. Elaboración de líneas de base	14
1.5.3. Catastro de peligros.....	14
1.5.4. Diagnóstico de peligros.....	15
1.5.5. Elaboración de mapas de peligros	15
1.5.6. Definición de áreas de riesgo y recomendaciones.....	16
2. LÍNEAS DE BASE DE GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA.....	17
2.1. MARCO GEODINÁMICO	17
2.2. MARCO GEOMORFOLÓGICO	18
2.2.1. Unidades morfoestructurales	18
2.2.2. Aspectos geomorfológicos relevantes.....	19
2.2.3. Parámetros morfométricos	22
2.3. MARCO GEOLÓGICO	25
2.3.1. Depósitos no consolidados	25
2.3.1.1. Depósitos antrópicos (Han)	25
2.3.1.2. Depósitos aluviales actuales de 1993 (Ha2).....	25
2.3.1.3. Depósitos aluviales actuales (Ha).....	25
2.3.1.4. Depósitos coluviales actuales (Hc).....	26
2.3.1.5. Depósitos coluviales Pleistoceno-Holoceno (PHc)	26
2.3.1.6. Depósitos aluviales Pleistoceno-Holoceno superior (PHa)	26
2.3.1.7. Depósitos de remoción en masa (PHrm).....	27
2.3.1.8. Depósitos aluviales Pleistoceno medio-superior (Pmsa)	27



2.3.1.9.	Relleno sedimentario Pleistoceno inferior-medio (Pia)	27
2.3.2.	Unidades de roca	28
2.3.2.1.	Formación Abanico Eoceno-Mioceno inferior (OIMa) (Aguirre, 1960)	28
2.4.	CLIMA E HIDROLOGÍA	30
2.4.1.	Delimitación y caracterización de cuencas	30
2.4.2.	Información hidrometeorológica	32
2.4.3.	Caracterización hidrológica	32
2.4.4.	Revisión de modelos hidráulicos existentes	35
3.	INUNDACIONES TERRESTRES	46
3.1.	Catastro	46
3.2.	Diagnóstico	50
3.3.	Modelación	51
3.4.	Susceptibilidad	53
3.4.1.	Inundación por desborde de cauce	53
3.4.2.	Inundación por anegamiento	55
4.	REMOCIONES EN MASA	57
4.4.	CATASTRO	57
4.5.	ANÁLISIS DE FACTORES CONDICIONANTES	60
4.2.1.	Geomorfología	60
4.2.2.	Geología y geotecnia	60
4.2.3.	Hidrología e hidrogeología	60
4.2.4.	Clima	60
4.2.5.	Vegetación	60
4.2.6.	Actividad antrópica	61
4.6.	DIAGNÓSTICO	61
4.3.1.	Flujos de barro y/o detritos	61
4.3.2.	Procesos de ladera	62
4.4.	SUSCEPTIBILIDAD	63
4.4.1.	Flujos de barro y/o detrito	63



4.4.1.1. Metodología específica.....	63
4.4.2. Procesos de ladera	66
5. SISMICIDAD.....	80
5.4. TIPOS DE SISMOS	80
5.2. CATASTRO DE SISMOS	86
5.3. DIAGNÓSTICO	87
6. VOLCANISMO.....	90
6.1. CATASTRO	90
6.2. DIAGNÓSTICO	93
7. REFERENCIAS.....	94
8. ANEXOS.....	100
8.1. DEFINICIONES DE PELIGRO Y RIESGO UTILIZADAS EN ESTE ESTUDIO	100
8.1.1. Contexto.....	100
8.1.2. Definiciones	100
8.2. DESCRIPCIÓN DE LOS PELIGROS GEOLÓGICOS ANALIZADOS	104
8.2.1. Procesos externos o exógenos de la tierra	104
8.2.1.1. Inundaciones terrestres y litorales	104
8.2.1.1.1. Inundaciones por desborde de cauces.....	105
8.2.1.1.2. Inundaciones por anegamiento.....	106
8.2.2. Procesos de remociones en masa	107
8.2.2.1. Flujos de detritos y barro	108
8.2.2.2. Desprendimientos o caída de rocas.....	110
8.2.3. Procesos internos o endógenos de la tierra	112
8.2.3.1. Sismicidad.....	112
8.2.3.1.1. Tipos de sismos en Chile	112
8.2.3.2. Mecanismos de daños asociados a los sismos.....	115
8.2.4. Volcanismo	119
8.3. HIDROLOGÍA.....	123
8.3.1. Revisión de antecedentes	123



8.3.1.1.	Plan Regulador Comunal de Peñalolén (PRC) – Plan Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS)	123
8.3.1.2.	Estudios para la Actualización Plan Regulador Comunal de Peñalolén	124
8.3.1.3.	Plan Maestro de Aguas Lluvias PM-01 (MOP, 2001)	125
8.3.1.4.	Catastro de obras en cauces naturales y áreas de restricción (DGA, 2006)	125
8.3.1.5.	Expediente VP-1306-796 (1997): “Canalización Quebrada 0-14 y 0-15, sector Club de Campo entre calle Talinay y Álvaro Casanova, comuna de Peñalolén”	130
8.3.1.6.	Expediente VP-1306-1114 (2003): “Proyecto Canalización quebrada Nido de Águilas en propiedad Av. José Arrieta N°9773”	131
8.3.1.7.	Expediente VP-1306-1177 (1999): “Regularización de cauce y obras de protección de ribera de la Quebrada Lo Hermida en conjunto habitacional Antupirén”	131
8.3.1.8.	Diagnóstico de cauces sector Pie Andino, Región Metropolitana (Ayala, Cabrera y Asociados Ltda., 2008)	132
8.3.1.9.	Obras DOH en Quebrada Macul y EIA	134
8.3.1.9.1.	Determinación de amenazas actuales por aluviones e inundaciones y su representación por medio de Mapas de Intensidades de Amenazas en la Quebrada Macul Región Metropolitana (Geotest, 2018)	134
8.3.1.9.2.	Análisis de la vulnerabilidad del sector oriente de la ciudad de Santiago ante la ocurrencia de aluviones y crecidas, Región Metropolitana. (Ayala, Cabrera y Asociados Ltda., 1996)	134
8.3.2.	Descripción cuencas aportantes	135
8.3.2.1.	Quebrada Peñalolén	136
8.3.2.2.	Quebrada Nido de Águila	137
8.3.2.3.	Quebrada Lo Hermida	139
8.3.2.4.	Quebrada de Macul	142
8.3.3.	Información hidrometeorológica	143
8.3.4.	Precipitaciones máximas	144
8.3.5.	Caudales de crecida	148
8.3.5.1.	Metodologías utilizadas para la definición de caudales de crecidas en cuencas sin control fluviométrico	148
8.3.5.2.	Método DGA-AC	149



8.3.5.3. Método Verni y King modificado	150
8.3.5.4. Método de la Fórmula Racional	151
8.3.5.5. Método del hidrograma unitario TIPO LINSLEY.....	152
8.3.5.6. Método de la Fórmula Racional – Manual de Carreteras.....	154
8.3.5.7. Detalle resultados	155



1. INTRODUCCIÓN

Este documento corresponde al Estudio de Riesgos Naturales para el Proyecto: “MODIFICACIÓN DEL PLAN REGULADOR COMUNAL DE PEÑALOLÉN”. En el que se incluyen las metodologías y antecedentes utilizados, las líneas de base necesarias para la elaboración del estudio, un catastro de los peligros geológicos relevantes, un diagnóstico de cada uno de ellos y su zonificación por susceptibilidad.

Los resultados de este trabajo corresponden a la identificación de las áreas urbanas susceptibles a ser afectas por un peligro natural de acuerdo con las definiciones expuestas en el Anexo A: “Definiciones de peligro y riesgo utilizadas en este estudio”. Estos se presentan en mapas de riesgos y cuadros de resumen, según la nomenclatura propuesta por la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC).

1.1. UBICACIÓN

El estudio corresponde a la zona restituida de la comuna de Peñalolén, que contiene el área urbana y cordillerana de la comuna. Esta comuna se encuentra en la Región Metropolitana y limita al norte con la comuna de Las Condes y La Reina, al sur con la comuna de La Florida, al este con la comuna de San José de Maipo y al oeste con las comunas de Macul y Ñuñoa (FIGURA N° 1-1).

1.2. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es la elaboración del Estudio de Riesgos, relativo a los peligros de origen natural, que forma parte de los estudios especiales que, según el artículo 2.1.10 (OGUC)¹, deben acompañar la Actualización al Plan Regulador Comunal de Peñalolén.

Asociado al objetivo propuesto, es necesario reconocer y delimitar las “áreas de riesgo” de acuerdo con las definiciones expuestas en el artículo 2.1.17 de la OGUC, que han de ser incorporadas y/o adecuadas en este informe, las cuáles son:

- 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.
- Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas.
- Zonas con peligro de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas.
- Zonas o terrenos con riesgos generados por la actividad o intervención humana.

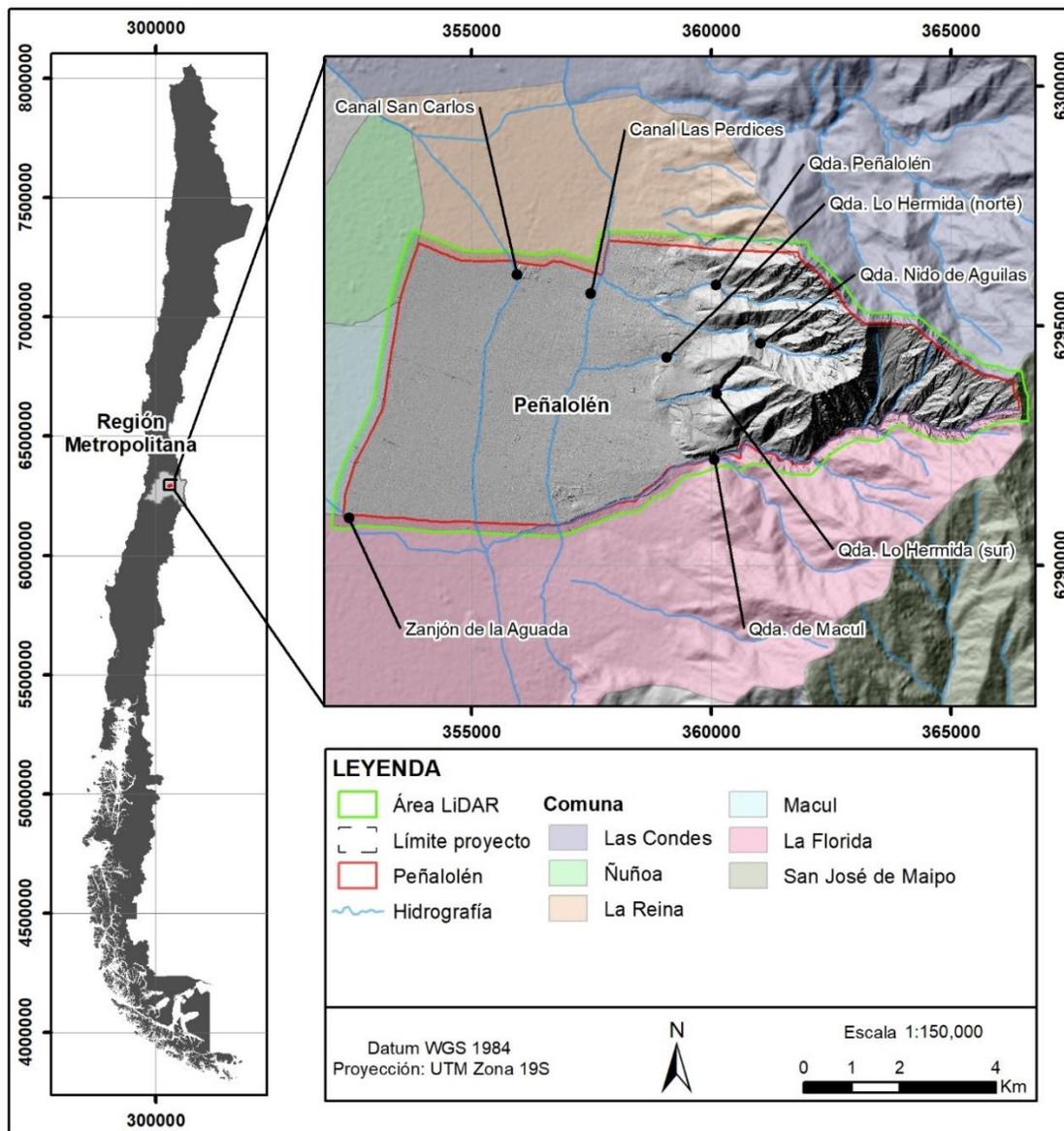
Lo anterior se cumplirá mediante los siguientes objetivos específicos:

¹ Se incluyen las modificaciones a la OGUC hasta el 9 de septiembre de 2021.



- Identificar las zonas que han sido afectadas por peligros de origen natural en la comuna.
- Identificar y caracterizar a escala comunal, los factores que pudieran condicionar la ocurrencia de los peligros de origen natural.
- Elaborar cartografías donde se definan las áreas que pueden ser afectadas por los peligros presentes en la comuna.
- Proponer recomendaciones según lo que establece la OGUC, para así reducir la exposición frente a los peligros identificados.

FIGURA N° 1-1: Ubicación del área de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

1.3. ALCANCES Y LIMITACIONES

A continuación, se detallan los alcances y limitaciones de la metodología general utilizada en este estudio, la cual se describe en la Sección 1.5 de este informe.

- Para la recopilación de antecedentes, se reunió la mayor cantidad de información respecto de eventos peligrosos que fue posible, con el objetivo de elaborar un catastro y diagnóstico para cada uno de los peligros identificados.
- En la línea de base, se presentó una descripción de la geología y la geomorfología de la comuna, la cual se ajustó utilizando la topografía entregada por el mandante, entre otros insumos.
- El catastro contiene la totalidad de los antecedentes relativos a peligros que hubieran afectado a la comuna que fue posible recopilar. Sin embargo, en algunos casos no se encontraron antecedentes, pese a que las características geológicas y geomorfológicas sugieren que las áreas pueden ser afectadas por dichos peligros. Esto es particularmente complejo con aquellos peligros que se repiten de manera muy espaciada en el tiempo, que no cuentan con registros históricos.
- El diagnóstico de los peligros, se elaboró a partir de las características físicas de cada uno de ellos y de los antecedentes que soportan su estudio, es decir, la línea de base y el catastro, con las limitaciones que éstos tienen.
- Es necesario hacer énfasis en que la elaboración de los mapas de zonificación de susceptibilidad de los distintos tipos de peligros identificados se realizó en base a la evidencia recopilada y a modelos, los cuales consideran simplificaciones y supuestos, por lo que las áreas de susceptibilidad y sus límites son aproximaciones, no poseen certeza absoluta ni indican una probabilidad de ocurrencia. Al tratarse de fenómenos de origen natural, hay posibilidades de que ocurran eventos de los que no se tiene registro, relevando la importancia del monitoreo asociado a la gestión del riesgo.
- Todos los productos que se presentan como mapas, es decir, la cartografía geológica, geomorfológica y los peligros se analizaron a escala 1:1.000, lo que implica que no se consideraron elementos de mayor detalle. En la práctica, esto se traduce en que los peligros que afecten sectores de un tamaño aproximado menor a 2m., no se han cartografiado.

La metodología de este estudio es el resultado de una secuencia de actividades, en que, para generar un producto también se incorporaron como insumo productos anteriores.

1.4. MARCO JURÍDICO

La Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, en adelante 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 aquellas que por su especial naturaleza y ubicación no son susceptibles de edificación, en virtud de lo preceptuado en el inciso primero del artículo 60º de la Ley General de Urbanismo y Construcciones, en adelante LGUC. 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 límite 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, las “áreas de riesgo”, son definidas como las zonas susceptibles de ser afectadas por un peligro geológico, puesto que la zonificación fue realizada a partir de mapas de susceptibilidad y de factores condicionantes (ver las definiciones presentadas en el Anexo A): **“Definiciones de peligro y riesgo utilizadas en este estudio”**. Este informe no considera el análisis de los peligros de origen antrópico.

En el (CUADRO N° 1-1), se presentan los peligros naturales definidos en el artículo 2.1.17 de la OGUC y la homologación con la nomenclatura internacional utilizada por este informe. A continuación, se presenta la definición de estos peligros geológicos y sus criterios de zonificación.

- 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 inundaciones terrestres e inundaciones litorales. Dentro de inundaciones terrestres se incluyen las inundaciones por desborde de cauces e inundaciones por anegamientos. En relación con las inundaciones litorales el territorio comunal no es susceptible de ser afectado por este peligro.

- Apartado 2 del artículo 2.1.17 de la (OGUC): Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas, corresponde a los peligros geológicos de remociones en masa, analizados separadamente como: (1) flujos de barro y detritos, (2) procesos de ladera, entendidos como aquellos desplazamientos de masas de tierra o rocas que se encuentran en pendiente que ocurren debido a la inestabilidad de los materiales que forman la ladera (incluyendo caída de bloques, deslizamientos y retrocesos de laderas).
- 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, es decir, sismicidad y volcanismo.

CUADRO Nº 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		Análisis	Descripción conceptual
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	Inundaciones terrestres	Por desborde de cauces	Capítulo 3	Anexo 8.2.1.1
		Anegamiento		
2. Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas	Remociones en masa	Flujos de barro y/o detritos.	Capítulo 4	Anexo 8.2.2
		Procesos de ladera		
3. Zonas con peligro de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas	Sismicidad		Capítulo 5	Anexo 8.2.3.1
	Volcanismo		Capítulo 6	Anexo 8.2.4

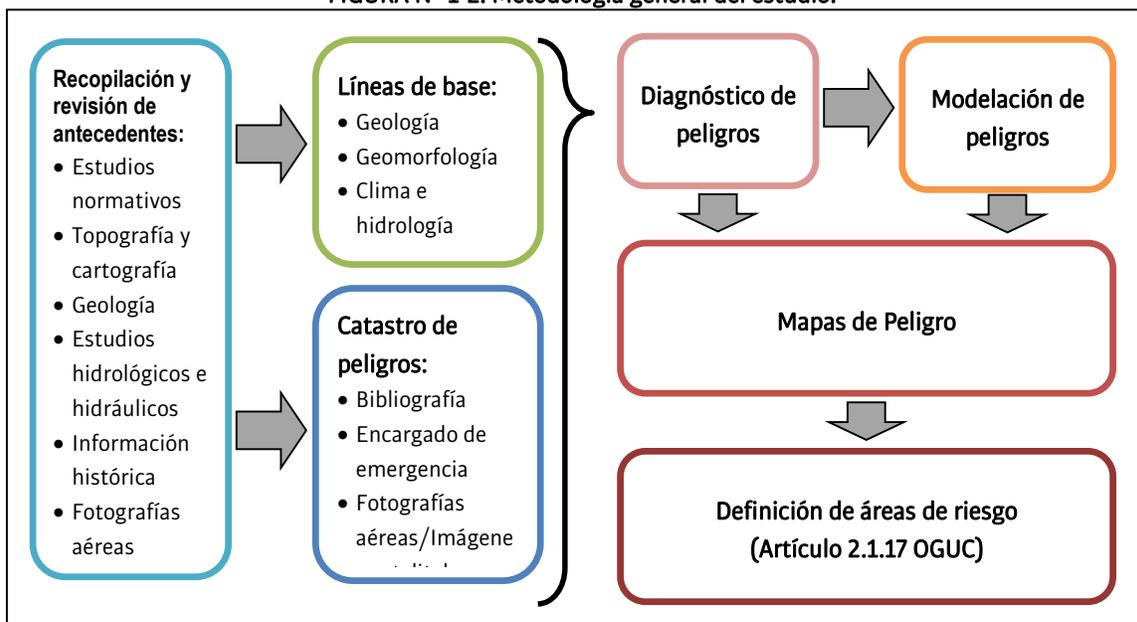
Fuente: Elaboración propia en base a la normativa 2.1.17.

1.5 METODOLOGÍA GENERAL DEL ESTUDIO

En función de los objetivos propuestos, la metodología de este estudio está orientada a identificar, caracterizar y delimitar las áreas que presenten peligro por causas naturales que pudieran afectar a la población y/o su infraestructura asociada dentro del área de estudio. Además de aquellas áreas

ocupadas por la población, se considerarán aquellas donde se puedan establecer nuevas poblaciones u obras de infraestructura según corresponda y, para de esta forma, definir las áreas de riesgo, según la definición de la OGUC (FIGURA N° 1-2). A continuación, se describen de manera general las actividades que se realizaron para elaborar este estudio.

FIGURA N° 1-2: Metodología general del estudio.



Fuente: Elaboración propia.

1.5.1. Recopilación de antecedentes

Se recopilaron y revisaron los antecedentes que entregó la Municipalidad, que fueron relevantes para la elaboración del estudio de riesgos de la comuna. Adicionalmente, se utilizó información disponible de instituciones públicas y privadas. La información recopilada es:

- Información topográfica y cartográfica del área de estudio, levantada en trabajos anteriores.
- Cartografía geológica de la comuna.
- Estudios hidrológicos e hidráulicos donde se analicen los cauces de la comuna.
- Estudios de recopilación histórica que contengan información relativa a peligros que hubieran afectado a la comuna.
- Estudios de carácter técnico relativos a peligros que han afectado a la comuna.
- Archivos de prensa donde se haga referencia a peligros que hubieran afectado a la comuna.
- Fotografías aéreas e imágenes satelitales de la comuna.

Los antecedentes recopilados, son la base para el desarrollo de este trabajo, y se complementaron con información generada durante el estudio. Estos se utilizaron para la elaboración de las líneas de base y para definir las metodologías más adecuadas.

1.5.2. Elaboración de líneas de base

Se elaboraron líneas de base para caracterizar factores que se relacionan con la ocurrencia de los peligros que pueden afectar a la comuna, con el objetivo de identificar aquellos sectores que son más propensos a su ocurrencia y estimar, aunque sea de manera general, la recurrencia de estos peligros. De esta forma, la línea de base para el estudio fundado de riesgos considera los siguientes componentes:

- **Geología:** En ella se identifica y caracteriza los materiales y estructuras presentes en el territorio estudiado.
- **Geomorfología:** Reconoce y describe las formas presentes en el área de estudio y cuantifica sus parámetros morfométricos.
- **Clima e hidrología:** En ella se caracterizan las precipitaciones y las cuencas aportantes, junto con la red de drenaje. A partir de esto se cuantifican los caudales esperados para la comuna.

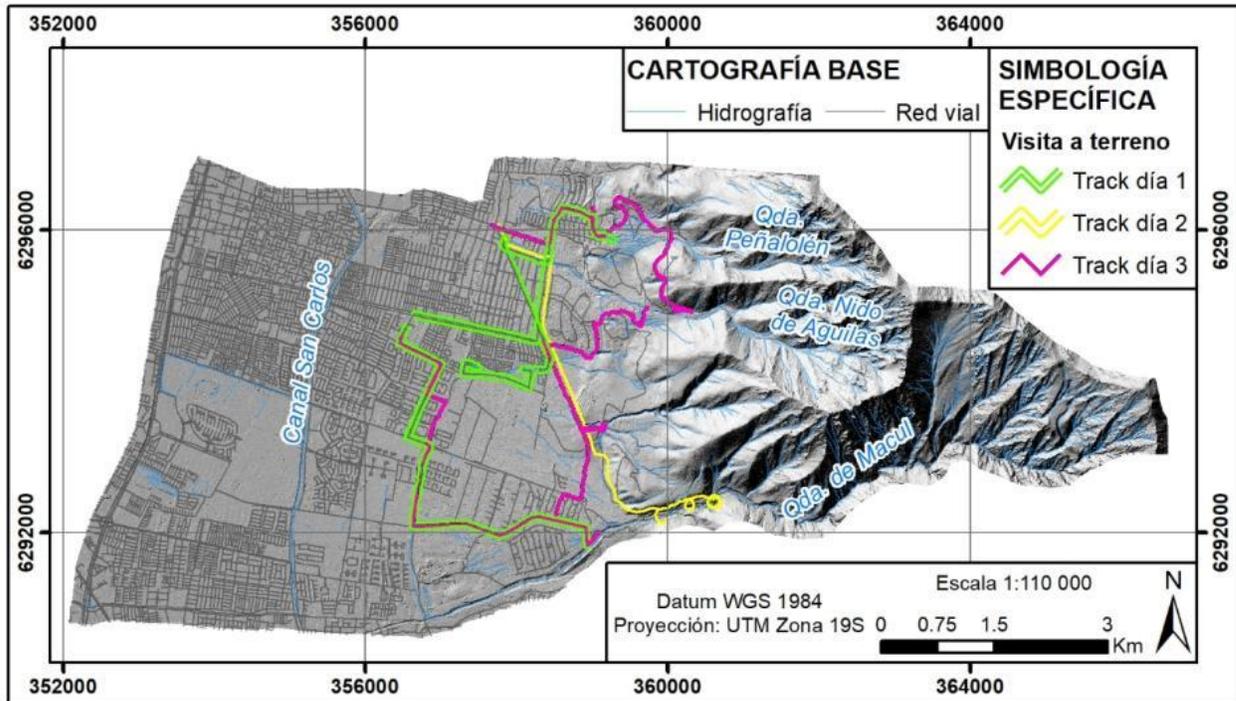
1.5.3. Catastro de peligros

Se elaboraron cuadros con los eventos peligrosos que han afectado al área estudiada, que contienen en la medida que sea posible: tipo de peligro, fecha de ocurrencia, tipo y magnitud de evento gatillante, daños y fuentes de información utilizadas. La información de estos cuadros se utilizó para elaborar los diagnósticos de cada uno de los peligros estudiados y, en los casos que correspondiera, para calibrar los modelos utilizados. Las fuentes de información utilizadas fueron:

- Fuentes bibliográficas.
- Reunión con el equipo municipal.
- Revisión de fotografías aéreas e imágenes satelitales.
- Visitas a terreno: 04/09/2019, 03/11/2021, 09/11/2021 (FIGURA N° 1-3).



FIGURA N° 1-3: Recorrido de las visitas a terreno.



Fuente: Elaboración propia.

1.5.4. Diagnóstico de peligros

La información recopilada y generada se sistematizó para definir las áreas donde existen condiciones para que un peligro las afecte. El resultado de esta actividad es un análisis de los factores condicionantes que permite identificar los sectores que presentan condiciones más favorables para la ocurrencia del peligro, y un análisis de los factores desencadenantes, que permite estimar la recurrencia de los eventos del peligro en cuestión. Esto se realizó para cada uno de los peligros reconocidos a partir de la información disponible y sus características físicas.

1.5.5. Elaboración de mapas de peligros

A partir de los factores condicionantes reconocidos en la actividad anterior y, en los casos que correspondiera, de los modelos numéricos, se definieron criterios objetivos que permitieran asignar un nivel de susceptibilidad en el territorio. En términos generales, se asigna un grado de susceptibilidad “muy alta” a aquellas que muy probablemente serán afectadas en caso de ocurrir un evento del peligro analizado, una susceptibilidad “alta” a aquellas afectadas por eventos extremos (en muchos casos son los más grandes de los que se tengan registros históricos) y susceptibilidad “moderada” a las áreas afectadas por eventos excepcionales, de los que muchas veces no existen registros históricos, pero si otro tipo de evidencias, como evidencias geológicas o morfológicas.

En el (CUADRO N° 1-2) se comparan los grados de susceptibilidad anteriormente propuestos con las categorías establecidas por la SUBDERE. Estos criterios se representaron gráficamente mediante mapas de peligro que incluyen los diferentes niveles de susceptibilidad.

CUADRO N° 1-2 Categorías en el análisis del nivel de amenaza y susceptibilidad comparable.

Estratificación		Descripción	Probabilidad	Susceptibilidad comparable
Muy probable	5	Ocurre más de una vez por año	1,0	Muy alta
Bastante probable	4	Ocurre una vez entre 1 y 10 años	0,99 – 0,10	Muy alta
Probable	3	Ocurre una vez entre 10 y 50 años	0,10 – 0,02	Alta
Poco probable	2	Ocurre una vez entre 50 y 100 años	0,02 – 0,01	Alta o moderada
Improbable	1	Ocurre cada 100 y más años	<0,01	Moderada

Fuente: Modificado de “Guía análisis de riesgos naturales para el ordenamiento territorial”
(SUBDERE, 2011).

1.5.6. Definición de áreas de riesgo y recomendaciones

Una vez que se tienen los mapas de susceptibilidad, se definen las “áreas de riesgo” de acuerdo con lo establecido en el artículo 2.1.17 de la OGUC. Se asignó esta categoría en función de los mapas de peligros generados anteriormente y de los criterios utilizados para asignar cada categoría de susceptibilidad. Adicionalmente, se establecieron recomendaciones de carácter general con respecto a los criterios de uso de suelo en el área estudiada, a partir del nivel de peligrosidad representada mediante los distintos niveles de susceptibilidad.

2. LÍNEAS DE BASE DE GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

2.1. MARCO GEODINÁMICO

Chile se ubica en un margen convergente activo de placas oceánica-continental (FIGURA N° 2-1), donde la placa oceánica Nazca subducta bajo el margen occidental de la placa continental Sudamericana, dando origen a los Andes Centrales. Este proceso de subducción se reconoce activo, al menos, desde el Jurásico Temprano (Mpodozis & Ramos, 1989), o incluso desde el Pérmico (Coloma, y otros, 2017; Oliveros, y otros, 2020). A partir del Eoceno, la tasa de convergencia ha variado entre 5 y 15 cm/año (Somoza, 1998), siendo actualmente de 7,5 cm/año (DeMets, Gordon, Argus, & Stein, 1994).

El segmento ubicado entre los 33°S y los 46°S corresponde, dentro del esquema de segmentación andina de Mpodozis y Ramos (1989), a una zona de subducción tipo chilena caracterizada por un ángulo de subducción entre las placas Nazca y Sudamericana de ~30°. Este segmento de subducción se ubica al sur del segmento Pampeano de subducción plana, desarrollado entre los 27°S y los 33°S, en donde la placa oceánica se curva proyectándose con 10° de inclinación bajo la Placa Sudamericana (Cahill & Isacks, 1992; Anderson, Alvarado, Zandt, & Beck, 2007). El desarrollo del segmento Pampeano de subducción plana se ha asociado con (1) la subducción de la Dorsal de Juan Fernández, cuyo punto de colisión contra el continente permanece fijo hace ~10 Ma (Yañez, Ranero, von Heune, & Díaz, 2001; Anderson, Alvarado, Zandt, & Beck, 2007); y con (2) el espesor de la placa superior y el *rollback* de la fosa (Manea, Pérez-Gussinye, & Manea, 2012). Si se comparan ambos segmentos, se destacan las siguientes características:

1. La costa oeste de la Placa Sudamericana tiene un rumbo aproximado norte-sur en el tramo de subducción plana, mientras que al sur de los 33°, la costa posee un rumbo aproximado N20°E.
2. Mientras que la configuración morfoestructural del antearco, al sur de los 33°S, se compone de oeste a este por la Cordillera de la Costa, Depresión Central y Cordillera Principal. Al norte, sobre el segmento Pampeano de subducción plana, la ausencia de Depresión Central configura un paisaje montañoso continuo denominado como Valles Transversales.
3. Sobre el segmento Pampeano de subducción plana no existe registro de volcanismo Holoceno, mientras que al sur de los ~33°S, el arco volcánico Holoceno se encuentra plenamente desarrollado y activo.

La acumulación y posterior relajación de los esfuerzos producto de la convergencia del régimen de subducción es la causa de que todo Chile hasta la península de Taitao, sea afectado frecuentemente por terremotos. La gran mayoría de estos sismos y los eventos de gran magnitud se originan en la zona del contacto entre placas y surgen de la liberación súbita de gran parte de la energía acumulada

durante el proceso de convergencia de placas (Ej. Sismos del 6 de abril de 1943 que afectó a la Región de Coquimbo, 3 de marzo de 1985 en la Región de Valparaíso, sismos de mayo de 1960 en Valdivia, sismo del 27 de febrero de 2010 que afectó desde la Región de Valparaíso a la Región de la Araucanía). Los esfuerzos acumulados por la subducción también se propagan hacia el interior de la placa continental, y se liberan mediante sismos superficiales, normalmente de magnitud menor pero más destructivos localmente (Ej. Sismo de Las Melosas de 1958, sismo de Chusmiza de 2001). Otros sismos son provocados por la relajación de esfuerzos de 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 de 2005).

FIGURA N° 2-1: Marco geodinámico de Chile representado en 3D.



Fuente: Elaboración propia. La Dorsal de Juan Fernández es subductada a los 33°S. La línea verde señala la fosa, lugar donde subducta la Placa Nazca bajo la Placa Sudamericana, y las flechas muestran direcciones y velocidades de convergencia entre ambas.

2.2. MARCO GEOMORFOLÓGICO

2.2.1. Unidades morfoestructurales

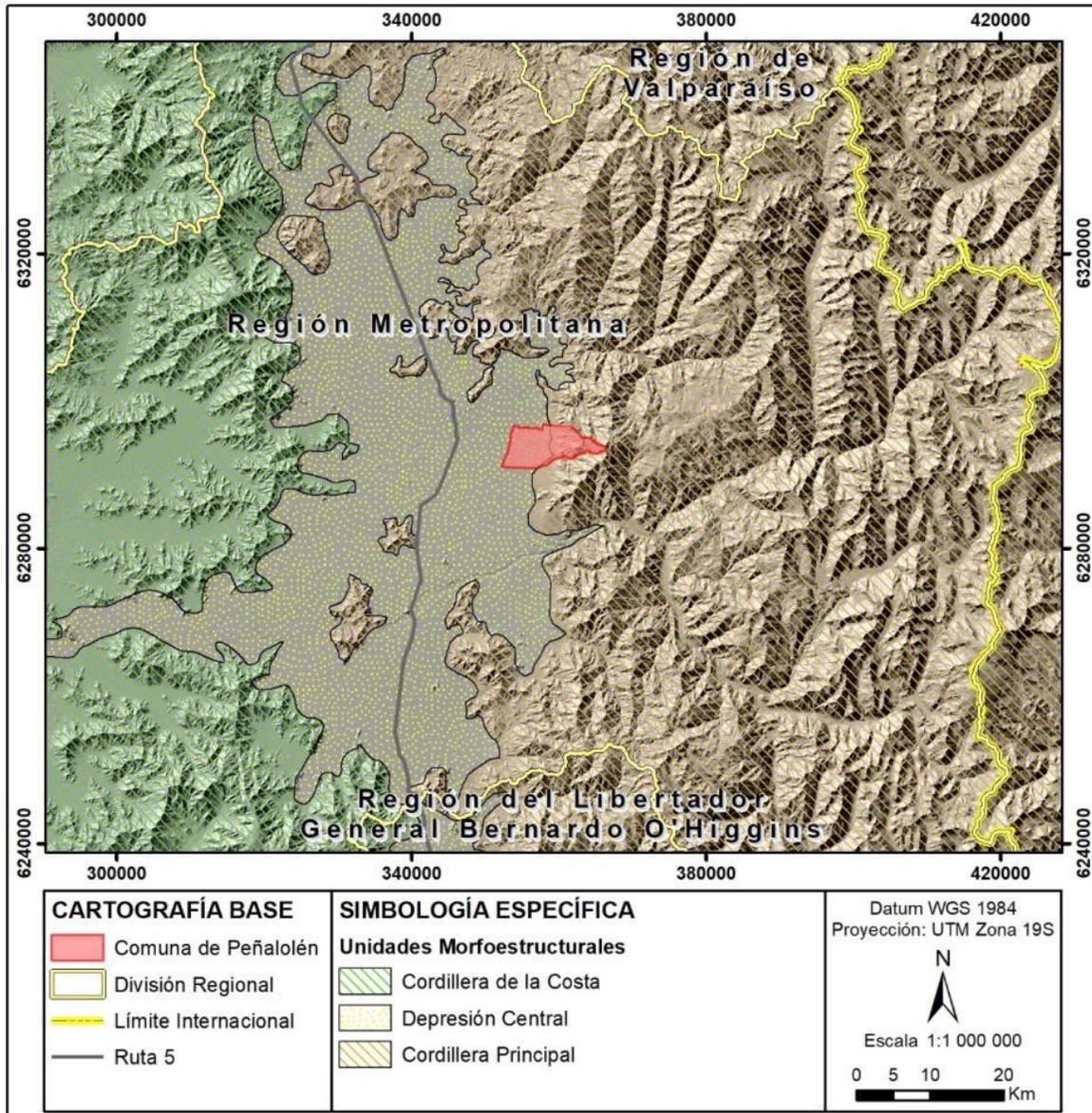
El segmento andino chileno ubicado al sur de los 33°S exhibe tres unidades morfoestructurales de primer orden dispuestas en franjas de orientación norte-sur. De oeste a este: Cordillera de la Costa, Depresión Central y Cordillera Principal (que comparten Chile y Argentina). La comuna de Peñalolén se ubica en la zona de transición entre la Depresión Central y la Cordillera Principal (FIGURA N° 2-2).

En la Región Metropolitana, la Depresión Central corresponde a una extensa llanura levemente inclinada hacia el oeste, la cual se ve interrumpida ocasionalmente por zonas donde se une la Cordillera de la Costa con la Cordillera Principal (cordón de Chacabuco, cerros de Colina, cerros de Chada), y por algunos cerros islas, cuyas alturas no superan los 250m., con respecto a la Depresión Central (Cerro San Cristóbal, Cerro Renca, Cerro Chena).



Por su parte, la Cordillera Principal corresponde al resultado de mayor deformación producto de la subducción. En la Región Metropolitana se representa mediante el segmento occidental de la cordillera con alturas que llegan hasta los 5.570 m s.n.m. en el Volcán Tupungato en su límite con la República Argentina. Los cerros más prominentes de la zona corresponden a Cerro El Plomo, Provincia, San Ramón, Punta de Damas, Minillas, entre otros, superando todos ellos los 2.000 m s.n.m.

FIGURA Nº 2-2: Unidades morfoestructurales a escala regional 1:1.000.000.



Fuente: Elaboración propia.

2.2.2. Aspectos geomorfológicos relevantes

Como se mencionó en el capítulo anterior, el área de estudio se ubica en la zona de transición entre

el valle de Santiago y la zona cordillerana. Las principales unidades geomorfológicas (o geoformas) a escala local tienen directa relación con esta transición (FIGURA N°2-3).

Dentro de las unidades geomorfológicas destacan las **quebradas** y respectivos **abanicos aluviales**, que se encuentran superpuestos, siendo los más antiguos incididos por los más jóvenes. Dentro de los componentes de los abanicos aluviales, en algunos casos se pueden observar claramente los ápices, que corresponde a la zona donde comienza a abrirse el abanico. También se reconocen cauces activos hacia el sector cordillerano, sin embargo, hacia el poniente de la comuna, no es posible hacer una mayor distinción de ellos debido a la urbanización.

Respecto a las unidades aluviales actuales, se distinguen cinco quebradas principales que reciben los aportes de quebradas menores desde la cordillera y que desembocan en la comuna. De norte a sur son: Peñalolén (denominada localmente como Las Palmas), Nido de Águila, Lo Hermida (norte), Lo Hermida (sur) y de Macul.

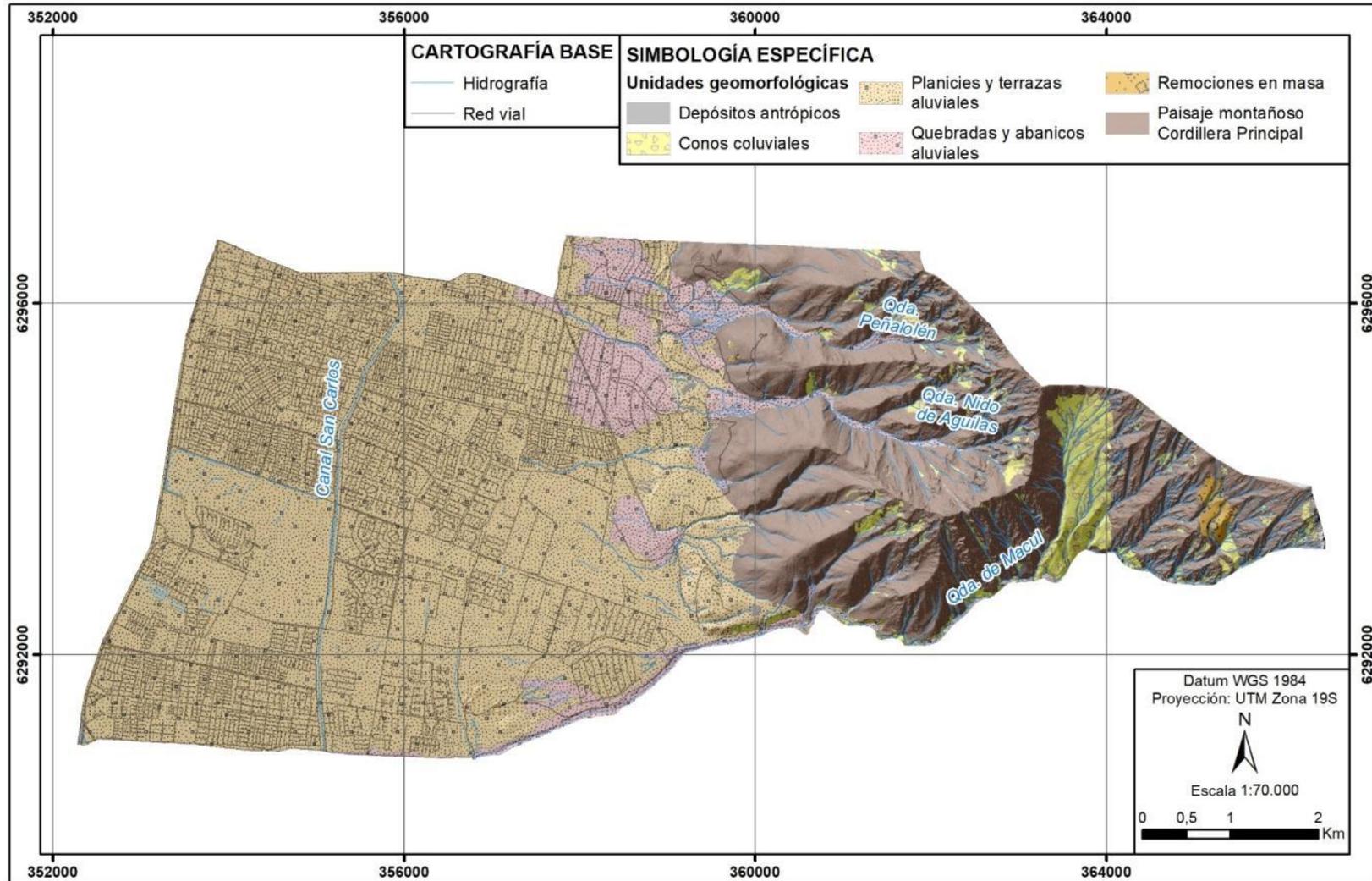
Los abanicos aluviales, tanto recientes como antiguos, se ubican en el sector de la Depresión Central con bajas pendientes, en la zona urbanizada de la comuna. Como se mencionó anteriormente, es difícil hacer una distinción exacta entre ellos, por lo que su diferenciación se basó en antecedentes bibliográficos, (Rauld R. , 2011). Sin embargo, hacia el sur de la comuna, existe un relleno sedimentario que se diferencia morfológicamente del resto, debido a que presenta mayores pendientes y elevación.

En el sector cordillerano de la comuna, al ser un sector de mayor elevación, con altas pendientes y cobertura de vegetación variable, se reconocen geoformas asociadas a diversos tipos de **remociones en masa**. Por un lado, existen algunas de menor tamaño como **conos coluviales** originados por caídas de coluvios, algunos deslizamientos y caídas de roca de menor envergadura. Por otro lado, se pueden observar remociones en masa más antiguas, de edad Pleistoceno tardío a Holoceno, de un volumen considerable, mayor a 10^6 m^3 (Antinao, Fernández, Naranjo, & Villarroel, 2003).

Finalmente, se reconocen **planicies aluviales** en el sector de la Depresión Central y **terrazas aluviales** a lo largo de las quebradas. En la quebrada de Macul, las terrazas más prominentes se encuentran en el área más baja, cerca de la zona de desconfinamiento de la quebrada, donde es posible reconocer, al menos, tres niveles aterrazados. Hacia el este de la quebrada, de igual manera se reconocen terrazas, sin embargo, dado lo inciso del valle, estas son más restringidas espacialmente en comparación con las que se encuentran hacia el oeste.



FIGURA Nº 2-3: Mapa geomorfológico levantado a escala 1:1000.



Fuente: Elaboración propia.



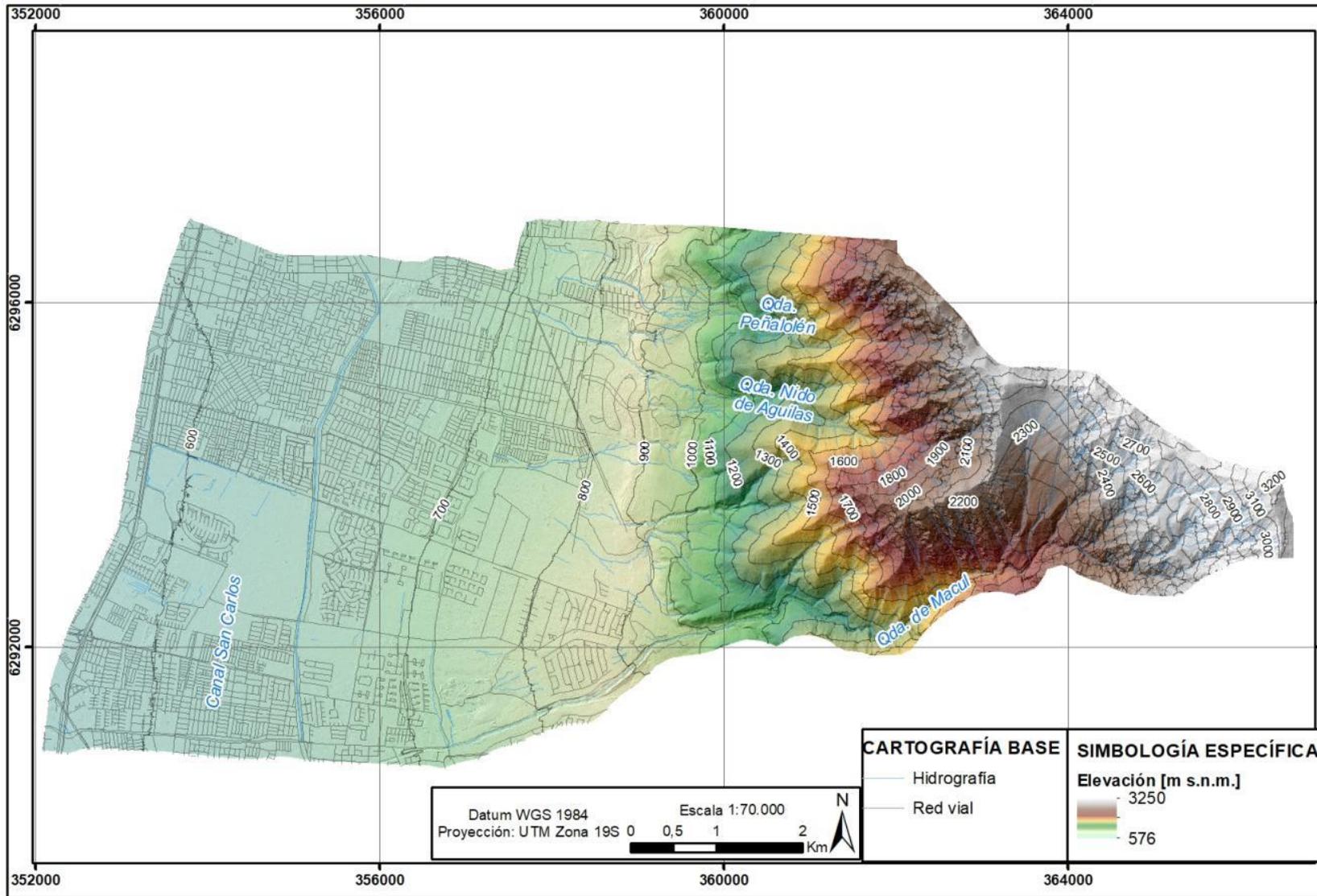
2.2.3. Parámetros morfométricos

En el área de estudio las elevaciones varían entre los 576 y los 3.250 m s.n.m. (FIGURA N° 2-4), con las mayores alturas hacia el área cordillerana, al oriente de la comuna. Por otro lado, las partes más bajas se ubican en el sector sur-poniente del área de estudio, en la zona urbanizada.

En cuanto a las pendientes, el sector poniente y donde se concentra la mayor parte de la urbanización, posee pendientes menores a 15°; estos sectores topográficamente más bajos se conforman geológicamente por los distintos depósitos fluviales (FIGURA N°2-5). Con respecto a aquellas pendientes mayores a 15°, estas se encuentran en las laderas de los cerros hacia el sector cordillerano, en las laderas que bordean las quebradas en su desembocadura y en las laderas del relleno sedimentario Pleistoceno inferior-medio. Geológicamente, en estas zonas aflora la Formación Abanico, donde las máximas pendientes superan los 80°.



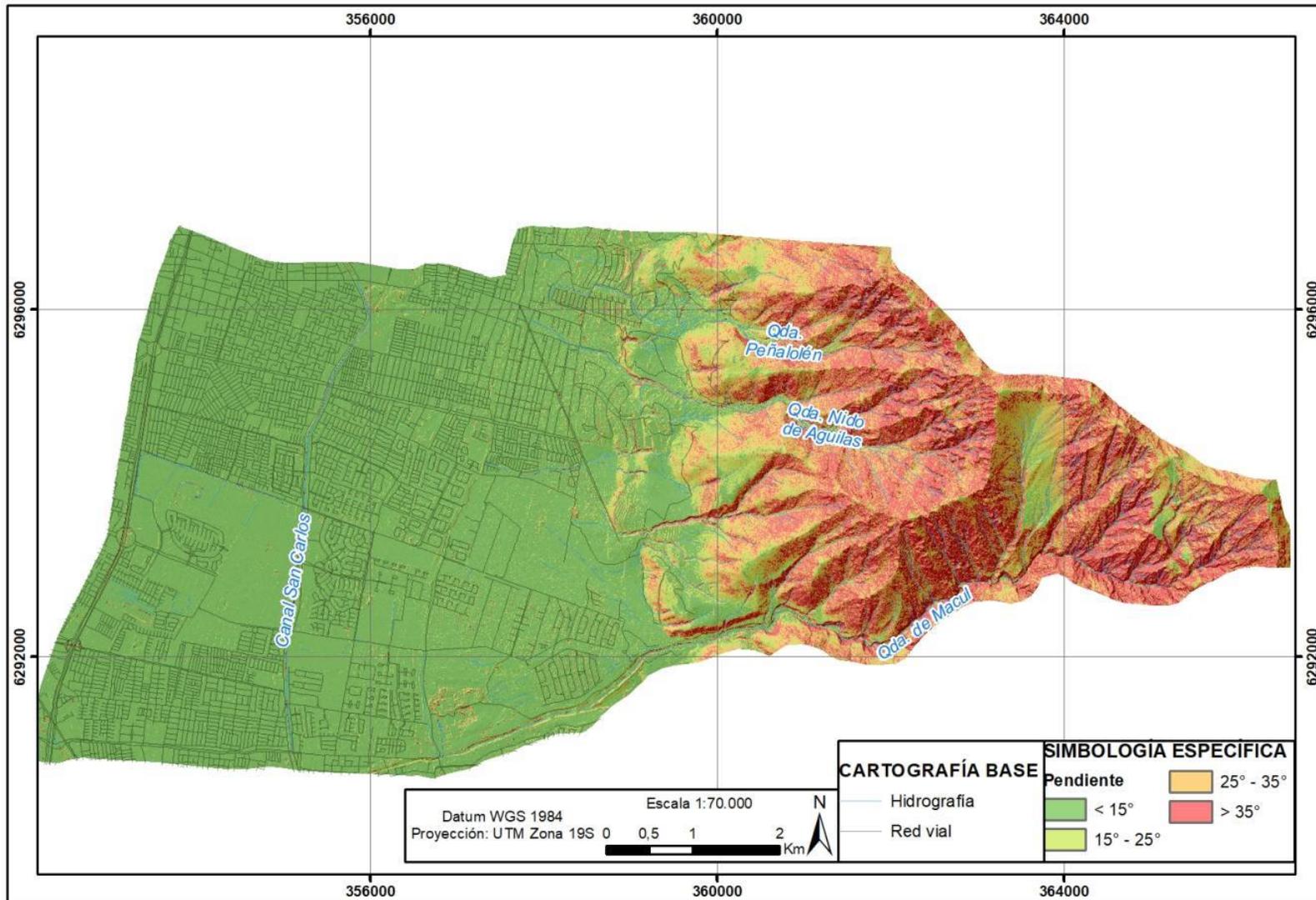
FIGURA N° 2-4: Carta morfométrica de elevaciones de la comuna.



Fuente: Elaboración propia.



FIGURA N° 2-5: Carta morfométrica de pendientes de la comuna.



Fuente: Elaboración propia.



2.3. MARCO GEOLÓGICO

La geología de la comuna de Peñalolén está constituida esencialmente por rocas volcánicas con algunas intercalaciones sedimentarias de edad Eoceno-Mioceno, las que presentan diversos grados de meteorización. Estas rocas se encuentran cubiertas por distintos tipos de depósitos no consolidados, los que son producto de procesos aluviales, coluviales y de remoción en masa. Cada una de estas unidades geológicas se describen a continuación, basándose en los trabajos de Rauld (2011), Lara (2007), Antinao, Fernández, Naranjo y Villarroel (2003), Wall, Selles y Gana (1999), y Naranjo y Varela (1996). El mapa geológico levantado a escala 1:1.000 se representa en la (FIGURA N° 2-9) a una escala de 1:70.000 para su visualización.

2.3.1. Depósitos no consolidados

2.3.1.1. Depósitos antrópicos (Han)

Corresponden a depósitos originados por la actividad humana.

2.3.1.2. Depósitos aluviales actuales de 1993 (Ha2)

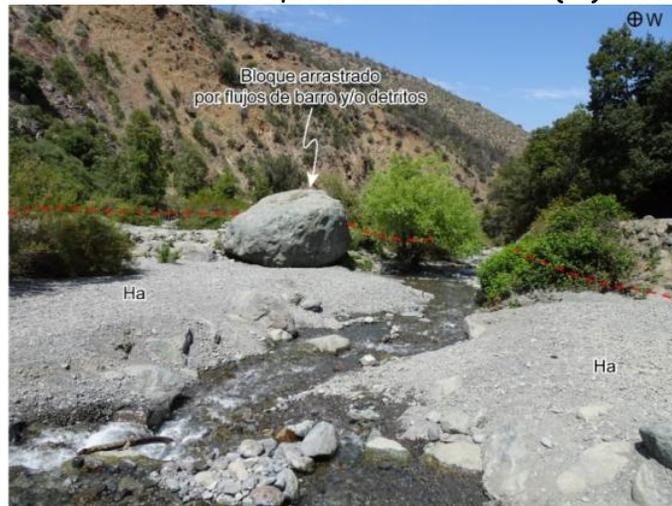
Corresponden a depósitos compuestos por bloques angulosos a subredondeados entre 0,3 - 1m., de diámetro y matriz limo arcillosa, los cuales se encuentran relleno los cauces de la quebrada de Macul y quebradas que confluyen a ésta. Estos depósitos se encuentran desde la zona alta de la quebrada, donde esta recibe aporte de sus quebradas menores, hasta la zona más baja de la comuna, lugar donde se desconfinan el flujo y termina por depositar la mayor parte del material removido, distribuyéndose con una dirección esencialmente este-oeste.

2.3.1.3. Depósitos aluviales actuales (Ha)

Corresponden al conjunto de arenas, gravas y bloques de hasta 2 - 3 m., de diámetro, que rellenan los cauces de quebradas y esteros actuales. Estos depósitos se encuentran al fondo de canales confinados, propios de regiones montañosas, en sectores donde estos se proyectan sobre las fracciones apicales y medias de los abanicos aluviales (FIGURA N° 2-6). Son producto de cauces esporádicos de agua y/o flujos de detritos recientes. Los clastos de estos depósitos corresponden a rocas pertenecientes a la Formación Abanico.



FIGURA N° 2-6: Depósitos aluviales actuales (Ha).



Fuente: Registro de terreno.

2.3.1.4. Depósitos coluviales actuales (Hc)

Corresponden a sedimentos no consolidados, localizados de manera dispersa sobre la Formación Abanico en la parte oriental de la comuna. Se encuentran en zonas de alta pendiente en las laderas de cerros, generalmente cercanos a afloramientos de roca que es de donde obtiene el material.

Están formados por clastos, bloques y gravas mal seleccionadas, angulosas y con escasa a casi nula matriz. La mayoría del material presenta diámetros entre 20 y 50 cm, pero también se encuentran ocasionalmente clastos de menor o mayor tamaño, incluso superando el metro de diámetro. No presentan cubierta vegetal.

2.3.1.5. Depósitos coluviales Pleistoceno-Holoceno (PHc)

Corresponden a depósitos no consolidados conformados por gravas y bloques mal seleccionados, cuyo origen se encuentra adyacente a laderas de alta pendiente. Se localizan en el segmento oriental de la quebrada de Macul sobre la Formación Abanico. Generalmente, estos depósitos se ubican en las partes más altas de las laderas relleno hasta el fondo de las quebradas, siendo cubiertos parcialmente por depósitos coluviales más recientes.

2.3.1.6. Depósitos aluviales Pleistoceno-Holoceno superior (PHa)

Corresponden a depósitos aluviales no consolidados, de granulometría gruesa, gravo-arenosa con matriz limoarcillosa (FIGURA 2-7). Se ubica en la desembocadura de las quebradas en el borde precordillerano de la comuna, formando abanicos aluviales con pendientes bajas ($< 6^\circ$). Se constituye de una alternancia de depósitos de remociones en masa (flujos de detritos) y depósitos fluviales que se interdigitan, y que engranan con los depósitos aluviales de los ríos Maipo y Mapocho. Sus límites son difíciles de reconocer debido a la intervención antrópica que hay en la comuna.

FIGURA N°2-7: Depósitos aluviales Pleistoceno-Holoceno superior (PHa).



Fuente: Registro de terreno.

2.3.1.7. Depósitos de remoción en masa (PHrm)

Corresponden a depósitos de remociones en masa de mayor tamaño, ubicados en la zona sur de la comuna. En general estos depósitos se componen de clastos angulosos a subangulosos de rocas pertenecientes a la Formación Abanico en una matriz limo-arenosa. El tamaño de los clastos es variable y puede ir desde unos pocos cm a 2-3m., de diámetro. Al sureste del área de estudio se reconocen depósitos de un megadeslizamiento de tierra de gran volumen (10^6 m^3) de edad Pleistoceno tardío a Holoceno.

2.3.1.8. Depósitos aluviales Pleistoceno medio-superior (Pmsa)

Son depósitos no consolidados formados por la intercalación de depósitos aluviales, fluviales y de remoción en masa conformados principalmente por clastos y bloques mal seleccionados en una matriz de arena fina. Se ubican en las faldas y pies de cerros y salidas de quebradas, constituyendo mantos adosados a los cerros con pendientes de 4° a más de 10° . Son depósitos estables donde se observa estratificación. Al igual que la unidad anterior, sus límites son difíciles de reconocer debido a la intervención antrópica.

2.3.1.9. Relleno sedimentario Pleistoceno inferior-medio (Pia)

Corresponden a depósitos antiguos de remociones en masa como flujos de barro y/o detritos, deslizamientos, desprendimiento de bloques, reptación y hundimiento. Es un depósito bastante compacto y estable con desarrollo de vegetación y erosionado por cauces actuales. Se ubica al sur de la comuna, adyacente a la Quebrada de Macul (FIGURA N° 2-8).

FIGURA Nº 2-8: Depósitos aluviales Pleistoceno-Holoceno superior (PHa) y Relleno sedimentario Pleistoceno inferior-medio (Pia) y depósitos aluviales actuales (Ha).



Fuente: Imagen satelital Google Earth

2.3.2. Unidades de roca

2.3.2.1. Formación Abanico Eoceno-Mioceno inferior (OIMa) (Aguirre, 1960)

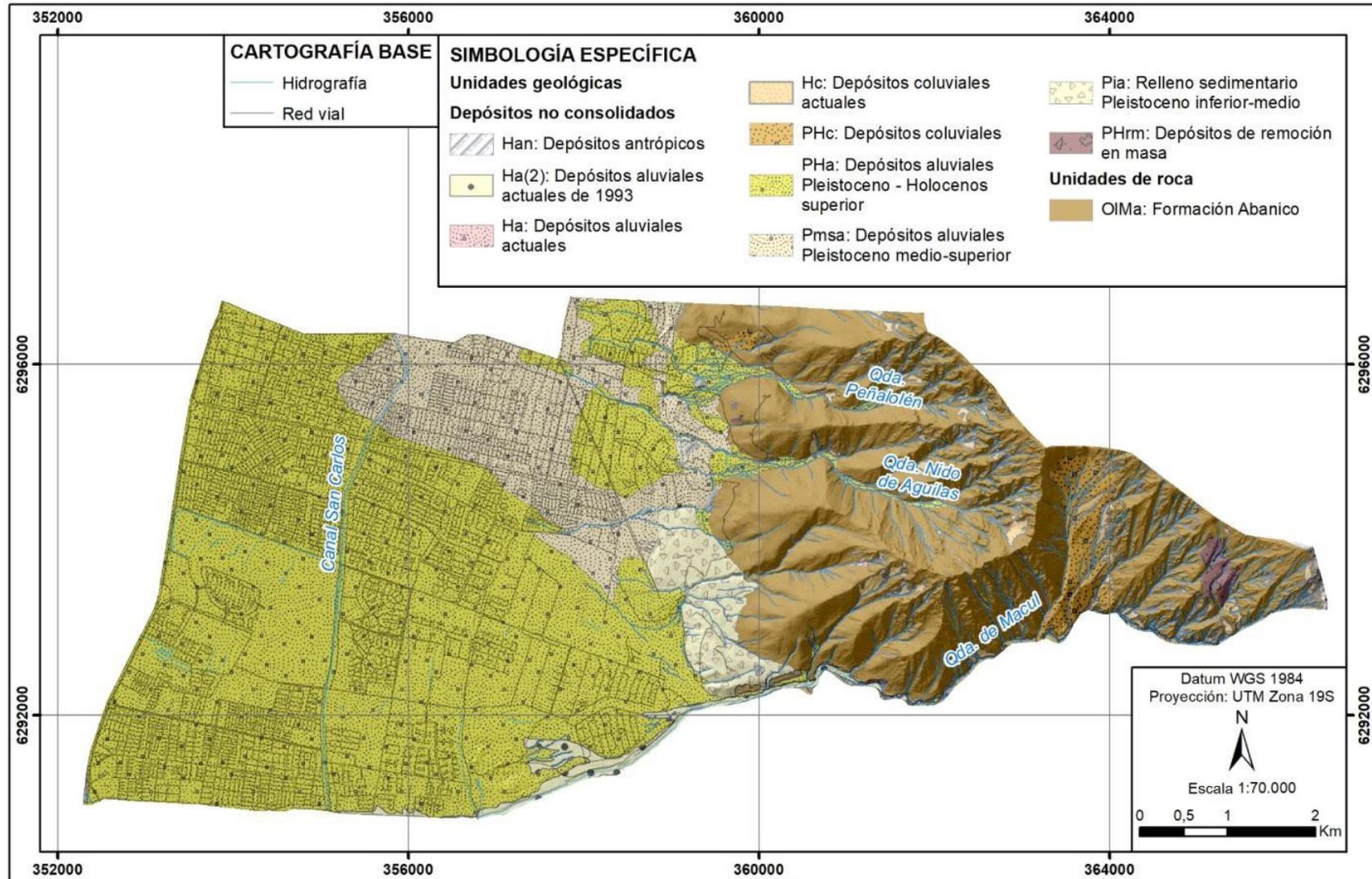
Corresponde a la única unidad de roca presente y aflora en la zona oriental de la comuna. Se constituye por una intercalación de rocas volcánicas y sedimentarias fracturadas y meteorizadas. Se distinguen tres tipos de roca principalmente, que se muestran de manera secuencial, siendo de oeste a este: tobas, andesitas y areniscas. A nivel general posee un rumbo aproximado N-S.

Las rocas más incompetentes corresponden a las lavas de grano fino (andesitas) e intercalaciones sedimentarias (lutitas y areniscas). Por otro lado, las rocas de grano grueso (lavas de grano grueso, brechas y tobas) son más competentes, presentando fracturas, pero con una distancia mayor entre ellas.

Dentro de la unidad existen zonas donde se puede observar la roca expuesta, sin embargo, la mayoría presenta un desarrollo de suelo residual de no más de 2m., de espesor. Este corresponde a un suelo arenoso fino, suelto y, con bajo porcentaje de material fino limoso (< 2%). Además, dado que se encuentra disectada por el sistema de drenaje actual, también está cubierta por depósitos aluviales (Ha) y en otras zonas por depósitos coluviales (PHc y Hc).



FIGURA N° 2-9: Mapa geológico levantado 1:1000.



Fuente: Elaboración propia.

2.4. CLIMA E HIDROLOGÍA

2.4.1. Delimitación y caracterización de cuencas

La zona de estudio corresponde al sistema hidrológico natural de la Comuna de Peñalolén, integrado, de acuerdo a la identificación del Plan Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS), por cuatro microcuencas, que corresponden a las quebradas de Peñalolén (O-14/O-15), Nido de Águila (O-13), Lo Hermida (O-12) y de Macul (O-11), donde los números entre paréntesis hacen referencia a los códigos utilizados en el PRMS.

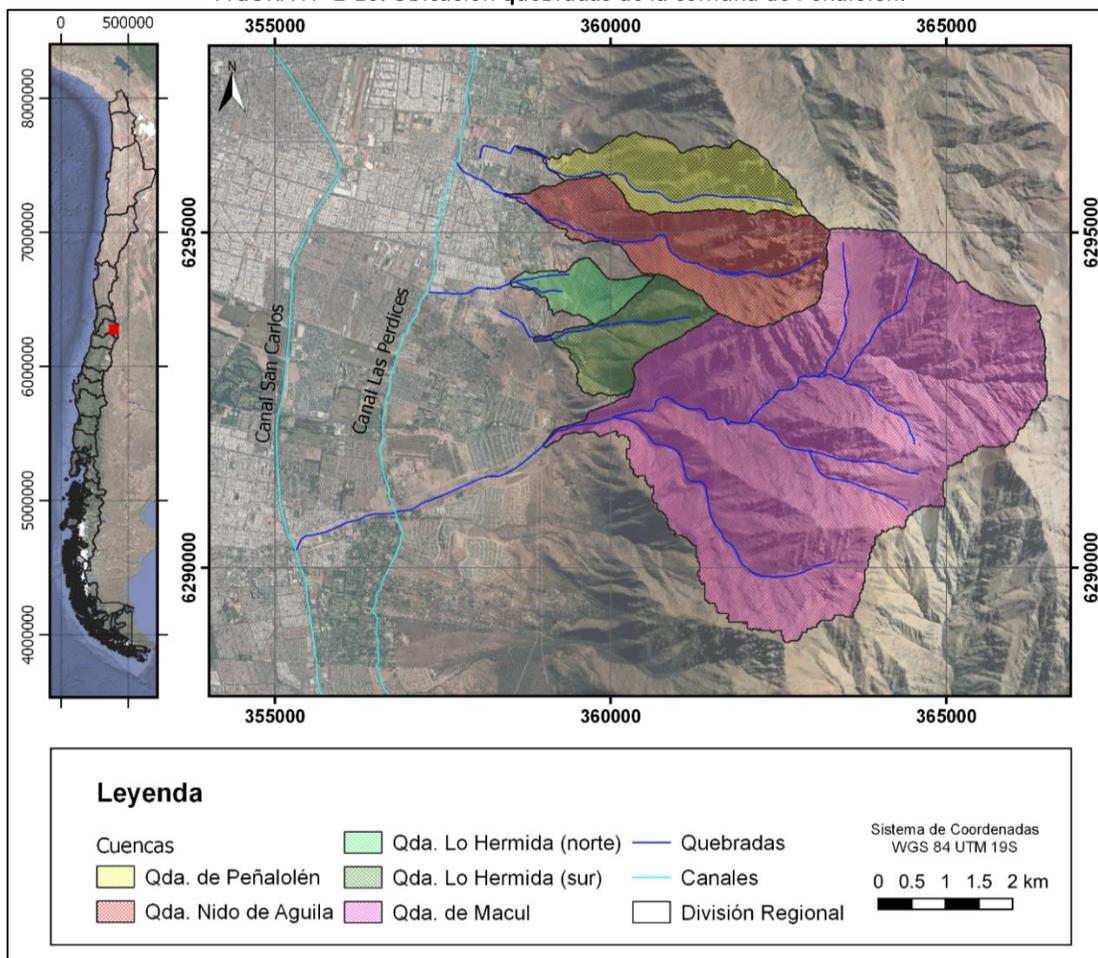
Para el presente estudio se ha optado adicionalmente por separar la quebrada Lo Hermida, considerando dos subcuencas, que han sido nombradas como Lo Hermida (norte) y Lo Hermida (sur). Esta división responde, por una parte, a la necesidad de contar con valores de caudal en ambos ramales, que fluyen inicialmente de forma independiente en la trama urbana, y en segundo lugar, a que antecedentes posteriores al PRMS, como el estudio: **“Diagnóstico de cauces sector Pie Andino, Región Metropolitana”** (Ayala, Cabrera y Asociados Ltda., 2008) señalan que el cauce del ramal sur (identificado en dicho estudio como quebrada Antupirén) desaparece cercano a la cota 800 m s.n.m., donde las aguas van a dar directamente a la calle, reconociendo que el cauce ha sido intervenido hasta hacer desaparecer su conexión original con el ramal norte de la quebrada Lo Hermida. De esta forma, se analizarán en el presente estudio cinco microcuencas, que corresponden a las quebradas de: Peñalolén, Nido de Águila, Lo Hermida (norte), Lo Hermida (sur) y de Macul. De éstas, sólo la Quebrada de Macul presenta un flujo constante, mientras las otras cuatro presentan escurrimientos estacionales, principalmente en invierno. La (FIGURA N° 2-10) muestra la ubicación de las quebradas pertenecientes al sistema hidrológico de la comuna de Peñalolén, con sus respectivas cuencas aportantes.

La quebrada de Macul descarga sus aguas hacia el Zanjón de la Aguada. Las otras cuatro, en cambio, tratándose de flujos intermitentes, y de acuerdo con las disposiciones viales vigentes, presentan su continuidad asociada a algunas arterias urbanas. La quebrada de Peñalolén tiene oficialmente asociada a Av. Talinay como solución de continuidad del drenaje, sin embargo, existe una canalización que conduciría sus aguas hacia Av. José Arrieta; a la quebrada Nido de Águila le corresponde la Av. José Arrieta (después de cruzar la calle Álvaro Casanova), sin embargo, existe una conducción y conexión parcial hacia el canal Las Perdices y a las quebradas de Lo Hermida. En la calle Antupirén, sin embargo, la quebrada de Lo Hermida (sur) parece haber sido intervenida y desaparece debido a la construcción de un complejo de departamentos sociales, sin que el cauce haya sido entubado o redirigido hacia algún punto de descarga.

Los parámetros morfométricos de las cuencas se presentan en el (CUADRO N°2-1), mientras que una caracterización detallada de las cuencas y fotografías se incluyen en el Anexo 8.3: Hidrología.



FIGURA N° 2-10: Ubicación quebradas de la comuna de Peñalolén.



Fuente: Elaboración propia.

CUADRO N° 2-1: Parámetros morfométricos de las cuencas estudiadas.

Parámetro	Cuencas				
	Peñalolén	Nido de Águilas	Lo Hermida (norte)	Lo Hermida (sur)	Macul
Área [km ²]	2,9	5,1	1,0	2,0	23,1
Altura Mínima [m s.n.m.]	1.510	1.573	1.029	1.241	2.058
Altura Máxima [m s.n.m.]	802	784	799	874	912
Altura Media [m s.n.m.]	2.455	2.576	1.422	1.875	3.249
Desnivel Máximo [m]	1.654	1.792	623	1.001	2.337
Pendiente [%]	58	59	34	53	58
Largo Cauce Principal [km]	4,5	4,6	1,8	2,4	7,1

Fuente: Elaboración propia.

2.4.2. Información hidrometeorológica

Se recopiló la información meteorológica de la red de estaciones de monitoreo de la Dirección General de Aguas (DGA) y de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). En el (CUADRO N° 2-2), se presenta la disponibilidad de información de las estaciones consideradas para este estudio. En el Capítulo 8: Anexos, Pto. 8.3.3., se presenta la ubicación de las estaciones, mientras que las series de datos consideradas para el análisis, que corresponden al periodo 1990 – 2020, se incluyen en el Pto., 8.3.4. Considerando que la extensión de los registros varía entre las estaciones, y buscando además representar las condiciones climáticas actuales, se optó por utilizar un periodo homogéneo de 30 años (1990 – 2020).

CUADRO N° 2-2 Estaciones pluviométricas área de estudio.

N° Mapa	Estación	Entidad	Cota [m s.n.m.]	Periodo de registro
1	Antupirén	DGA	904	1980-2020
2	Cerro Calán	DGA	848	1976-2020
3	Pirque	DGA	659	1967-2020
4	Tobalaba	DMC	650	1969-2020
5	Terraza Oficinas Centrales DGA	DGA	560	1960-2020
6	Quinta Normal	DMC	527	1950-2020
7	Fundo Marruecos	DGA	430	1989-2020

Fuente: Elaboración propia.

2.4.3. Caracterización hidrológica

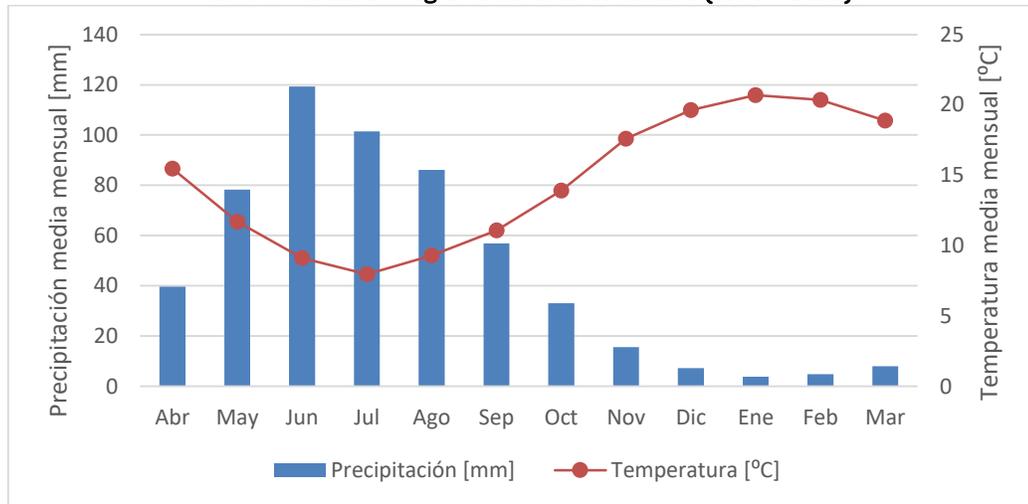
La caracterización hidrológica de las cuencas de estudio se ha desarrollado a partir de la media de sus resultados, definiendo valores promedio mensuales de las variables de precipitación y temperatura, lo que permite tener un primer reconocimiento del clima en la zona de estudio y, en segundo lugar, a nivel de precipitaciones y caudales máximos, lo que permitirá posteriormente realizar el análisis de susceptibilidad de inundación.

2.4.3.1. Clima

Para el análisis climático, se utilizó el producto grillado CR2METv2, conjunto de datos climáticos que cubren todo el territorio nacional con una resolución espacial de 0,05° (~5 km), empleados en la: **Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017)**. La última versión disponible (versión 2) abarca el período 1979-2020. Considerando los datos de precipitación y temperatura de los últimos 30 años, se ha construido un climograma, (Figura N°2-11), el cual muestra que las precipitaciones se producen fundamentalmente durante los meses de invierno, entre mayo y agosto, obteniéndose un total anual cercano a los 550mm. para el periodo 1990 – 2020. A nivel de temperaturas, estas oscilan entre los 8°C

como promedio mensual del mes de julio y un valor cercano a los 20°C como promedio mensual del mes de enero. La temperatura media anual para el periodo 1990-2020 fue de 14,6°C.

FIGURA N° 2-11: Climograma del área de estudio (1990 – 2020).



Fuente: Elaboración propia en base a producto CR2METv2.

2.4.3.2. Precipitaciones máximas

El análisis de frecuencia de las precipitaciones se ha realizado ajustando distintas distribuciones de frecuencia (Normal, Gumbel, Pearson, Log-Normal, Log-Pearson), y considerando distintos períodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50 y 100 años). La bondad del ajuste se ha determinado en base al test estadístico χ^2 y considerando además el mejor ajuste gráfico. En base a este análisis, se definieron las precipitaciones máximas en 24 hrs., para los periodos de retorno antes señalados, en las siete estaciones meteorológicas consideradas. El análisis y los resultados se incluyen en el Capítulo 8: Anexos, Pto. 8.3.4.

A partir de estos resultados, se construyeron gradientes de precipitación asociados a cada periodo de retorno, considerando la altitud de cada estación. Los gradientes definidos se incluyen en el Capítulo 8: Anexos, Pto. 8.3.4. Finalmente, y considerando la elevación media de cada cuenca, se obtuvieron los valores de precipitación máxima en 24 horas para periodos de retorno de 2 a 100 años (CUADRO N° 2-3).

CUADRO N° 2-3: Precipitación máxima en 24 hrs. para cada una de las cuencas.

Cuenca	Altitud media [m s.n.m.]	Precipitación máxima en 24 hrs. [mm]					
		T=2	T=5	T=10	T=20	T=50	T=100
Quebrada Peñalolén	1.510	66,9	87,5	102,3	117,4	138,3	158,3
Quebrada Nido de Águila	1.573	68,6	89,2	104,2	119,4	140,5	160,8
Quebrada Lo Hermida (norte)	1.029	54,3	74,3	88,3	102,3	121,3	139,1
Quebrada Lo Hermida (sur)	1.241	59,9	80,1	94,5	108,9	128,8	147,5
Quebrada Macul	2.058	81,4	102,5	118,3	134,6	157,7	180,1

Fuente: Elaboración propia

2.4.3.3. Definición de caudales de crecida

Para el cálculo de los caudales de crecida asociados a distintos periodos de retorno y como el sector a estudiar no cuenta con estaciones de control fluviométrico, se consideraron las metodologías establecidas en el “Manual de cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en cuencas sin información fluviométrica” (DGA-MOP, 1995) y aquellos señalados en el “Manual de Carreteras” (MOP, 2018), considerando las relaciones precipitación-escorrentía, según lo detallado en el (CUADRO N°2-4). Mayores antecedentes sobre estas metodologías se presentan en el Capítulo 8: Anexos, Pto. 8.3.5.

CUADRO N° 2-4: Metodologías para estimación de caudales de crecida.

Método	Fuente	Descripción
DGA-AC	DGA, 1995	El método DGA-AC para crecidas pluviales, corresponde a un análisis regional de crecidas de origen pluvial, basado en series de máximos anuales generadas a partir de información de caudales medios diarios máximos e instantáneos máximos del período pluvial, de 234 estaciones de control fluviométrico. Este método, que abarca estaciones desde la III a la IX Región, es válido para cuencas pluviales o pluvionivales sin información fluviométrica y con áreas comprendidas entre 20 y 10.000 [km ²]. Su uso está restringido a períodos de retorno inferiores a 100 años.
Verni-King Modificado	DGA, 1995	El método Verni-King relaciona el caudal instantáneo máximo de una crecida con la precipitación diaria máxima y el área pluvial a través de una relación de potencias, cuyos parámetros se definen según la región de análisis. Este método, que abarca estaciones desde la III a la IX Región, es válido para cuencas pluviales o pluvionivales sin información fluviométrica y con áreas comprendidas entre 20 y 10.000 [km ²]. Su uso está restringido a períodos de retorno inferiores a 100 años.
Fórmula Racional Modificada	DGA, 1995	La Fórmula Racional es una fórmula empírica que permite estimar el caudal máximo instantáneo en base al empleo de coeficientes de escorrentía. Este método, de acuerdo a las adecuaciones realizadas en este Manual, abarca estaciones desde la III a la IX Región, es válido para cuencas pluviales o pluvionivales sin información fluviométrica y con áreas comprendidas entre 20 y 10.000 [km ²]. Su uso está restringido a períodos de retorno inferiores a 100 años.



Hidrograma Unitario Sintético	DGA, 1995	El hidrograma unitario sintético es una metodología que permite estimar hidrogramas de crecida en cuencas sin control fluviométrico. Este método, que abarca estaciones desde la III a la IX Región, es válido para cuencas pluviales o pluvionivales sin información fluviométrica y con áreas comprendidas entre 10 y 4.500 [km ²].
Fórmula Racional	Dirección de Vialidad - MOP, 2017	La Fórmula Racional es una fórmula empírica que permite estimar el caudal el caudal máximo instantáneo en base al empleo de coeficientes de escorrentía. Supone que el escurrimiento máximo proveniente de una tormenta es proporcional a la lluvia caída. Este método es utilizable en cuencas pequeñas, menores a 25 [km ²].

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que todas las cuencas estudiadas tienen un área menor a 10km², exceptuando la Quebrada de Macul, solo fue posible aplicar la Fórmula Racional, de acuerdo con su formulación en el Manual de Carreteras. Considerando los parámetros y coeficientes ya definidos, presentados en el Capítulo 8: Anexos, Pto. 8.3.5., así como los valores de precipitación máxima en 24 horas, estimados para cada cuenca para un periodo de retorno de 10 años, se obtuvieron los caudales de crecida, cuyos resultados se presentan en el CUADRO N° 2-5.

CUADRO N° 2-5: Caudales de crecida determinados a partir del Método Racional.

Cuenca	Caudal de crecida [m ³ /s] Método Racional					
	T=2	T=5	T=10	T=20	T=50	T=100
Quebrada Peñalolén	4,95	7,25	9,22	11,64	13,77	15,58
Quebrada Nido de Águila	8,31	12,12	15,38	19,39	22,98	25,94
Quebrada Lo Hermida (norte)	1,81	2,78	3,60	4,58	5,34	6,17
Quebrada Lo Hermida (sur)	3,73	5,60	7,18	9,11	10,69	12,24
Quebrada Macul	30,33	44,91	57,28	72,43	85,42	97,09

Fuente: Elaboración propia.

2.4.4. Revisión de modelos hidráulicos existentes

Se revisaron los modelos hidráulicos desarrollados dentro de los estudios “Diagnóstico de cauces sector Pie Andino, Región Metropolitana” (Ayala, Cabrera y Asociados Ltda, 2008) y “Determinación de amenazas actuales por aluviones e inundaciones y su representación por medio de Mapas de Intensidades de Amenazas en la Quebrada Macul Región Metropolitana” (Geotest, 2018).

2.4.4.1. Diagnóstico de cauces sector Pie Andino, Región Metropolitana (Ayala, Cabrera y Asociados Ltda., 2008)

A continuación, se presenta un resumen de la caracterización de las quebradas y extractos de algunas figuras que muestran los puntos de desborde y áreas de inundación de cada quebrada. Se destaca que estos resultados de la modelación se incluyen en formato de figuras, y no se cuenta por tanto con las capas georreferenciadas.

Los resultados de la modelación corresponden al desarrollo de modelos HEC-RAS. La metodología consideró la evaluación de caudales sucesivamente crecientes hasta identificar el valor para el cual se origina rebase de una o ambas riveras. Además, se identificaron como puntos críticos todos aquellos dónde la revancha fuera inferior a 0,5 m. Para esto, se estimaron revanchas disponibles para los distintos periodos de retorno, valor que representa la diferencia entre la altura de la lámina de agua y el borde superior de las quebradas u obras. Definiendo una revancha mínima de 0,5 m., como un límite físico razonable para evitar posibilidad de desborde por efecto de ondas asociadas a la turbulencia del flujo.

a. Quebrada de Peñalolén

La quebrada, en el tramo en estudio, inicia su recorrido en la intersección con el límite urbano, prosiguiendo canalizada hacia aguas abajo hasta la calle Álvaro Casanova. Una vez efectuado el cruce con la calle Álvaro Casanova, continúa por el borde poniente de la calle hacia el sur, mediante un canal en tierra hasta Av. José Arrieta, donde descarga las aguas sin ningún tipo de obra. La pendiente media de la quebrada completa es de 14,5%.

La zona alta de la quebrada se caracteriza por tener un cauce natural bien formado, en cuyo lecho se encuentran rocas y raíces. En este tramo se presentan pocas obras. La pendiente media de esta zona es de 15%. La zona media posee pocas obras, pero el cauce se presenta canalizado hasta la intersección con calle Álvaro Casanova. El sector bajo es netamente urbano, donde las obras corresponden a descargas, puentes y muros que ponen límite al escurrimiento. La descarga es directa a la calle y la pendiente media de esta zona es de 10%.

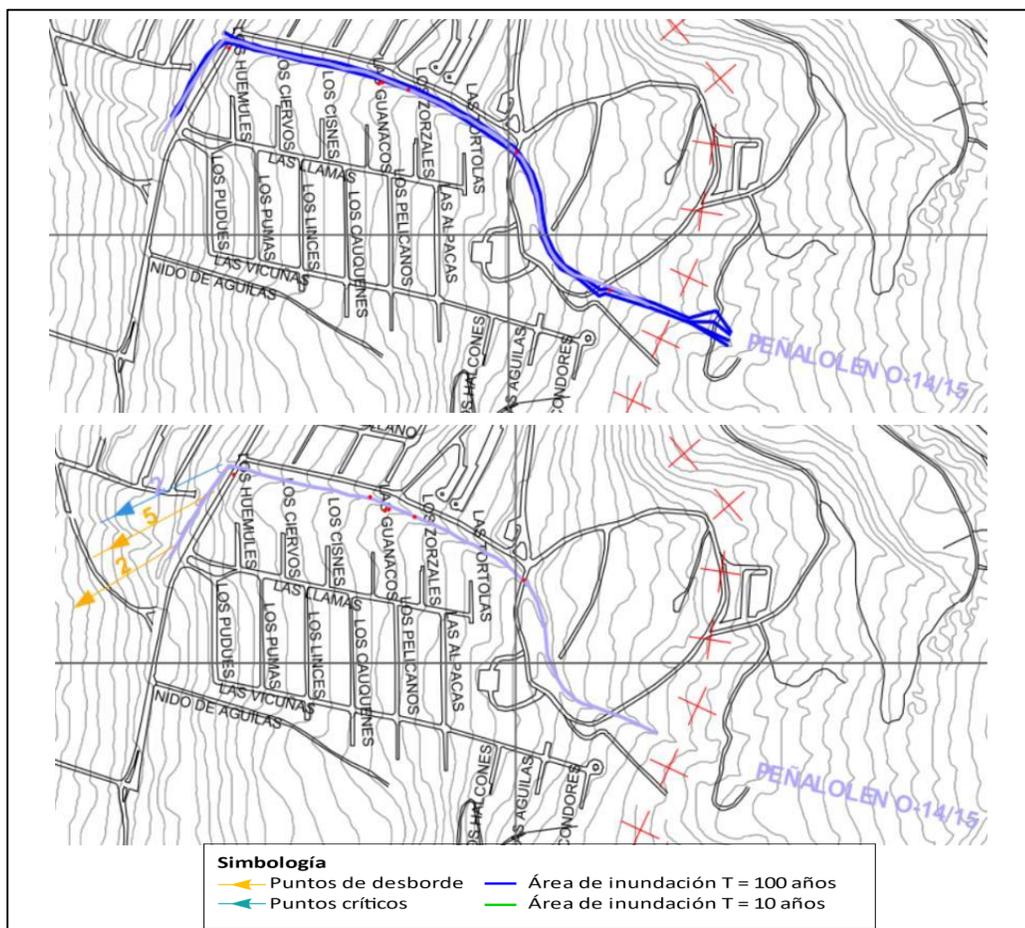
La superficie de la cuenca es de 3,54 km². Su cauce principal alcanza una longitud de 3,7 km., de los cuales 0,78 km. se encuentran bajo el límite de expansión urbana de la comuna de Peñalolén, es decir, bajo los 900 m s.n.m. La cota de cabecera de la cuenca es de 2.552 m s.n.m., su cota de descarga, en la calle Álvaro Casanova, es de 708 m s.n.m. y su cota media es de 1.350 m s.n.m.

La cobertura vegetal natural de la cuenca consta de una formación mixta de arbustos y árboles de distintas especies, los que cumplen una función de protección de las laderas frente a la acción erosiva del escurrimiento superficial, el cual se intensifica en los períodos de crecida.



Para el modelo hidráulico de esta quebrada se utilizan 39 perfiles transversales, los cuales permiten caracterizar una longitud de cauce de 1.058 m. La capacidad hidráulica de esta quebrada, en el tramo de aguas arriba del cruce con la calle Álvaro Casanova, es al menos equivalente a la crecida de 100 años de período de retorno. En dicho tramo presenta revanchas de entre 0,6m., como mínimo y de 12m., como máximo. El tramo de aguas abajo del cruce con la calle señalada presenta una capacidad de conducción equivalente a la crecida de 2 años de período de retorno (3,2 m³/s), siendo el punto de menor capacidad hidráulica aquel ubicado inmediatamente aguas abajo de la obra de cruce, en una extensión de alrededor de 20m. Los siguientes 40m., de la canalización en tierra presentan revanchas de menos de 0,5m., para crecidas iguales o mayores que la correspondiente a 50 años de período de retorno (FIGURA N° 2-12).

FIGURA N° 2-12: Área de inundación y puntos de desborde en la Quebrada de Peñalolén.



Fuente: Modificado de Ayala Cabrera y Asociados (2008).

b. Quebrada Nido de Águila

La zona estudiada inicia su recorrido a unos 1.000m., aguas arriba del cruce con la calle Álvaro Casanova, lugar donde finaliza un tramo canalizado que descarga las aguas directamente sobre la calle Las Vertientes. En esta última vía se canalizan las aguas mediante un canal lateral, prosiguiendo luego por su cauce natural ubicado al norte de esta última calle. Las aguas son descargadas finalmente en Diagonal Las Torres.

En su zona alta, la quebrada conserva características naturales, con presencia de árboles de gran tamaño y zonas concentradas de arbustos. Se verifica la existencia de algunas obras sobre la cota 850 m s.n.m. En la zona media, la pendiente es del 17%. Se destaca un conjunto de piscinas decantadoras o disipadores de energía, que descargan directamente a la calle Álvaro Casanova con las Vertientes, punto en el cual se angosta el cauce. Esta situación provoca que mucha del agua de la quebrada termine bajando por la calle Las Vertientes.

La zona baja se caracteriza por múltiples canalizaciones, pasando de fondo natural a revestimientos de mampostería y hormigón. En la zona más cercana a Álvaro Casanova, la canalización revestida en mampostería se encuentra socavada, provocando que queden al aire pasos de alcantarillas y agua potable, que además pone en riesgo a la misma canalización. Aguas abajo de la zona recién descrita, la canalización se encuentra muy intervenida con obras menores que cruzan la quebrada, como rejas y murallas, entre otras, que tienen como finalidad proteger a los loteos del lugar de posibles robos. Esta zona de canalización presenta una pendiente media de 9%.

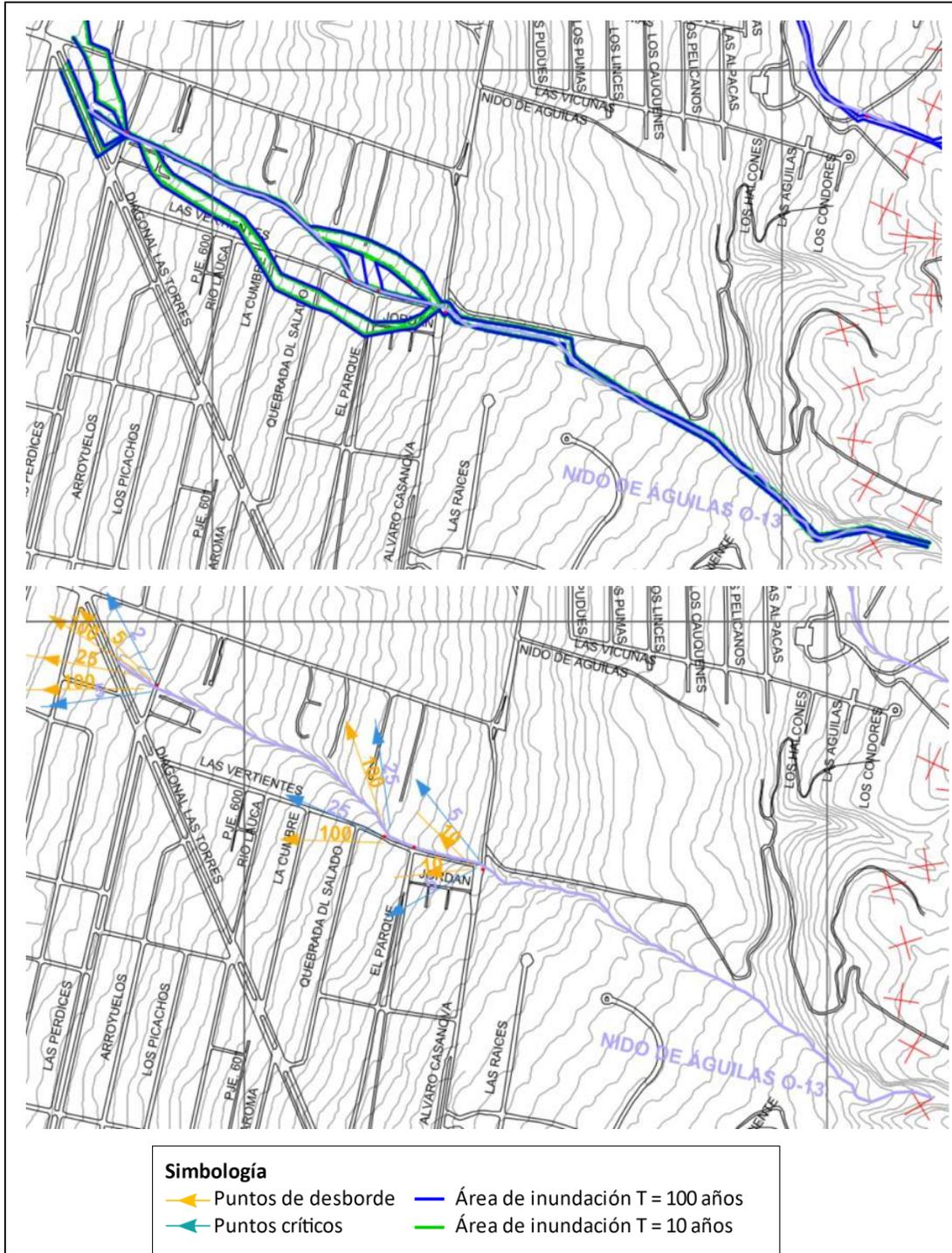
La cuenca de la quebrada Nido de Águilas presenta una superficie de 5,69 km². Su cota de cabecera es de 2.552 m s.n.m. y su cota media es de 1.250 m s.n.m. En su punto de descarga, en la Avenida Diagonal Las Torres, la cota es de 705 m s.n.m. La longitud del cauce principal de la cuenca es de 5,8 km de los cuales 1,71 km se encuentran bajo la cota de los 900 m s.n.m., límite de expansión urbana en la comuna de Peñalolén.

La vegetación natural de la quebrada consiste en una formación arbustiva de baja densidad y concentración, siendo el espino la especie predominante. De este modo, las laderas de la cuenca no cuentan, en términos generales, con una adecuada protección frente a la erosión producida por el escurrimiento superficial.

El modelo hidráulico de esta quebrada considera perfiles transversales, los cuales permiten caracterizar una longitud de cauce de 1.790m., aguas arriba del cruce con la calle Álvaro Casanova, la quebrada presenta una capacidad hidráulica de al menos 100 años de período de retorno, con revanchas mínimas de 0,7m., para la crecida de 100 años de período de retorno. Aguas abajo de dicho cruce, la capacidad hidráulica se encuentra limitada a un caudal equivalente a la crecida de 2 años de período de retorno (1,5 m³/s), siendo los tramos restrictivos aquellos ubicadas inmediatamente aguas abajo del cruce con Álvaro Casanova y en la llegada a la calle Las Perdices. En toda la zona entre las calles señaladas, se ubican secciones transversales con revanchas de menos de 0,5m., para la crecida de 2 y 5 años de período de retorno, evidenciando la limitada capacidad de conducción que presenta la quebrada en el tramo (FIGURA N°2-13).



FIGURA Nº 2-13: Área de inundación y puntos de desborde en la Quebrada Nido de Águilas.



Fuente: Modificado de Ayala Cabrera y Asociados (2008).

c. Quebrada Lo Hermida (norte)

Esta quebrada presenta dos brazos, los cuales se unen en las inmediaciones del cruce con la Avenida Diagonal Las Torres, prosiguiendo aguas abajo a través de un cauce único cuyo punto de descarga es una conexión hacia el Canal Las Perdices.

En la zona alta, antes de calle Diagonal Las Torres, la quebrada no presenta intervenciones, a excepción de un muro instalado en el brazo ubicado hacia el norte. La sección principal del flujo está cubierta por matorral espinoso y árboles, mientras que, en las laderas, el terreno se encuentra seco, sin vegetación y expuesto a la erosión.

El brazo ubicado más hacia al norte se inicia en una vertiente de caudal permanente ubicada en un predio particular de baja pendiente, que luego tuerce al este y termina en la propiedad del club de golf Old Grangonian. Otra característica importante de este ramal es que tiene un muro que se utiliza como paso peatonal, que interrumpe y cambia las condiciones de escurrimiento. La pendiente media de este ramal es de 15%.

El brazo ubicado hacia el sur, por su parte, posee una menor presencia de vegetación, se interna en propiedad de la Universidad Adolfo Ibáñez y su pendiente media es de 18%. En la zona media, existen varias intervenciones, aunque de baja magnitud, pero mayores que en la zona alta. Esta sección es más encajonada y también más desprovista de vegetación. Su pendiente media es de 9%. En la zona baja, en cambio, el nivel de intervención es mayor, sobre todo por la canalización artificial de todo el cauce hasta su descarga en el canal Las Perdices. En la entrada a la zona urbana, el cauce posee una pendiente media cercana al 7%.

La cuenca presenta una superficie de 4,06 km². Su cauce principal tiene una longitud de 3,2 km, de los cuales 1,78 km se encuentran bajo la cota de los 900 m s.n.m. La cota de cabecera de la cuenca es de 1.150 m s.n.m., su cota de descarga en el canal Las Perdices es de 701 m s.n.m. y su cota media es de 963 m s.n.m.

El modelo hidráulico consideró 69 perfiles transversales, de los cuales 40 corresponden al brazo único ubicado aguas abajo de la Avenida Latorre, 14 al brazo norte de la quebrada y 15 al brazo sur de la misma. El brazo norte presenta una longitud de 650 m, el brazo sur 700 m, y el cauce único 1.230 m.

La capacidad hidráulica de la quebrada en los brazos norte y sur es igual o mayor que la crecida asociada a un período de retorno de 100 años (quebrada norte: 2,6 m³/s; quebrada sur: 3,4 m³/s). Para el tramo de cauce único, aguas abajo del cruce con la Avenida Diagonal Las Torres, la capacidad hidráulica de esta quebrada se encuentra limitada a caudales de a lo más 2 años de período de retorno (1,6 m³/s), presentando desbordes localizados en los últimos 200 m antes de su descarga final. Antes del ingreso a la zona habitada presenta un tramo con revanchas de menos de 0,25 m para las crecidas iguales o superiores a 2 años de período de retorno (FIGURA N° 2-14).



FIGURA N° 2-14: Área de inundación y puntos de desborde en la Quebrada Lo Hermida.



Fuente: Modificado de Ayala Cabrera y Asociados (2008).

d. Quebrada Lo Hermida (sur)

El estudio de AC (2008) identifica esta quebrada con el nombre de Antupirén, que corresponde según la nomenclatura utilizada en este estudio a la microcuenca Lo Hermida (sur). El inicio del recorrido de la quebrada se desarrolla al interior del campus de la Universidad Adolfo Ibáñez. En este tramo, el lecho de la quebrada no ha sido intervenido de manera importante, a diferencia de su entorno, el cual consta actualmente de dos calles pavimentadas que sirven de ingreso y salida al campus.

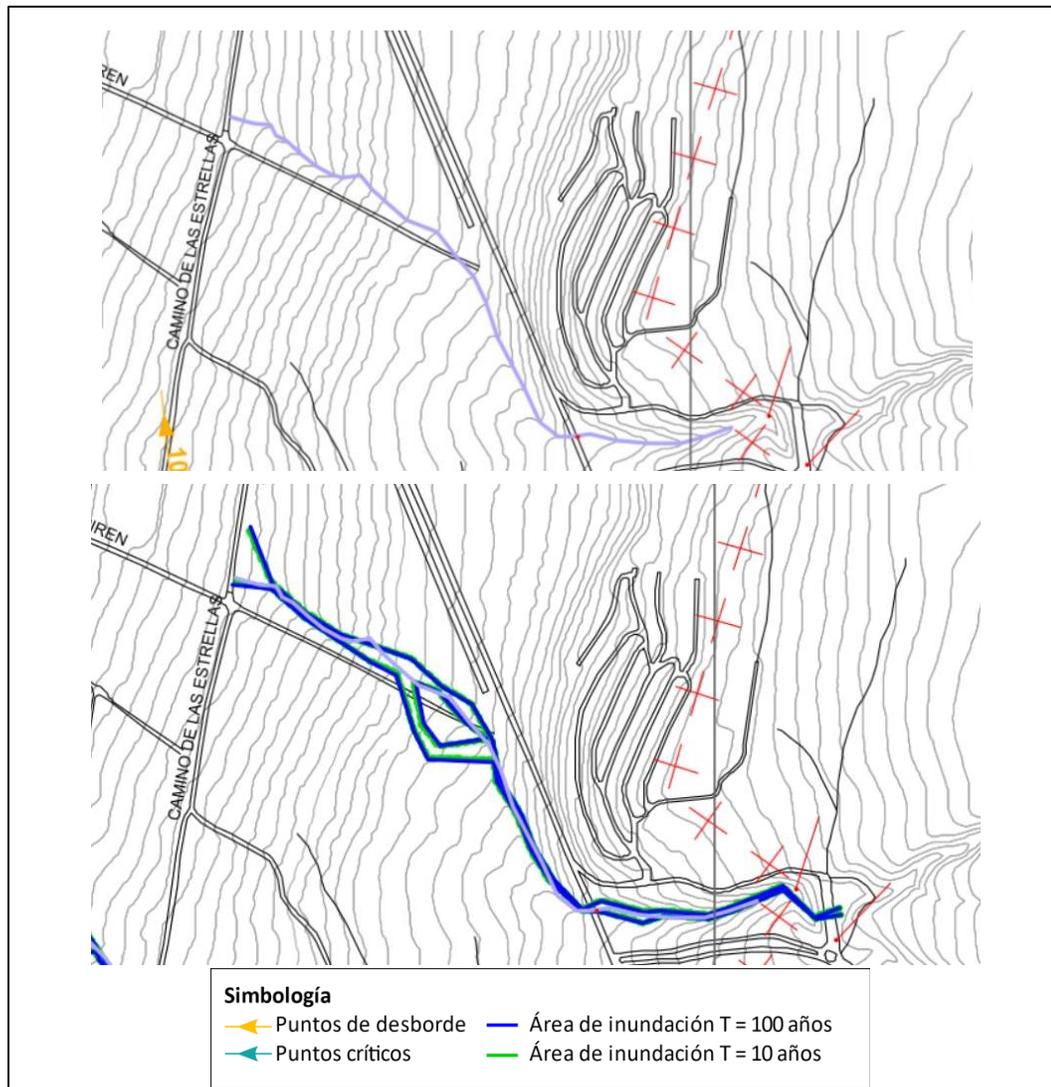
Aguas abajo, saliendo del predio universitario, la quebrada atraviesa la avenida Diagonal Las Torres. Inmediatamente después de este cruce, se hace evidente la intervención del lecho de la quebrada, representada por una serie de rellenos de materiales que en algunos puntos han borrado el cauce natural.

Finalmente, en la cota 800 m.s.n.m. aproximadamente, la quebrada desaparece debido a la construcción de un complejo de departamentos sociales, sin que el cauce haya sido entubado o redirigido hacia algún punto de descarga. De esta forma, las aguas de la quebrada van a dar de forma directa a una calle del lugar. Se reconoce que su cauce ha sido intervenido hasta hacer desaparecer su conexión original con la quebrada Lo Hermida.

El modelo hidráulico se inicia a alrededor de 250 m aguas arriba de su cruce con la Avenida Diagonal Las Torres, hasta el cruce con la calle Álvaro Casanova, donde descargan directamente las aguas. El cauce se encuentra representado por un conjunto de 22 perfiles transversales y una longitud de 1.064 m.

La capacidad hidráulica de esta quebrada se encuentra limitada a un caudal de dos años de período de retorno. La zona restrictiva se ubica inmediatamente aguas arriba de la curva que hace girar la quebrada, desde un tramo paralelo a la Avenida Diagonal Las Torres, hacia un rumbo con dirección poniente. En el sector de desbordes se presentan además tramos con revanchas de menos de 0,5 m para crecidas de dos años de período de retorno, lo cual la hace susceptible de desbordes al no tener la seguridad adecuada para evitar ser sobrepasadas las riberas por las turbulencias propias del escurrimiento durante crecidas (FIGURA N° 2-15).

FIGURA N° 2-15: Área de inundación y puntos de desborde en la Quebrada Lo Hermida (sur).



Fuente: Modificado de Ayala Cabrera y Asociados (2008).

e. Quebrada La Gringa

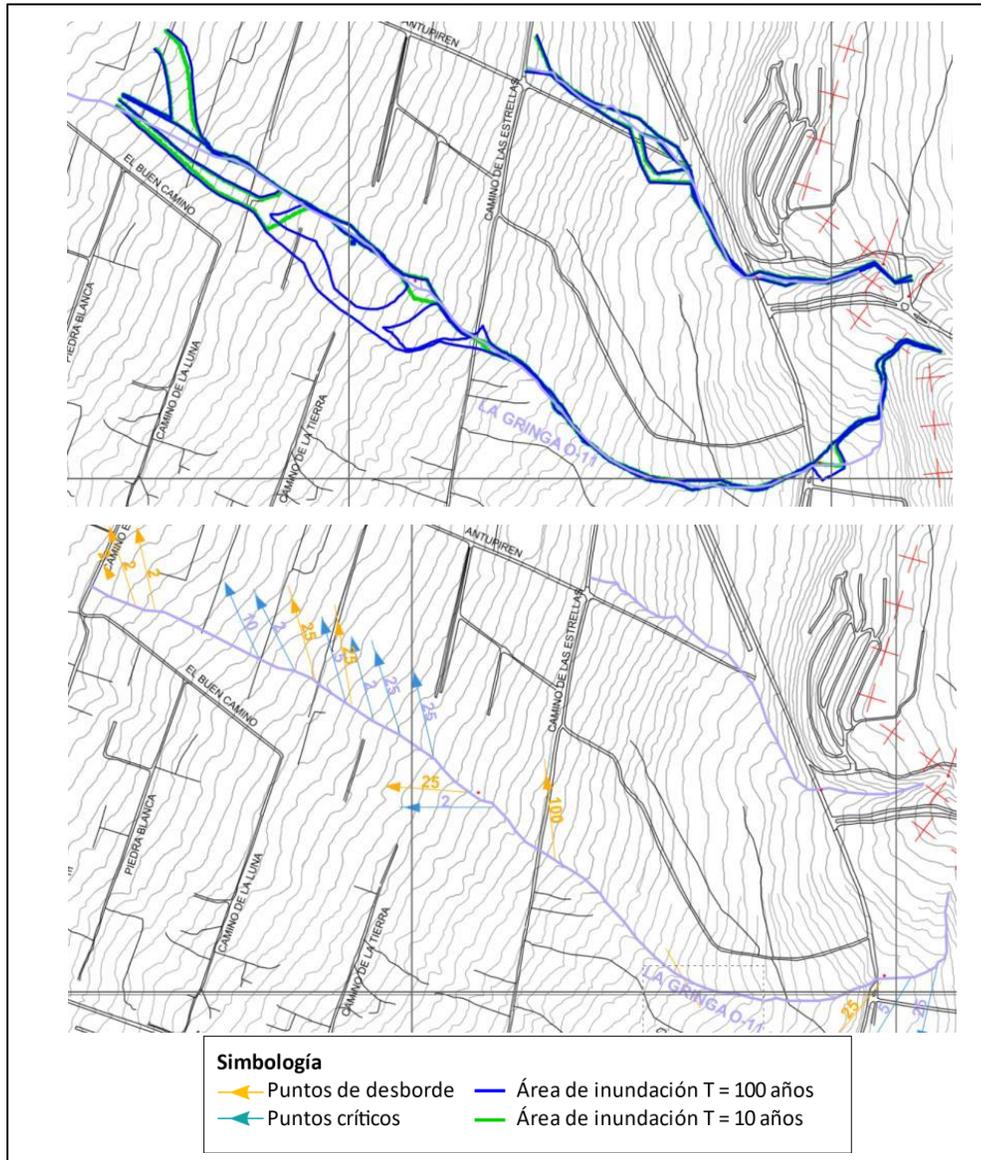
Si bien esta quebrada no está identificada dentro del PRMS, forma parte de las estudiadas por AC (2008). El drenaje de la cuenca está definido por la presencia de dos brazos principales, los que presentan un lecho de tipo lineal, con cambios de dirección determinados por la influencia del relieve. Estos brazos confluyen a unos 900 metros aguas arriba del punto de descarga de la cuenca. La pendiente de la cuenca es del orden del 11 %. La cuenca presenta a lo largo de toda su extensión una forma de U, con laderas bien definidas en el sector de cabecera. Aguas abajo, las laderas de la cuenca disminuyen en altura y en el tramo final de la cuenca, estas se vuelven difusas.

La vegetación de la cuenca consta de una formación arbustiva de baja concentración y densidad. El espino es la especie predominante, aunque también se pueden apreciar extensos tramos cubiertos por zarzamoras.

El modelo hidráulico considera 51 perfiles transversales, los cuales permiten caracterizar una longitud de cauce de 2.330 m de quebrada, ubicado entre el ingreso a la zona urbana en la cota 900 msnm y su término en el cruce con el Camino El Sol.

La capacidad hidráulica de esta quebrada se encuentra restringida a la crecida de 2 años de período de retorno, presentándose desbordes en el tramo de aguas abajo del cruce con la calle Álvaro Casanova, así como además múltiples sectores con revanchas de menos de 0,35 m a partir de la crecida señalada. Aguas arriba del cruce con la prolongación del eje de la Avenida Diagonal Las Torres hacia el sur, la capacidad del cauce también es limitada, pero soporta crecidas de hasta 25 años de período de retorno sin desbordar (FIGURA N°2-16).

FIGURA N° 2-16: Área de inundación y puntos de desborde en la Quebrada La Gringa.



Fuente: Modificado de Ayala Cabrera y Asociados (2008).

2.4.4.2. Determinación de amenazas actuales por aluviones e inundaciones y su representación por medio de Mapas de Intensidades de Amenazas en la Quebrada Macul Región Metropolitana (Geotest, 2018)

En la metodología aplicada para evaluar el proceso de inundación, se utiliza en primera instancia un modelo HEC-RAS 1D para una crecida de periodo de retorno de 10 años, considerando que la quebrada de Macul es propensa a generar aluviones para crecidas de períodos de retorno de 30 y 100 años, las cuales son analizadas a través de un modelo RAMS. Adicionalmente, se construyó un modelo 2D utilizando el programa HYDRO_AS-2D, ya que la simulación en 2 dimensiones proporciona información sobre:

- Límites de la inundación
- Profundidad de la inundación
- Velocidad del flujo
- Efectos de retención y de medidas de protección
- Fluido de la resistencia de sedimentos
- Efectos de las obras de protección sobre la inundación misma

A partir de las modelaciones de la situación actual se concluye que, en eventos de PR10 no se generan aluviones ni desbordes. Para los eventos de PR 30, por otra parte, se aprecian desbordes principalmente a la derecha orográfica y se rellenan las pozas decantadoras. Para los eventos de PR 100 se observan los mismos puntos de desbordes, pero con mayores alcances y espesores del flujo. Los mapas de intensidades de amenaza muestran una afectación lateral de la zona urbana que aumenta junto con el período de retorno. Según la evaluación mediante PROTECT, las medidas presentan una fiabilidad entre limitada y baja.

2.4.4.3. Conclusiones preliminares

A partir de los valores actualizados obtenidos desde el estudio hidrológico y al mismo tiempo considerando las posibles modificaciones realizadas en las quebradas desde el 2008 a la fecha, se realizará una modelación actualizada de las quebradas de Peñalolén, Nido de Águila y Lo Hermida (norte y sur), de acuerdo con los antecedentes topográficos disponibles. En el caso de la quebrada de Macul, se revisará con mayor detalle lo realizado en el estudio de Geotest (2018), así como las posibles modificaciones o nuevas obras. Esto ya que de acuerdo con lo indicado por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), una vez obtenidos los resultados de dicho estudio, se iniciaron de inmediato (2019) las obras necesarias tendientes a mitigar el riesgo aluvional y de inundaciones que amenazan al sector norte de la quebrada de Macul, con la finalidad de atender las zonas identificadas en el estudio de Geotest como vulnerables, y que se proyectaron hasta el año 2021. Asimismo, como parte del proyecto denominado: **“Construcción Obras de Retención En Hondonada Quebrada de Macul”**, se continúan realizando una serie de obras de mejoramiento de las pozas y la construcción del sector denominado la Hondonada, que se han diseñado para retener un evento aluvional de 100 años de período de retorno.

3. INUNDACIONES TERRESTRES

Este peligro se denomina inundaciones terrestres, en el sentido de que estas ocurren “tierra adentro”, es decir, las aguas dulces anegan territorios al interior de los continentes. Dentro de las inundaciones terrestres estudiadas, se encuentran:

- **Inundaciones por desborde de cauces:** Este fenómeno ocurre cuando el agua conducida a través de ríos, esteros o quebradas desbordan su cauce natural, anegando zonas adyacentes.
- **Inundaciones por anegamiento:** Este tipo de inundaciones corresponden a la acumulación de agua en superficie en zonas topográficamente deprimidas, de baja permeabilidad, con niveles freáticos someros y deficiente drenaje del terreno. Generalmente ocurren debido a lluvias intensas y/o prolongadas.

3.1. CATASTRO

En el (CUADRO 3-1), se presenta un catastro construido a partir de los antecedentes revisados durante el desarrollo de este trabajo para inundaciones que han afectado el área de estudio. Cabe mencionar que, en los archivos de prensa, sobre todo en los más antiguos, se utiliza un lenguaje impreciso, que no permite diferenciar los eventos de inundación por desborde de cauces con anegamientos, e incluso con flujos de barro y/o detritos. Por lo tanto, los eventos catastrados deben ser interpretados considerando dicha imprecisión.

Se destacan entre los eventos de inundación los años 1926, 1986 y 1997 que coinciden con años del Fenómeno del Niño, lo que se relaciona, a su vez, con años más lluviosos. En estas ocasiones los desbordes de algunos canales del sector, como el Canal San Carlos y el Zanjón de la Aguada, junto con la activación de quebradas, como la quebrada de Macul, provocaron daños a la infraestructura y pérdida de vidas humanas.



CUADRO Nº 3-1: Catastro de inundaciones en el área de estudio.

Código	Fecha		Factor desencadenante	Tipo	Área	Comuna	Descripción del evento	Referencia
	Año	Detalle						
DC01	1912	9 de junio	Temporal	Desborde de cauce	Canal San Carlos	La Reina y Peñalolén	El canal San Carlos se desbordó en la Chacra Tobalaba, en la Chacra Las Arañas y en el camino público próximo a Peñalolén.	(Urrutia & Lanza, 1993)
DC02	1915	16 y 17 de junio	Temporal	Desborde de cauce	Canal San Carlos	La Reina, Peñalolén y Ñuñoa	El canal San Carlos se desbordó a la altura de los fundos Lo Tocornal y Lo Valdivieso anegando las casas de los inquilinos y la calle Irarrázaval.	(Urrutia & Lanza, 1993)
DC03	1926	1 julio	Lluvias (El Niño)	Desborde de cauce	Canales del sector oriente de Santiago	Ñuñoa, Peñalolén	“La lluvia fue torrencial desde las 1 am de ayer hasta la tarde. El agua caída a la fecha fue de 497,6 mm y el agua caída en 24 horas fue de 46,9 mm. En algunos barrios de Santiago ocurrieron numerosas desgracias. Ñuñoa vuelve a ser inundadas por los canales que la atraviesan por el lado oriente. El agua proveniente del desbordamiento de algunos canales corría por algunas partes de la Av. Irarrázaval.”	El Diario Ilustrado (1 de julio de 1926)
DC04	1941	8 y 15 de agosto	Temporal	Desborde de cauce	Canal San Carlos	Ñuñoa, Macul, Peñalolén y La Florida	Se desbordó el río Mapocho, el Zanjón de la Aguada y el Canal San Carlos. Ñuñoa, Macul, San Miguel, Renca y La Florida sufrieron inundaciones.	(Urrutia & Lanza, 1993)
DC05	1944	6 y 9 de agosto	Temporal	Desborde de cauce	Canal San Carlos	Ñuñoa y Peñalolén	Se desbordaron los canales San Carlos y el Zanjón de la Aguada. En Avenida Irarrázaval hubo inundaciones por sobre los 40 cm de la acera.	(Urrutia & Lanza, 1993)
DC06	1971	24 de mayo	Lluvia	Desborde de cauce	Sectores altos de la comuna de Peñalolén	Peñalolén	Inundación por desborde del Canal Las Perdices; daños y anegamiento de casas.	www.desinventar.org ; El Mercurio
DC07	1986	15-17 junio	Lluvias (El Niño)	Desborde de cauce	Canal San Carlos, Zanjón de la Aguada y quebrada de Macul	Peñalolén	Desborde de los ríos Maipo y Mapocho, del canal San Carlos y el Zanjón de la Aguada, además de las quebradas San Ramón y Macul; 18 comunas de Santiago declaradas zonas de catástrofe a causa de las inundaciones.	(SERNAGEOMIN, 2017)
DC08	1987	14 de julio	Lluvia	Desborde de cauce	Canal las Perdices	Comuna de Peñalolén	Desborde de Canal Las Perdices, inundando la población Las Perdices y la Higuera.	www.desinventar.org ; El Mercurio

MODIFICACIÓN AL PLAN REGULADOR COMUNAL
ESTUDIO DE RIESGOS Y PROTECCIÓN AMBIENTAL-PARTE I

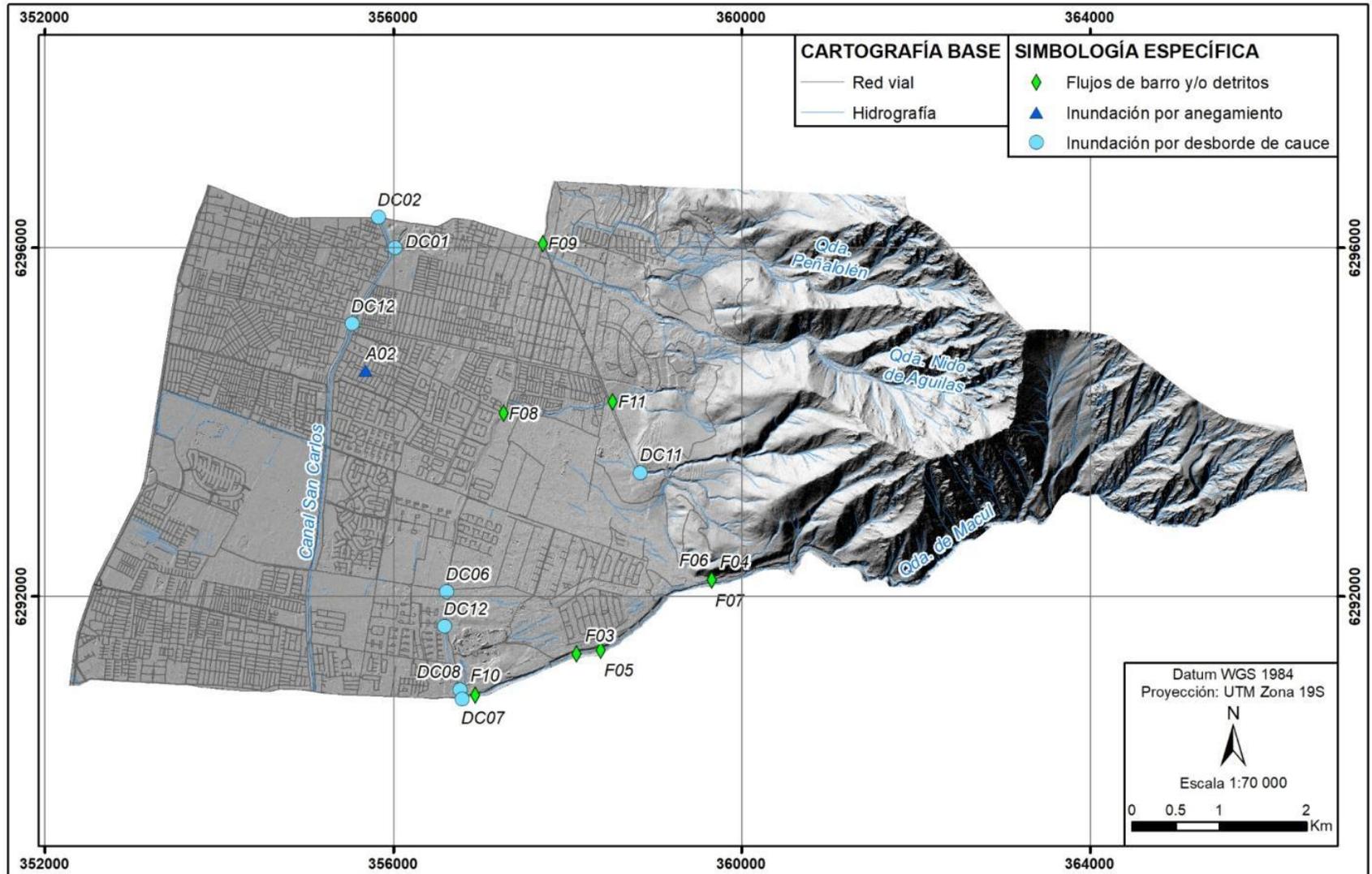


DC09	1989	23 de agosto	Lluvia	Desborde de cauce	Canal San Carlos	Comuna de Peñalolén	Desborde del Canal San Carlos.	www.desinventar.org ; El Mercurio
DC10	1997	20 de junio	Temporal (El Niño)	Desborde de cauce	Canal Las Perdices	Comuna de Peñalolén	Desborde de Canal Las Perdices. 8.550 familias inundadas.	www.desinventar.org ; El Mercurio
DC11	2002	3, 4 y 5 de junio	Temporal	Desborde de cauce	Sector de Quebrada Nido de Águilas con calle Álvaro Casanova, Quebrada Antupirén o Peñalolén con Diagonal Las Torres	Comuna de Peñalolén y La Reina	El agua de la Quebrada atravesaba la calle Álvaro Casanova, había una acumulación de sedimentos, arenas, gravas y bolones antes de que el agua cruzara la calle (producto del transporte de material desde las partes más altas de la cuenca y el desmoronamiento de la pared sur del mismo antes de atravesar la calle). El flujo de agua por encima de la calle era de aprox. 3m de ancho, 20 cm de alto, este flujo acarrea material solido que no pudo ser contenido por las obras aguas arriba. En la Quebrada de Peñalolén no hubo grandes problemas a excepción del agua que escurrió superficialmente por la calle Las Torres con una altura del agua de 0,2 m.	(MOP, 2002)
DC12	2004	12 de noviembre	Lluvia	Desborde de cauce	Canal Las Perdices y San Carlos	La Reina, Peñalolén y La Florida	Se produjo el desborde del canal Las Perdices en sectores no entubados de La Reina, Peñalolén y La Florida; además del flujo de caudales del canal San Carlos a tope en todo su recorrido.	(SEREMI MINVU RM, 2014)
DC13	2005	27 de agosto	Lluvia	Desborde de cauce	Canal Las Perdices y San Carlos	La Reina, Peñalolén y La Florida	Según el registro periodístico, las crecidas provocadas por el ingreso del frente de precipitaciones del 27 de agosto de 2005, produjo el desborde del canal Las Perdices en sectores no entubados de La Reina, Peñalolén y La Florida; además del flujo de caudales del canal San Carlos a tope en todo su recorrido.	(SEREMI MINVU RM, 2014)
A01	1990	17 de julio	Lluvia	Anegamiento	Comuna de Peñalolén	Comuna de Peñalolén	Calles anegadas y 6 familias damnificadas por problemas en el techo por lluvias y nieve.	www.desinventar.org ; El Mercurio
A02	1997	30 de julio	Temporal (El Niño)	Anegamiento	Parque Tobalaba	Comuna de Peñalolén	Inundación en Parque Tobalaba	www.desinventar.org ; El Mercurio

Fuente: Elaboración propia.



FIGURA N° 3-1: Catastro de inundaciones y remociones en el área de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

3.2. DIAGNÓSTICO

Los antecedentes históricos contenidos en el catastro levantado, las características geológicas y geomorfológicas del área de estudio (Capítulos 2.2 y 2.3) y la hidrología (2.4) son indicadores de que los canales y quebradas del área corresponden a zonas inundables o potencialmente inundables por eventos de desbordes de cauces, con distinta frecuencia y magnitud y que dependiendo del material disponible e intensidad, éstas pueden pasar rápidamente a ser flujos de barro y/o detrito, lo que hace estos peligros ocurran uno después del otro en la zona precordillerana. Las principales diferencias radican en aspectos como: tipo de escorrentía del cauce (permanente o intermitente), evidencias de eventos ocurridos en el periodo catastrado, presencia de terrazas aledañas y el tipo de depósito que rellena el cauce.

En consideración de lo anterior, las quebradas mayores como la quebrada de Macul y Nido de Águilas, que han sufrido eventos de inundaciones por desbordes de cauces o flujos, se estima que continúen siendo afectadas por estos fenómenos, inundando zonas aledañas. Por ello, el sector urbanizado de la quebrada de Macul es una de las zonas más expuestas a esta amenaza. Sin embargo, con posterioridad a dichos eventos, se han construido obras de mitigación, como muros, tuberías, canalizaciones, piscinas decantadoras, descargas, etc. Otras quebradas, como la Lo Hermida (sur) y Peñalolén (al norte de Qda. Nido de Águilas), también presentan condiciones para que se generen desbordes que puedan afectar zonas de diferentes extensiones, como resultado de eventos meteorológicos extremos. Por otro lado, los canales San Carlos y Las Perdices, aunque son artificiales, también han provocado la mayoría de las inundaciones en la comuna.

Casi la totalidad de los cauces del área urbanizada se encuentran intervenidos, con obras de contención y/o de mejoramiento de las condiciones para el escurrimiento o recubrimiento. Estas modificaciones para escurrimiento, en algunos casos corresponden a ajustes menores y en otros, a modificaciones completas respecto de la condición natural. En consecuencia, en caso de falla de las obras de escurrimiento, las zonas inundadas resultarán difíciles de predecir. Si la falla ocurriera en una zona recubierta, el más probable lugar de desborde correspondería al sector donde esta obra comienza, por lo tanto, estos lugares son los más susceptibles a desbordarse.

Por otro lado, no existen datos significativos sobre inundaciones por anegamiento en el área de estudio. Aun así, existen en la comuna algunos sectores que han registrado casos de anegamiento como el Parque Tobalaba y otras zonas sin especificar. Cabe destacar que, aunque la morfología de gran parte de la comuna se caracteriza por diferencias importantes de elevaciones y de pendientes, la zona urbana se encuentra en áreas de menor pendiente que oscilan entre 0° y 10° y sin zonas deprimidas, por lo que no reúne las condiciones necesarias para que este peligro sea de gran relevancia. En consecuencia, las posibles zonas de anegamiento responden, más bien, a obras que no consideran este peligro en su diseño de forma adecuada.

Las características ya descritas corresponden a **factores condicionantes** para este tipo de amenaza, donde una morfología que permita el encauce de aguas, ya sean ríos, esteros o quebradas, determina los sectores susceptibles de ser afectados por inundaciones por desborde de cauces. Esta aseveración es respaldada por el catastro, la geología y las observaciones de terreno. Las zonas adyacentes a las quebradas y las zonas cercanas a su desembocadura, con presencia de depósitos aluviales más antiguos, también corresponden a zonas susceptibles de ser inundadas, por lo que su identificación y sus características como altura y ubicación respecto al cauce principal, van a determinar su nivel de susceptibilidad.

Con respecto a los **factores desencadenantes**, la ocurrencia de lluvias intensas corresponde al principal desencadenante natural que puede activar tanto una pequeña parte de la red, sin escorrentía, o aumentar el caudal normal de un cauce, tal como lo evidencia el catastro. Lo anterior, permite determinar que todos los canales y quebradas tienen algún grado de susceptibilidad de inundaciones por desborde de cauces, independiente del tamaño o forma de la cuenca aportante.

3.3. MODELACIÓN

Para estimar las áreas asociadas a inundaciones se desarrollará en etapas posteriores un modelo hidráulico enfocado en las quebradas y el escurrimiento de dichos flujos a través del área urbana, buscando validar y/o actualizar las zonas de inundación, considerando como base los resultados y vías de escurrimiento indicados en el **Plan Maestro de Aguas Lluvias de Santiago (PM-01)**, y tomando en cuenta nuevas obras construidas.

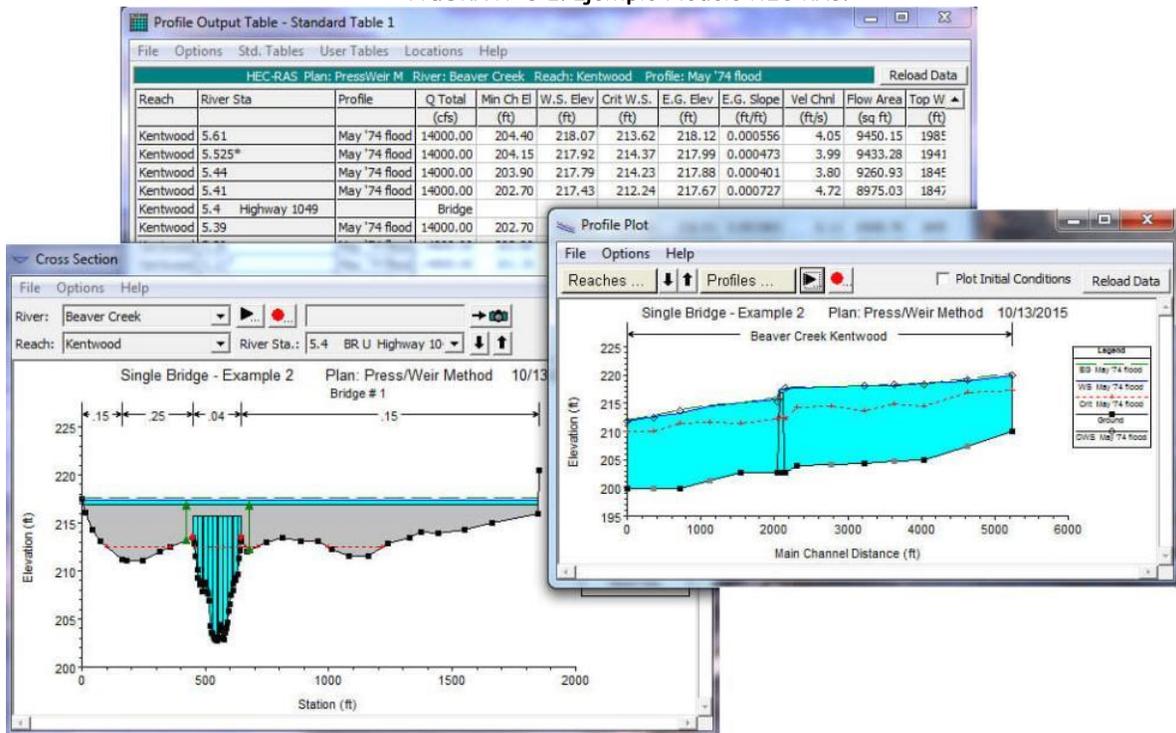
Para ello se consideran los siguientes pasos:

- Construir un modelo hidráulico, como por ejemplo HEC-RAS (FIGURA N° 3-2) o Iber (FIGURA N° 3-3), a partir de la nueva topografía, considerando su escala y limitaciones.
- Incorporar valores de rugosidad y condiciones de borde.
- Incorporar las variables hidrológicas (caudales de crecida en quebradas para distintos periodos de retorno) destacando las posibles diferencias con respecto a estudios anteriores.
- Analizar el flujo a través de vías de escurrimiento principales y la conexión con canales existentes u otras vías de descarga.
- Analizar la capacidad de las obras hidráulicas existentes de acuerdo con antecedentes disponibles y comparar con los resultados de la modelación.
- Analizar los puntos de descarga de las obras existentes y la continuidad del flujo a través de las calles.
- Estimar las áreas de inundación.

Para esta etapa, las áreas inundables o potencialmente inundables por desborde de cauce se determinaron a partir de la evidencia geológica y geomorfológica, el catastro generado y observaciones en terreno.

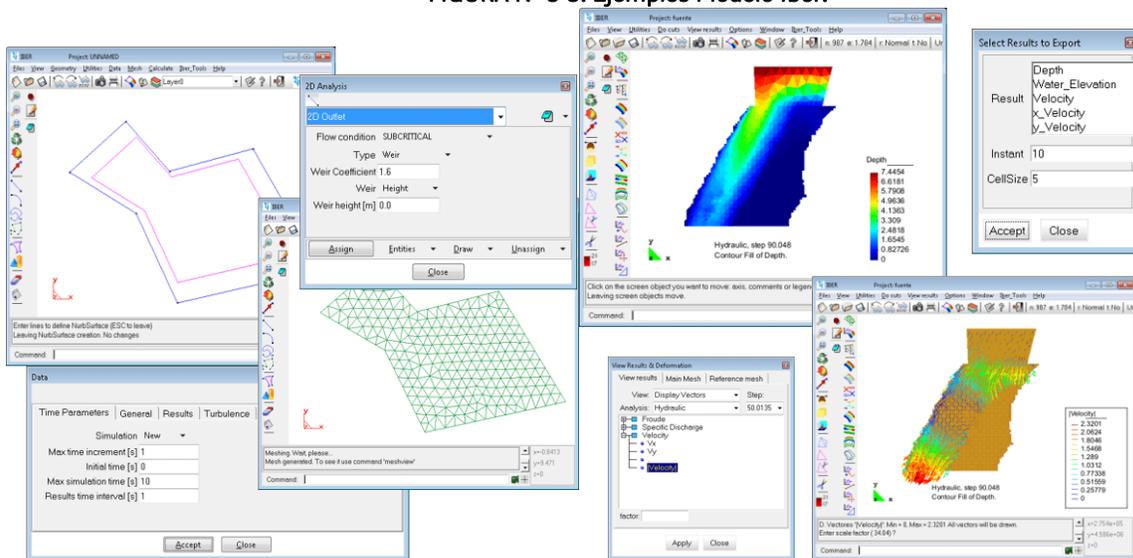


FIGURA N° 3-2: Ejemplo Modelo HEC-RAS.



Fuente: Sitio web US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center

FIGURA N° 3-3: Ejemplos Modelo Iber.



Fuente: Sitio web Iberaula

3.4. SUSCEPTIBILIDAD

3.4.1. Inundación por desborde de cauce

La zonificación de la susceptibilidad de inundaciones por desborde de cauces considera las quebradas y canales del área de estudio. Además, incorpora las características geomorfológicas obtenidas a partir del levantamiento geológico del área, el catastro de eventos históricos y reconocimiento en terreno.

La metodología que se describe a continuación entrega resultados sobre áreas de referencia que se encuentran susceptibles de ser inundadas como respuesta a los factores desencadenantes:

1. Se utilizaron como base las unidades geológicas de materiales no consolidados asociadas al escurrimiento de agua, como depósitos de origen fluvial o aluvial.
2. Complementariamente, se consideraron las geoformas que controlan el escurrimiento (quebradas, terrazas y abanicos), principalmente durante los eventos de crecidas extremas. Mediante las curvas de nivel y el modelo digital de terreno se delimitaron las zonas por donde escurriría el agua.
3. A partir de los antecedentes de inundaciones ocurridas en la zona (catastro), se asignaron diferentes niveles de susceptibilidad a los cauces y zonas adyacentes.
4. Además, se consideraron las características hidrológicas de la red de drenaje de la comuna.
5. Finalmente, se contemplaron aspectos visualizados en imágenes satelitales, fotos aéreas y ortofoto para distinguir fronteras como calles y primera línea de casas que limitarían la inundación.

Con todos estos factores, se establecieron los siguientes criterios de susceptibilidad de inundaciones por desborde de cauces:

Susceptibilidad Muy Alta: Cauces de las quebradas Macul y Nido de Águilas junto con los canales de origen antrópico de la comuna que presentan eventos catastrados.

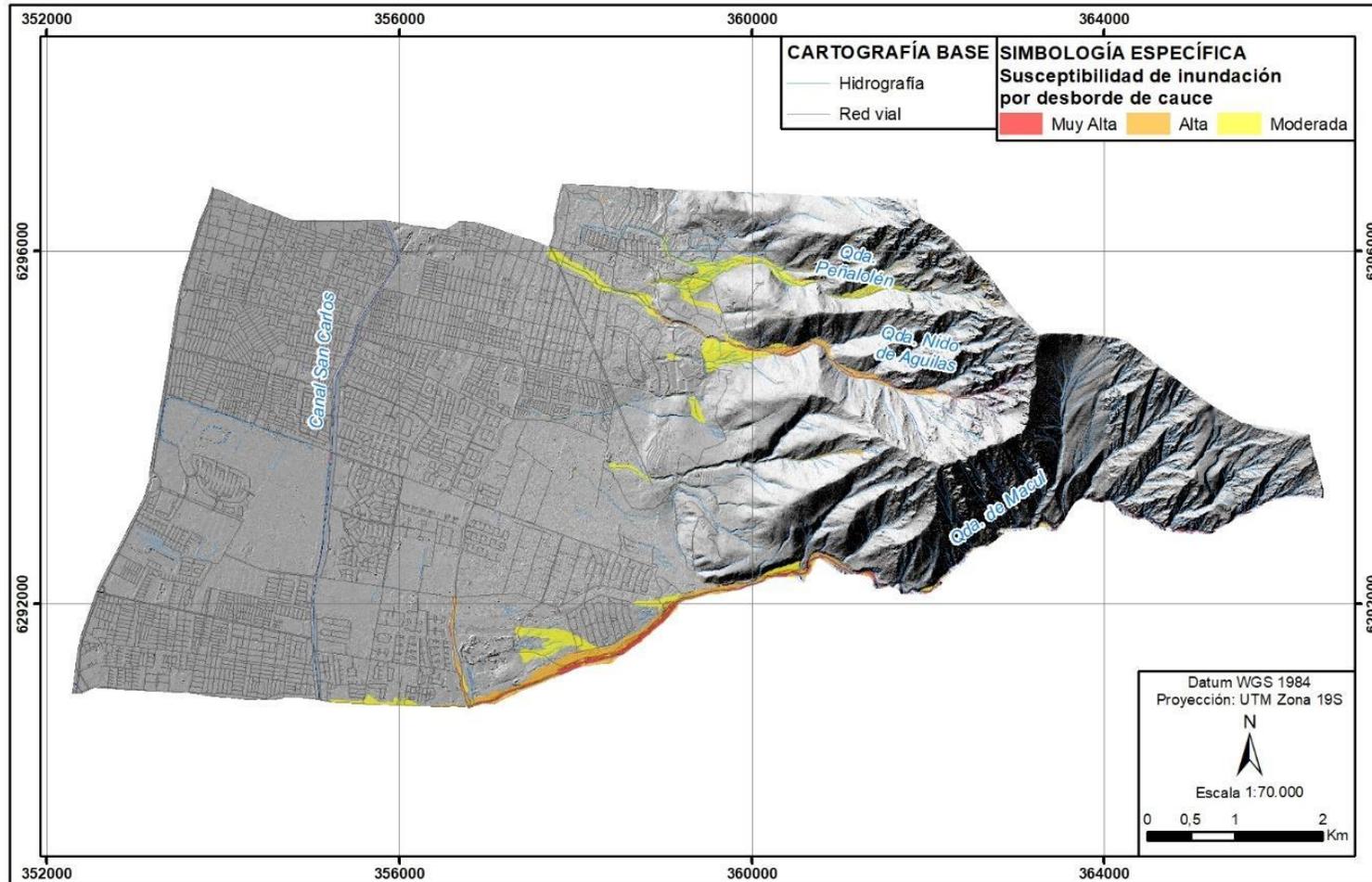
Susceptibilidad Alta: Zonas o terrazas adyacentes a los cauces con susceptibilidad muy alta con características morfológicas que evidencien haber sido afectadas por alguna inundación en el pasado o presentes una baja diferencia de elevación con el cauce principal.

Susceptibilidad Moderada: Zonas o terrazas adyacentes a los cauces con susceptibilidad alta con características morfológicas que evidencien haber sido afectadas por alguna inundación en el pasado o presentes una baja diferencia de elevación con el cauce principal.

La escala de trabajo para el mapa de susceptibilidad de inundación por desborde de cauces fue de 1:5.000. En este informe se añaden figuras a una escala de representación gráfica de 1:70.000 (FIGURA 3-4) y un plano a escala 1:10.000 fuera de texto.



FIGURA N° 3-4: Mapa representativo de la zonificación de inundaciones por desborde de cauce.



Fuente: Elaboración propia.

3.4.2. Inundación por anegamiento

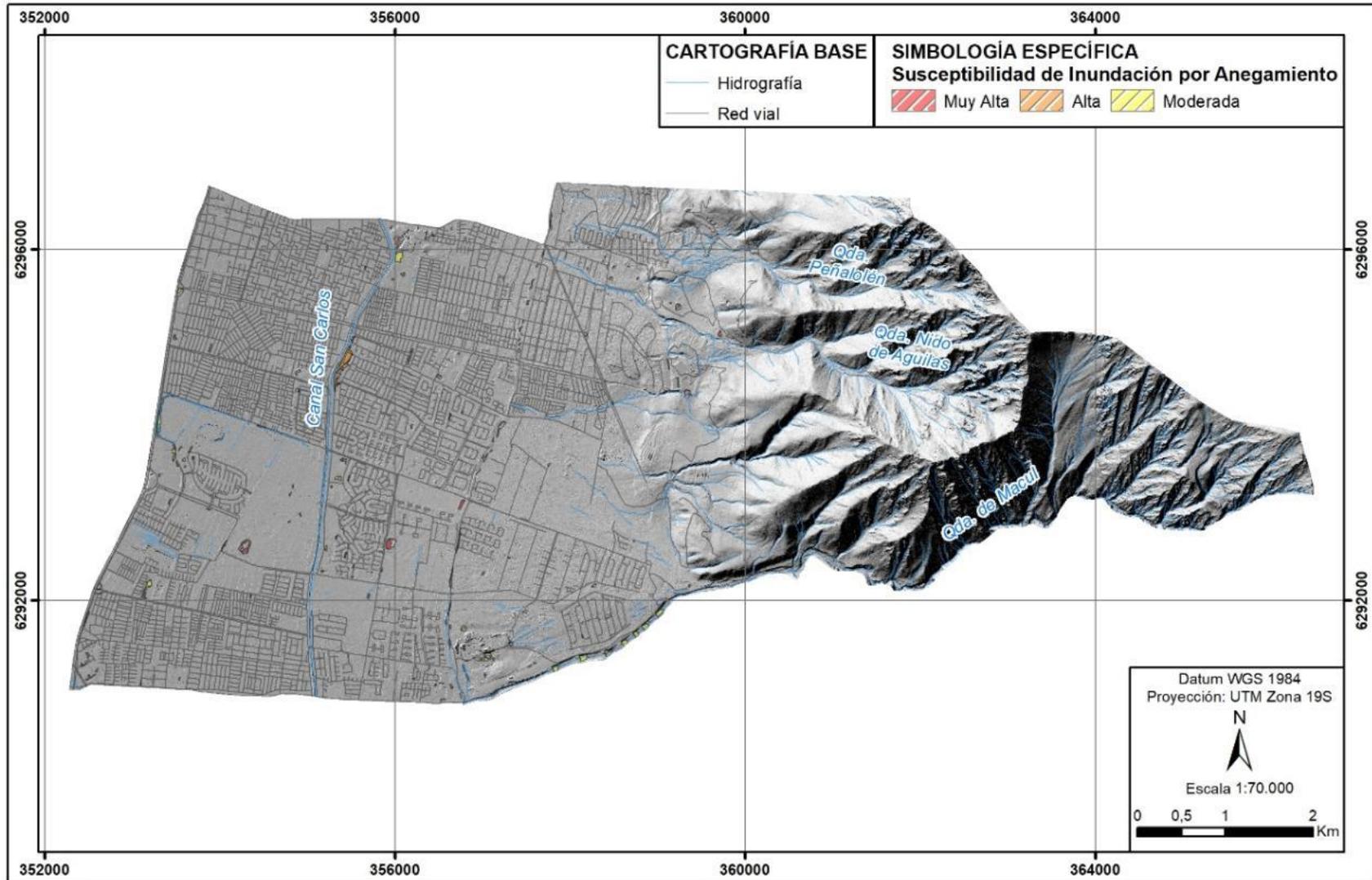
Las áreas susceptibles de ser afectadas por anegamiento se definieron a partir de la localización de las áreas deprimidas (que representan zonas topográficamente más bajas, cerradas y sin drenaje natural) identificadas a partir del modelo de elevación digital. Este insumo se obtuvo mediante álgebra de mapas, calculando la diferencia de elevación entre un ráster de relleno y el modelo digital de terreno original. Las áreas se delimitaron según los criterios que se describen a continuación:

- **Susceptibilidad Muy Alta:** zonas que presentan depresiones de más de 10 cm de profundidad según el ráster de zonas deprimidas y que, adicionalmente, ya se encuentren inundadas como, por ejemplo: tranques y lagunas artificiales.
- **Susceptibilidad Alta:** zonas que presentan depresiones cerradas de más de 10 cm de profundidad según el ráster de zonas deprimidas y que, adicionalmente, presentan antecedentes de catastro de anegamiento.
- **Susceptibilidad Moderada:** zonas que presentan depresiones de más de 10 cm de profundidad según el ráster de zonas deprimidas.

La escala de trabajo para el mapa de susceptibilidad de inundación por desborde de cauces fue de 1:5.000. En este informe se añaden figuras a una escala de representación gráfica de 1:70.000 (FIGURA 3-5) y un plano a escala 1:10.000 fuera de texto.



FIGURA N° 3-5: Mapa representativo de la zonificación de inundación por anegamiento en la comuna.



Fuente: Elaboración propia.

4. REMOCIONES 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, 2007). Para los fines de este informe, se han separado en dos tipos principales “Flujos de barro y/o detritos” y “Procesos de ladera”.

- **Procesos de ladera:** Este tipo de peligro se subdivide en dos categorías que afectarían al área de estudio: caída de rocas y deslizamientos. La caída de rocas corresponde a bloques de rocas o suelo que 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). Los deslizamientos corresponden a masas de suelo o roca que 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).
- **Flujos de barro y/o detritos:** Los flujos de detritos, referidos comúnmente como “aluviones”, son un tipo de 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, Fernández, Naranjo, & Villarroel, 2003).

4.4. CATASTRO

En el (CUADRO N° 4-1), se presenta un catastro construido a partir de los antecedentes revisados durante el desarrollo de este trabajo para eventos de procesos de ladera y flujos de barro y/o detritos que han afectado el área de estudio. Los eventos que pudieron georreferenciarse, se ilustran en la (FIGURA N° 3-1).

Cabe mencionar que, en los archivos de prensa, especialmente en los más antiguos se utiliza un lenguaje impreciso, que confunde los eventos de flujos de barro y/o detritos con eventos de inundación por desborde de cauces e incluso con anegamientos. Por lo tanto, los eventos catastrados deben ser interpretados considerando dicha imprecisión. Asimismo, debido a esta imprecisión, se ha elaborado un único catastro para los diferentes tipos de remociones en masa.

CUADRO N° 4-1: Catastro de remociones en masa de procesos de ladera y eventos de flujos de barro y/o detritos. Coordenadas en Datum WGS84 huso 19S.

Código	Fecha		Factor desencadenante	Tipo	Coord. E	Coord. N	Área	Comuna	Descripción del evento	Referencia
	Año	Detalle								
F01	1827	1 de junio	Temporal	Flujo			Sector oriente de Santiago		“El 1 de junio el persistente viento norte entibió las capas superiores de la atmósfera, de manera que, en lugar de caer nieve en las montañas, cayó agua que se deslizó por las laderas aumentando el caudal de los barrancos y ríos. El día 5 empezó el gran temporal, llovió más de 10 horas e incluso hubo aluvión de nieve*.” *En base a las características se interpreta como un alud.	(Urrutia & Lanza, 1993)
F02	1912	9 de junio	Temporal	Flujos			Sector oriente de Santiago		Los caudales cordilleranos invadieron los estanques de agua de San Ramón y Vitacura.	(Urrutia & Lanza, 1993)
F03	1926	1 de julio	Lluvias	Flujo hiperconcentrado			Quebrada de Macul	Nuñoa, Providencia, Peñalolén, Santiago y San Miguel	“En la Quebrada de Macul corría un río caudaloso imposible de atravesar y esta gran masa de agua se lanzaba en forma de avalancha* sobre la parte baja de la ciudad, cruzando los caminos de Pirque y Santa Rosa hasta llegar a San Miguel en donde ha originado los más serios prejuicios.” *En base a las características se interpreta como un aluvión.	El Diario Ilustrado (1 de julio de 1926)
F04	1982	25-28 de junio	Lluvias	Flujos de detritos	359.660	6.292.118	Quebrada de Macul	Peñalolén/La Florida	De acuerdo con los datos de la estación pluviométrica Antupirén, los eventos aluvionales se relacionaron con intensidades de precipitaciones de 88 mm/24 hrs. En los faldeos de la cordillera se producen numerosos aluviones por las diferentes quebradas. La más afectada fue la Quebrada de Macul que arrasó con parte de Peñalolén, La Florida y las poblaciones El Ejemplo, El Esfuerzo y El Trabajo de Macul. Según Padilla (2006). La crecida de la quebrada de Macul tuvo mucho caudal y poco sedimento, el que se depositó entre las cotas 750 y 1.150 m s.n.m.	(Sepúlveda S. , 1998) (SERNAGEOMIN, 2017)
F05	1986	15 – 17 de junio	Lluvias	Flujo de detrito			Quebrada de Macul	Peñalolén	Crecida importante en la Quebrada de Macul, con mucho caudal y poco sedimento, el que depositó entre las cotas 800 y 1.1150 m s.n.m.	(SEREMI MINVU RM, 2014)
F06	1987	14 de julio	Lluvias	Flujos de detritos	359.660	6.292.118	Quebrada de Macul	Peñalolén/La Florida	De acuerdo con los datos de la estación pluviométrica Antupirén, los eventos aluvionales se relacionaron con intensidades de precipitaciones de 78 mm/24 hrs. Desborde de quebradas del sector oriente de Santiago, y especialmente del Zanjón de la Aguada, que ocasiona la inundación de las comunas del sector, especialmente Peñalolén. El día 17 una gran cantidad de material fino grueso, compuesto por arena y fragmentos de roca son arrastrados por el canal.	(Sepúlveda S. , 1998) (SERNAGEOMIN, 2017)
F07	1991		Lluvias	Flujos de detritos	359.660	6.292.118	Quebrada de Macul	Peñalolén/La Florida	De acuerdo con los datos de la estación pluviométrica Antupirén, los eventos aluvionales se relacionaron con intensidades de precipitaciones de 61,5 mm/24 hrs. En la Quebrada de Macul, el aluvión de barro produjo un embanque generalizado de todos los cauces sobre la cota 720 m s.n.m. Se observó además gran cantidad de	(Sepúlveda S. , 1998)



Código	Fecha		Factor desencadenante	Tipo	Coord. E	Coord. N	Área	Comuna	Descripción del evento	Referencia
	Año	Detalle								
									depósitos de piedras mayores desde la cota 1000 a 1150 m s.n.m (Sepúlveda 1998)	
F08	1993	3 de mayo	Lluvias	Flujos de detritos	356.942	6.290.869	Sectores Quebrada de San Ramón, Macul y Lo Cañas	Peñalolén/La Florida	De acuerdo con los datos de la estación pluviométrica Antupirén, los eventos aluvionales se relacionaron con intensidades de precipitaciones de 9,7 mm/h, y una acumulación de agua caída de 35,8 mm en 24 horas debido a las intensas lluvias de verano, lo que provoca la muerte de 26 personas, 9 desaparecidos, 307 casas destruidas, 5.000 dañadas, y US\$ 5.000.000 en pérdidas materiales.	(Naranjo & Varela, 1996) (Antinao, Fernández, Naranjo, & Villaruel, 2003) (SERNAGEOMIN, 2017)
F09	2000	14 de junio	Lluvias	Flujos de detritos	357.717	6.296.052	Quebrada Los Loros (Av. Las Torres con José Arrieta)	Peñalolén	A lo largo de calles las Torres y José Arrieta quedaron esparcidos una gran cantidad de gravas gruesas de hasta 20 cm de diámetro (Sin información precipitaciones).	(Antinao, y otros, 2000)
F10	2002	3, 4 y 5 de junio	Lluvias	Flujo			Sector de Quebrada Nido de Águilas con calle Álvaro Casanova	Comuna de Peñalolén y la Reina	El agua de la Quebrada atravesaba la calle Álvaro Casanova. Había una acumulación de sedimentos, arenas, gravas y bolones antes de que el agua cruzara la calle (producto del transporte de material desde las partes más altas de la cuenca y el desmoronamiento de la pared sur del mismo antes de atravesar la calle). El flujo de agua por encima de la calle era de aprox. 3m de ancho, 20 cm de alto, este flujo acarrea material sólido que no pudo ser contenido por las obras aguas arriba.	(MOP, 2002)
F11	2005	26 y 27 de agosto	Lluvias	Flujos de detritos	357.275 356.799	6.294.099 6.290.825	Las Perdices con Antupirén y Quebrada de Macul	Peñalolén	Aluvión con origen en quebradas menores al norte de Quebrada de Macul. Afectó de igual forma a sectores bajos de las quebradas Lo Cañas, Macul, San Ramón y curso medio del Río Mapocho. Acumulación de agua caída de 14,6 mm en 2 horas. Desborde de cauces e inundaciones en el sector oriente de la Región Metropolitana, y sectores bajos de las quebradas Lo Cañas, Macul y San Ramón, y curso medio del río Mapocho.	(Naranjo & Hauser, 2005) (SERNAGEOMIN, 2017)

4.5. ANÁLISIS DE FACTORES CONDICIONANTES

Los factores condicionantes son aquellos que pueden generar una situación potencialmente peligrosa o inestable, por lo tanto, controlan la susceptibilidad de una zona de generar alguna remoción en masa. A continuación, se detallan cada uno de los factores condicionantes considerados en este estudio.

4.2.1. Geomorfología

Este factor corresponde a las características del paisaje como topografía, pendientes, extensión y altura de las laderas, incidiendo en la velocidad, energía y volumen de las remociones. También la orientación de la ladera se incluye dentro de este factor, pues de ella depende la exposición al sol, lo que controla la humedad, presencia de vegetación y nivel de erosión que puede tener. De esta manera, una topografía escarpada con altas pendientes es favorable para que se generen remociones.

4.2.2. Geología y geotecnia

Corresponde a la composición y características de las unidades geológicas. Para el caso de depósitos no consolidados o suelo influye la densidad, plasticidad, humedad y permeabilidad, mientras que para roca es importante considerar la litología, estructuras, alteración y meteorización.

4.2.3. Hidrología e hidrogeología

Este factor incluye la red de drenaje, posiciones y variaciones del nivel freático, caudales, coeficientes de escorrentía e infiltración, los cuales están directamente relacionados a la incorporación de agua en los suelos o roca (Lara M. , 2007). El agua influye de manera tal que genera presiones intersticiales que reducen la resistencia de los componentes, aumenta esfuerzos de corte por aumento de peso del terreno y genera fuerzas desestabilizadoras en grietas y discontinuidades (Gonzalez de Vallejo, Ferre, Ortuño, & Oteo, 2002).

4.2.4. Clima

Este factor corresponde a temperatura, viento, radiación solar y precipitaciones, contribuyendo a la erosión de las laderas. Este último es el factor de mayor envergadura, pues condiciona la estabilidad de la roca al disminuir la resistencia de las estructuras (Lara M. , 2007).

4.2.5. Vegetación

La presencia de vegetación en algunos casos ayuda a disminuir la susceptibilidad a la ocurrencia de remociones, debido a que reduce el efecto erosivo sobre laderas generado por factores climáticos, propiedades del suelo y topografía (Selby, 1993). Por otro lado, la presencia de vegetación promueve la

absorción del agua, lo que disminuye el grado de saturación del suelo y ayuda a la estabilización de la ladera actuando como anclaje.

4.2.6. Actividad antrópica

La intervención antrópica modifica las condiciones naturales de las laderas y, por lo tanto, los esfuerzos que actúan en ellas.

4.6. DIAGNÓSTICO

4.3.1. Flujos de barro y/o detritos

El principal factor desencadenante para los flujos de barro y/o detritos son eventos meteorológicos intensos en zonas susceptibles de deslizamientos superficiales de suelo que puedan fluidizarse y alcanzar cauces, trasportándose aguas abajo, como consecuencia de las precipitaciones.

Entre los factores geológicos/geomorfológicos que condicionan la ocurrencia de flujos de barro y/o detritos, se consideran las características de la cuenca aportante, la pendiente de las laderas adyacentes a cauces de quebradas. También se incluye la disponibilidad de material para ser transportado y/o depósitos de remociones en masa no consolidados, así como las laderas con posibilidad de generación de deslizamientos superficiales. En menor proporción, también son factores condicionantes, el clima, la vegetación y modificaciones antrópicas.

En cuanto a la intensidad de los flujos de barro y/o detritos, se relaciona con la pendiente de los cauces por donde circulan, ya que determina la energía disponible y, por lo tanto, la velocidad y distancia con la que se podría trasportar el material en los cauces y/o laderas.

La comuna de Peñalolén se caracteriza por una zona montañosa hacia el oriente, la cual alcanza pendientes mayores a 35°, que pueden considerarse como zonas favorables de generación de este peligro. Esta zona está conformada fundamentalmente por rocas volcánicas y sedimentarias fracturadas y meteorizadas que en su mayoría poseen un desarrollo de suelo residual de no más de 2m., de espesor. En esta zona hay quebradas profundamente incisas que confluyen en las cinco quebradas principales (cada una con su microcuenca respectiva; Capítulo 2.4.1), que desembocan hacia la zona plana de la comuna. En general se reconocen depósitos de origen aluvial tanto al oriente como al poniente de la comuna, lo que indica la ocurrencia de procesos de flujos de barro y/o detritos en el pasado geológico. Asimismo, en los fondos de quebradas se reconocen depósitos de origen coluvial que constituyen material susceptible de ser transportado por estos flujos.

A partir del catastro se reconoce que dichas quebradas son escenario de flujos de barro y/o detritos ocurridos en el período histórico, con especial énfasis en la quebrada de Macul que, además de presentar

flujo constante de agua, fue escenario de uno de los aluviones más destructivos en 1993 de los últimos 20 años en la Región Metropolitana.

De esta forma, para determinar las zonas que pueden ser afectadas por este peligro, se consideraron los resultados de las líneas de base de geología, geomorfología y de hidrología, y el catastro de remociones en masa obtenido a partir de antecedentes bibliográficos, reuniones con el equipo municipal y observaciones realizadas en terreno.

4.3.2. Procesos de ladera

El análisis de los procesos de ladera se ha distinguido según dos grandes tipos: caída de bloques y deslizamientos. Los factores que condicionan, tanto la caída de bloques como los deslizamientos corresponden generalmente, entre otros factores, a la pendiente del terreno, además de las condiciones propias de las discontinuidades en las rocas. El alcance de estos procesos está directamente relacionado con la pendiente y elevación, pues mientras más alta sea el sitio de generación, existe mayor posibilidad de recorrer distancias más largas. Considerando lo anterior, los procesos de caída de bloques y deslizamientos se trabajaron en conjunto bajo los mismos factores condicionantes.

En la comuna de Peñalolén, la baja densidad de registros puede estar asociado al alcance de este proceso, el cual ha afectado zonas que no han estado pobladas. Este único evento registrado, ocurrió en el sector cordillerano como consecuencia de un sismo en 1945, con víctimas fatales.

Otros procesos que se denominaron “mega-deslizamientos”, han sido reconocidos en el área, principalmente en la parte alta de la comuna y sus alrededores, en sectores donde las pendientes superan los 35°, poseen edades mayores y afectan las rocas de la Formación Abanico. Estas unidades afectadas son un indicador de susceptibilidad, pues reunirían las características geotécnicas favorables para la ocurrencia de deslizamientos.

Al analizar las coberturas que muestran los afloramientos de la comuna, los cuales representan zonas con sustrato rocoso que podrían generar caída de bloques o deslizamientos, se correlaciona bien entre ellas y las zonas de mayores pendientes. En general, se ubican en las partes altas de la comuna, hacia las cabeceras de las quebradas. Estos sectores corresponderían a las zonas de generación, donde el material al desprenderse sería transportado por el cauce pendiente abajo. Destacan la quebrada que desemboca en el sector de la Universidad Adolfo Ibáñez (Quebrada Lo Hermida), que en su parte más alta está rodeada por afloramientos rocosos. Lo mismo ocurre con la quebrada Nido de Águila y sus afluentes y la quebrada Peñalolén al norte.

A pesar de que las quebradas están rodeadas por laderas de altas pendientes, solo en sus partes altas cuentan con afloramientos. Esto, por un lado, permitiría inferir que, al ubicarse la fuente a mayor distancia de los asentamientos, su alcance tendría que ser muy alto para llegar a las zonas urbanas. Sin embargo,

considerando que las partes altas se encuentran expuestas a mayor erosión, la ocurrencia de estos fenómenos podría ser recurrente, así, incluso las zonas bajas podrían ser afectadas por fenómenos climáticos anómalos que ocurran en las zonas altas. Factores como el volumen del material transportado, dado por la intensidad de los factores desencadenantes, podrían generar procesos de ladera que tengan largo alcance.

La Quebrada de Macul ubicada al sur de la comuna, exhibe afloramientos rocosos en las laderas en torno a su cauce, sin embargo, está rodeada por pendientes mayores a 35° como se pudo observar en terreno. Como se ha mencionado, el factor de la pendiente corresponde al principal condicionante para la ocurrencia de procesos de ladera. Por ello, la generación de deslizamientos de suelo/roca es posible en esta zona y en el resto de las quebradas que reúnen las características de alta pendiente y particulares litológicas de inestabilidad.

En síntesis, la comuna de Peñalolén se caracteriza por su relieve montañoso con altas pendientes y gran desnivel desde las partes altas hacia la desembocadura de sus quebradas, las cuales exhiben afloramientos rocosos en sus cabeceras y pendientes mayores a 35° en torno a los cauces. Estas características cumplen con los condicionantes necesarios para la susceptibilidad de generación de procesos de ladera como caída de rocas y/o deslizamientos. La ocurrencia de estos procesos puede desencadenar efectos en los asentamientos ubicados en el piedemonte, problemas de conectividad y afectar infraestructura, como piscinas decantadoras, que afectarían en cadena a la comunidad.

4.4. SUSCEPTIBILIDAD

4.4.1. Flujos de barro y/o detrito

4.4.1.1. Metodología específica

Los insumos utilizados para el análisis de flujos de barro y/o detrito como la caracterización geológica y geomorfológica a escala 1:2.000 realizada en este trabajo, el modelo de elevación digital de este estudio, que proporcionó productos como el modelo de sombreado (Hillshade) y un modelo de pendientes del terreno, fotografías aéreas y un reconocimiento en terreno, permitieron realizar una zonificación de la zona en susceptibilidad Muy alta, Alta o Moderada de ser afectada por dicha amenaza.

De los insumos mencionados recientemente, el principal corresponde a la geología, de donde se extraen las unidades geológicas de depósitos coluviales-aluviales de distintas edades, que fueron ajustadas con el fin de realizar una zonificación, mediante el DEM, fotografías aéreas y criterio del experto a cargo.

Se consideraron los depósitos abanicos aluviales actuales de 1993 (Ha y Ha2) ubicados en las quebradas como zonas de susceptibilidad muy alta o alta de generar flujos de barro y/o detrito, dependiendo si se encontraban en zonas de alta o baja pendiente, respectivamente, y en particular se categorizaron como

muy alta a las quebradas y cauces que presenten características y condiciones similares a zonas catastradas con este tipo de remoción, como son la quebrada Nido de Águilas y Macul principalmente. Por otro lado, también se consideraron susceptibilidad alta a los abanicos aluviales formados por las quebradas categorizadas como muy alta. Finalmente, se asignó moderada a las zonas ladera que corresponden a depósitos aluviales más antiguos.

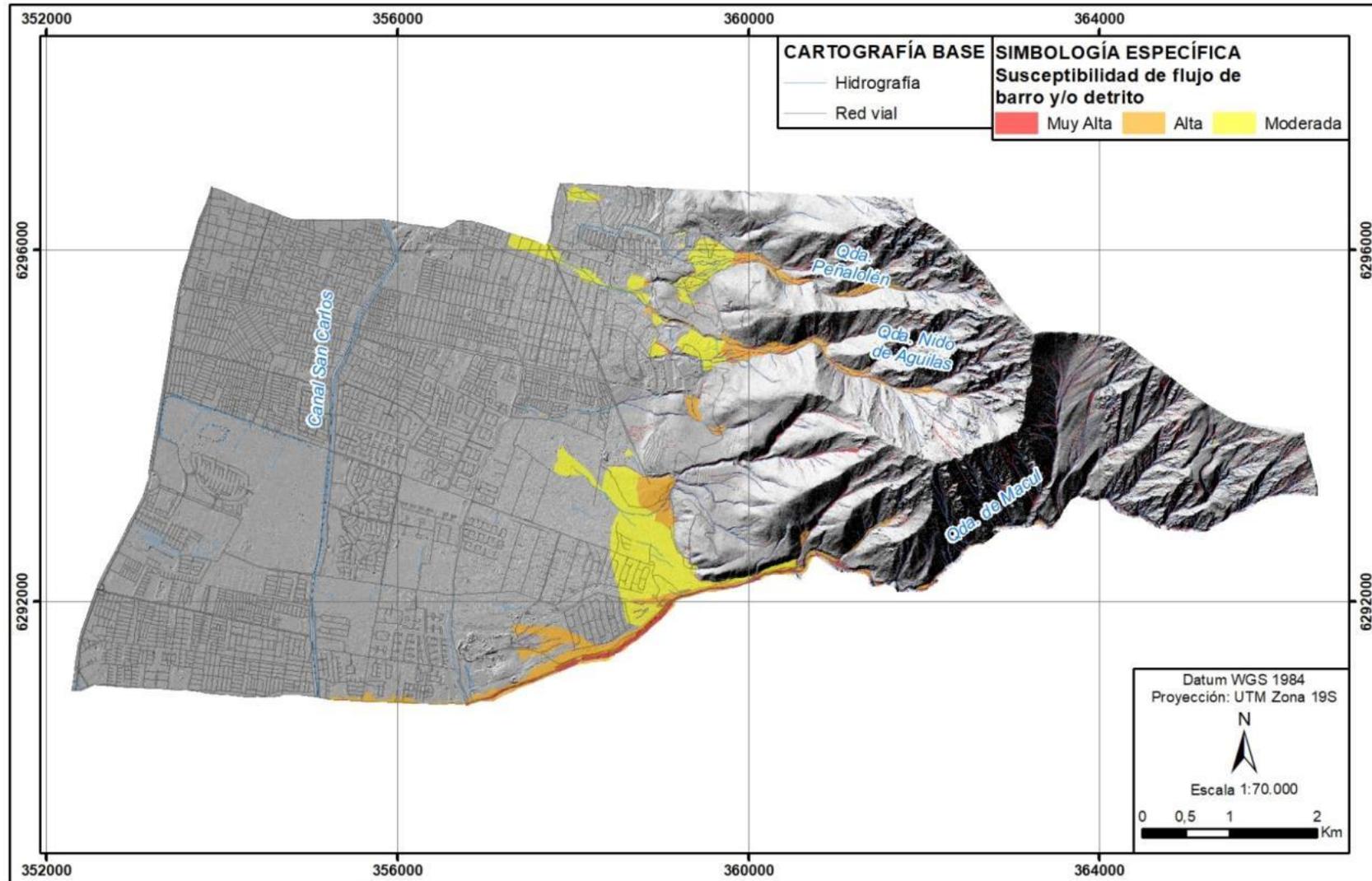
A partir de los datos expuestos y analizados anteriormente, se definieron los siguientes criterios de zonificación:

- **Susceptibilidad Muy Alta:** Cauces de quebradas con depósitos abanicos aluviales actuales (Ha y Ha2) que se encuentren en zonas de altas pendientes, presenten características geomorfológicas que permitan generar este peligro y que posean eventos catastrados en dicha zona.
- **Susceptibilidad Alta:** Cauces de quebradas con depósitos aluviales que se encuentren en zonas donde predominen pendientes bajas, bajo los 25° y a los depósitos aluviales donde desembocan quebradas categorizadas con susceptibilidad muy alta.
- **Susceptibilidad Moderada:** zonas de abanicos y planicies aluviales, donde desembocan las quebradas categorizadas con susceptibilidad Alta, partes aledañas a abanicos aluviales categorizados con susceptibilidad Alta.

La escala de trabajo para el mapa de susceptibilidad de inundación por desborde de cauces fue de 1:5.000. En este informe se añaden figuras a una escala de representación gráfica de 1:70.000 (FIGURA N°4-1) y un plano a escala 1:10.000 fuera de texto.



FIGURA Nº 4-1: Mapa representativo de la zonificación de flujos de barro y/o detrito en la comuna.



Fuente: Elaboración propia.

4.4.2. Procesos de ladera

Para determinar la susceptibilidad, se utilizó una metodología basada en el trabajo de Lara (2007), para la cual, se separaron los procesos de ladera en: caída de rocas, deslizamiento en roca y deslizamiento de suelo. Esta metodología consiste en dividir la zona en distintas unidades y asignar a cada una de ellas un Índice de Susceptibilidad (IS), dependiendo de los factores condicionantes que afecten a dichas unidades. De esta manera, es que la suma de los puntajes asignados a cada uno de los **factores condicionantes**, indica el valor del Índice de Susceptibilidad. El IS oscila entre valores 0% y 100%, donde 0%, corresponde a una zona sin susceptibilidad de generar este tipo de procesos, mientras que 100%, corresponde al máximo valor que se le puede otorgar, es decir, muy susceptible.

A cada factor condicionante se le asigna un ponderador (en porcentaje) que define su grado de importancia en la generación del evento para poder calcular el Índice de Susceptibilidad. El valor asignado a cada factor condicionante varía según el tipo de remoción, estas son: flujos de barro y/o detritos y procesos de ladera, que incluye caída de rocas y deslizamientos de suelo y roca. La ponderación de cada uno de los factores condicionantes para cada tipo de remoción se muestra en el (CUADRO N°4-2).

CUADRO N° 4-2:
Ponderación máxima de factores condicionantes de los tipos de remociones en masa a analizar.

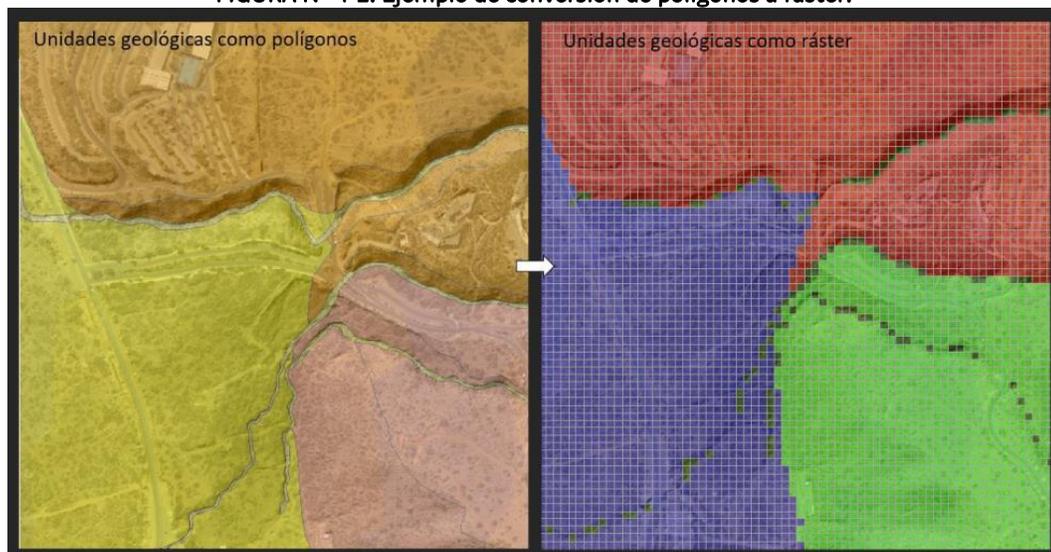
Factor condicionante		Caída de rocas	Deslizamiento en roca	Deslizamiento de suelo
		Geomorfología	Pendientes de laderas	35%
Exposición al sol	No aplica		No aplica	
Pendiente del canal de drenaje	No aplica		No aplica	No aplica
Encajonamiento del canal de drenaje	No aplica		No aplica	No aplica
Geología-geotecnia	Características geológicas y geotécnicas del material	35%	35%	30%
	Condiciones de humedad y saturación	No aplica	No aplica	
Clima	Acumulación de nieve	10%	10%	10%
Vegetación	Cobertura vegetal	No aplica	No aplica	
Antrópico	Desestabilización artificial de laderas	5%	5%	10%
	Obstrucción del canal de drenaje	No aplica	No aplica	No aplica
Antecedentes	Antecedentes del tipo de remoción declaradas en la ladera	15%	15%	15%

Fuente: Modificado de Lara (2007).

Los ponderadores que se muestran en el (CUADRO N°4-2), corresponden al máximo porcentaje otorgado a cada factor. Sin embargo, para cada tipo de remoción existe un desglose detallado de cada uno, otorgando distintos valores; (CUADRO N° 4-3, CUADRO N° 4-4 y CUADRO N° 4-5). De esta manera, la sumatoria de los ponderadores indicará un valor que corresponderá al IS de la unidad.

Cada uno de los factores fueron representados por separado como capas ráster. Un ráster corresponde a una matriz de celdas organizadas en cuadrículas, donde cada celda o píxel contiene un valor con la información. En la (FIGURA N°4-2), se muestra un ejemplo de la conversión de un sector del mapa geológico a ráster donde cada celda contiene el valor de la unidad geológica correspondiente. Para este análisis de susceptibilidad, las capas ráster utilizadas contienen, en cada celda, el valor del ponderador correspondiente para calcular el índice de susceptibilidad.

FIGURA N° 4-2: Ejemplo de conversión de polígonos a ráster.



Fuente: Elaboración propia.

4.4.2.1. Caída de roca

Como se mencionó en el Capítulo 1 de la metodología general, el máximo valor que puede tomar cada uno de los factores condicionantes se muestra en el (CUADRO N°4-2), sin embargo, en el (CUADRO N°4-3), se muestra el desglose de ellos en distintos rangos dependiendo de las condiciones que presenta la unidad estudiada (Lara M. , 2007).

Para calcular el Índice de Susceptibilidad de este tipo de remoción, existen cinco factores condicionantes a considerar (f_1 al f_5) que se suman y un ponderador (f_6) que se multiplica (CUADRO N° 4-3). Al ser caída de roca, cualquier unidad asociada a depósitos no consolidados o suelo tendría que tener un $IS=0$, de esta manera es que este último ponderador, $f_6= 0$ si la unidad no es roca y $f_6=1$ si la zona representa una unidad geológica de roca con suelo superficial de espesor menos a 1-1,5 m. Por lo tanto, el índice de susceptibilidad de caída de rocas se calcula como:

$$IS_{Caída\ de\ roca} = \left(\sum_{i=1}^5 f_i \right) \cdot f_6$$

Los criterios que se usaron para clasificar en rangos cada uno de estos criterios fueron los siguientes:

- **Pendientes de laderas, f(1):** se obtuvo un mapa (raster) de pendientes a partir del DEM entregado por el mandante, donde a cada rango se le asignó el IS de acuerdo al (CUADRO N° 4-3) y que se puede observar en la (FIGURA N° 4-3 (a)).
- **Características geológicas geotécnicas, f(2):** las unidades que pueden generar este tipo de remoción son unidades de roca con poco desarrollo de suelo que en este caso consiste en formación abanico, donde las zonas más favorables son las que presentan afloramientos de roca con abundantes depósitos coluviales ladera abajo, mientras que más menos favorables son las laderas con mayor desarrollo de suelo (pero menos a 1,5 m), algo de vegetación, sin material coluvial y pocas quebradas. Los criterios para determinar los rangos se basaron en las observaciones y caracterizaciones realizadas por Celis Saez (2018) y Lara M (2007), observación de imágenes satelitales, topografía entregada por el mandante y experiencia y criterio del experto a cargo (FIGURA N° 4-3 (b)).
- **Acumulación de nieve, f(3):** se realizó una división de acuerdo a la altura sobre el nivel del mar, dividiendo la comuna en tres, una zona entre los 586 y 1000 m s.n.m, donde la presencia de nieve es prácticamente nula, entre los 1000 y 1500 donde cae nieve esporádicamente y sobre los 1500 sería estacional que corresponde a la altura de línea de nieve (Garreaud & Rutllant, 1996), (FIGURA N° 4-3 (c)).
- **Desestabilización artificial de las laderas, f(4):** se seleccionaron las laderas intervenidas antrópicamente mediante imagen satelital entregada por el mandante clasificando según lo observado, se determinó si la presencia de actividad antrópica es importante, poco importante o nula (FIGURA N° 4-3 (d)).
- **Caídas declaradas en la ladera, f(5):** de acuerdo a la geología e observación de imágenes satelitales se determinaron las laderas que presentan bloques caídos o no (FIGURA N° 4-3 (e)).
- **Material, f6:** basado en la geología se seleccionaron todas las unidades de roca.

Cada uno de estos factores es representado distintos ráster, donde cada celda tiene un valor asignado según el (CUADRO N° 4-3), y la suma de estos factores, multiplicado por este ponderador f_6 entrega el valor del IS. La metodología propuesta por Lara (2007) establece que las unidades con $IS \geq 50$, tienen una susceptibilidad importante a generar este tipo de procesos. De esta manera es que se definen tres grados de susceptibilidad.



La metodología propuesta por Lara (2007) establece que las unidades con $IS \geq 50$ tienen susceptibilidad importante a generar este tipo de procesos. Sin embargo, para este estudio, dado las condiciones del terreno se decide categorizar los niveles de susceptibilidad de acuerdo con un factor de seguridad de 1,2 ($IS \geq 40$). De esta manera es que se definen tres nuevos grados de susceptibilidad:

- **Susceptibilidad Muy Alta de caída de rocas:** unidades con IS entre 50 y 100.
- **Susceptibilidad Alta de caída de rocas:** unidades con IS entre 40 y 50.
- **Susceptibilidad Moderada de caída de rocas:** unidades con IS entre 20 y 40.

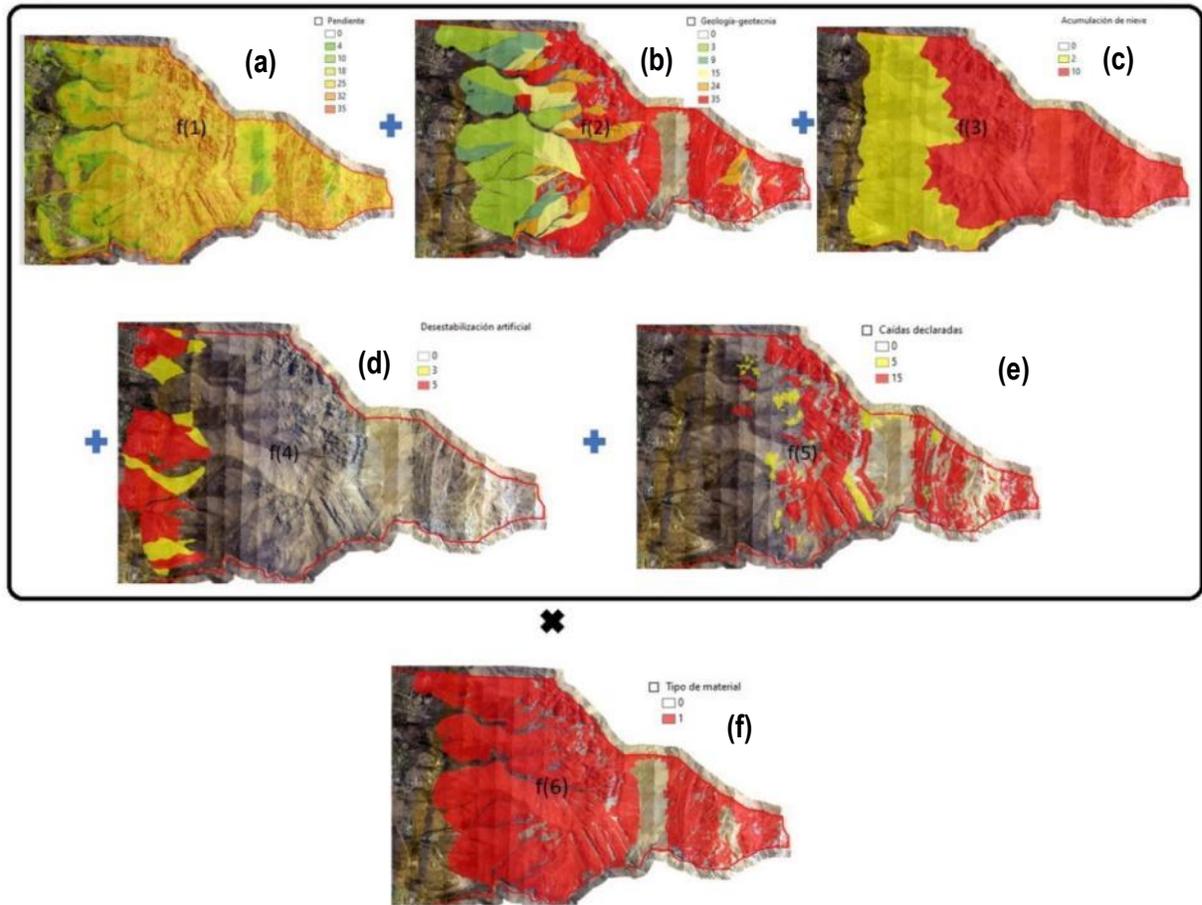
CUADRO N° 4-3: Factores condicionantes de caída de rocas.

Factor	Especificaciones	Rangos	%
Pendientes de laderas (f_1) (a)		15° 20°	4
		20° 25°	10
		25° 30°	18
		30° 40°	25
		40° 60°	32
		> 60°	35
Características geológicas-geotécnicas del material (f_2) (b)	Será más favorable a medida que presente estructuras subverticales en el macizo, alta frecuencia de fracturas y orientación de fracturas en el sentido de la ladera. Se consideran además los factores generados de deslizamientos	Muy favorable	35
		Favorable	24
		Medianamente favorable	15
		Poco favorable	9
		Muy poco favorable	3
Acumulación de nieve (f_3) (c)	Según estacionalidad	Estacional	10
		Siempre	4
		Esporádica	2
		Nula	0
Desestabilización artificial de laderas (f_4) (d)	Por ejemplo, cortes artificiales en laderas, construcción de terraplenes, etc.	Importante	5
		Poco importante	3
		No observado	0
Caídas declaradas en la ladera (f_5) (e)	Presencia de bloques caídos	Presente	15
		Sin antecedentes	5
		No observado	0
Tipo de material (f_6) (f)	Suelo no está en estudio, por lo tanto, pondera por 0 al resto de los factores	Suelo	0
		Depósitos coluviales	0,75
		Roca (<1-1,5 m de suelo)	1

Fuente: modificado de Lara (2007).



FIGURA N° 4-3 Clasificación de factores condicionantes según su Índice de Susceptibilidad.



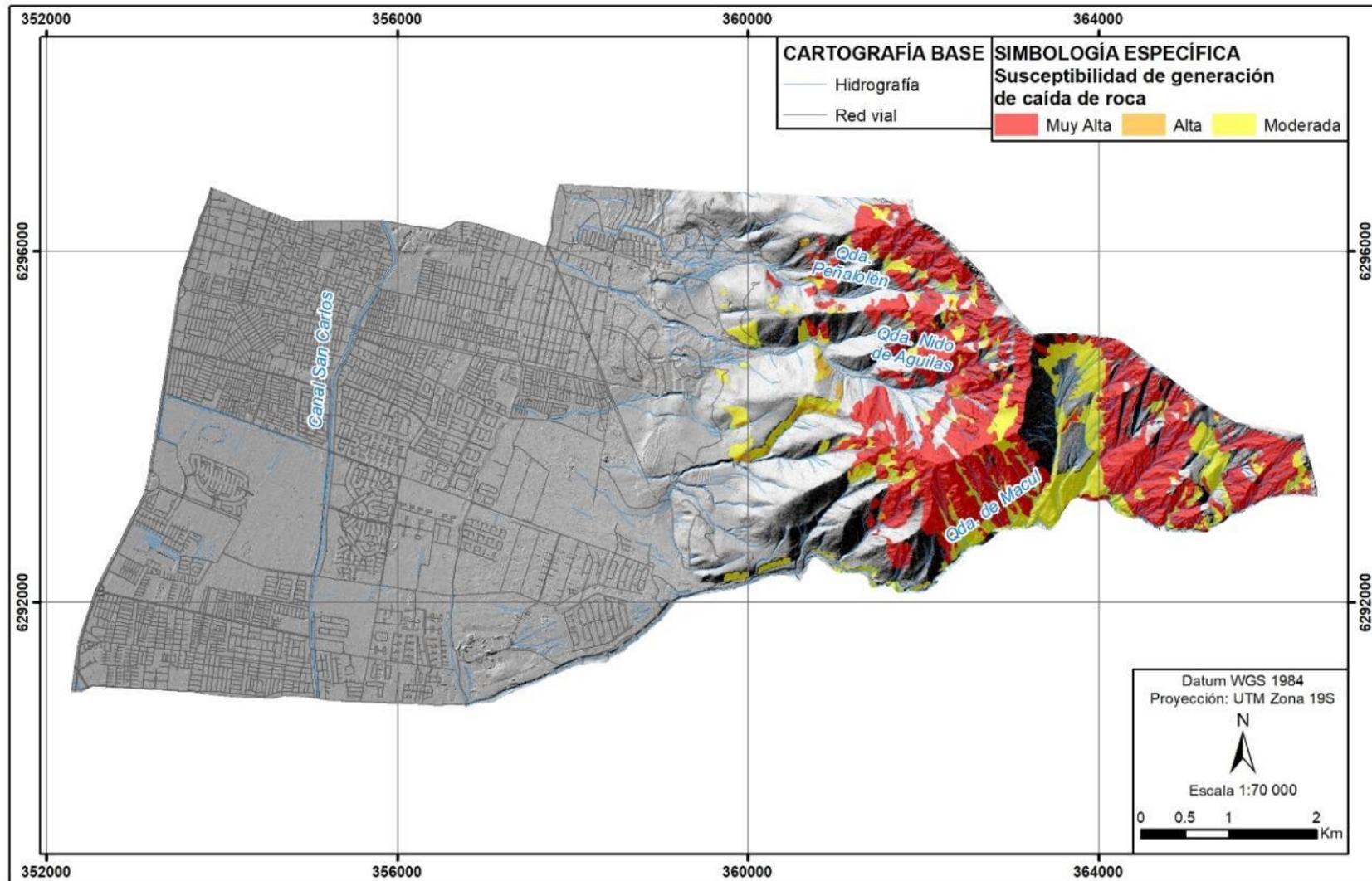
Fuente: Elaboración propia.

La escala de trabajo para el mapa de susceptibilidad de inundación por desborde de cauces fue de 1:5.000.

En este informe se añaden figuras a una escala de representación gráfica de 1:70.000 (FIGURA N°4-4) y un plano a escala 1:10.000 fuera de texto.



FIGURA N° 4-4: Mapa representativo de la zonificación de generación de caída de roca en la comuna.



Fuente: Elaboración propia.

4.4.2.2. Deslizamiento de roca

Al igual que en caída de rocas, el máximo valor que puede tomar cada uno de los factores condicionantes se muestra en el (CUADRO N° 4-2), sin embargo, en el (CUADRO N° 4-4), se muestra el desglose de ellos en distintos rangos dependiendo de las condiciones que presenta la unidad estudiada, (Lara M. , 2007).

Para calcular el Índice de Susceptibilidad de este tipo de remoción, existen cinco factores condicionantes a considerar (f_1 al f_5) que se suman y un ponderador (f_6) que se multiplica (CUADRO N° 4-3). Al ser deslizamiento en roca, cualquier unidad asociada a depósitos no consolidados o suelo, tendría que tener un $IS=0$, de esta manera es que este último ponderador, $f_6= 0$, si la unidad no es roca y $f_6=1$, si la zona representa una unidad geológica de roca con suelo superficial de espesor menos a 1-1,5 m. Por lo tanto, el Índice de Susceptibilidad de deslizamiento en roca se calcula como:

$$IS_{Deslizamiento\ en\ roca} = \left(\sum_{i=1}^5 f_i \right) \cdot f_6$$

Los criterios que se usaron para clasificar en rangos cada uno de estos criterios fueron los siguientes:

- **Pendientes de laderas, f(1):** se obtuvo un mapa (ráster) de pendientes a partir del DEM entregado por el mandante, donde a cada rango se le asignó el IS de acuerdo al (CUADRO N° 4-3).
- **Características geológicas geotécnicas, f(2):** las unidades que pueden generar este tipo de remoción son unidades de roca con poco desarrollo de suelo que en este caso consiste en formación abanico, donde las zonas más favorables son las que presentan afloramientos de roca con abundantes depósitos coluviales ladera abajo, mientras que más menos favorables son las laderas con mayor desarrollo de suelo (pero menos a 1,5m), algo de vegetación, sin material coluvial y pocas quebradas. Los criterios para determinar los rangos se basaron en las observaciones y caracterizaciones realizadas por Celis Saez (2018) y Lara M (2007), observación de imágenes satelitales, topografía entregada por el mandante y experiencia y criterio del experto a cargo.
- **Acumulación de nieve, f(3):** se realizó una división de acuerdo a la altura sobre el nivel del mar, dividiendo la comuna en 3, una zona entre los 586 y 1000 m s.n.m, donde la presencia de nieve es prácticamente nula, entre los 1000 y 1500 donde cae nieve esporádicamente y sobre los 1500 sería estacional que corresponde a la altura de línea de nieve (Garreaud & Rutllant, 1996).
- **Desestabilización artificial de las laderas, f(4):** se seleccionaron las laderas intervenidas antrópicamente mediante imagen satelital entregada por el mandante clasificando según lo observado se determinó si la presencia de actividad antrópica es importante, poco importante o nula.



- **Caídas declaradas en la ladera, f(5):** de acuerdo a la geología e observación de imágenes satelitales se determinaron las laderas que presentan bloques caídos o alguna evidencia de este proceso.
- **Material, f(6):** basado en la geología se seleccionaron todas las unidades de roca.

Cada uno de estos factores es representado distintos ráster, donde cada celda tiene un valor asignado según el (CUADRO N° 4-4), y la suma de estos factores, multiplicado por este ponderador f_6 entrega el valor del IS. Al igual que en el caso de caída de rocas, se establece un factor de seguridad e 1,2, el cual asigna una susceptibilidad importante a unidades con un $IS \geq 40$. De esta forma es que se definen tres grados de susceptibilidad:

- **Susceptibilidad Muy Alta de deslizamiento en roca:** unidades con IS entre 50 y 100.
- **Susceptibilidad Alta de caída de deslizamiento en roca:** unidades con IS entre 40 y 50.
- **Susceptibilidad Moderada de deslizamiento en roca:** unidades con IS entre 25 y 40.

CUADRO N° 4-4: Factores condicionantes de deslizamientos en roca.

Factor	Especificaciones	Rangos	%
Pendientes de laderas (f ₁)		15° 20°	11
		20° 25°	15
		25° 30°	20
		30° 40°	25
		40° 60°	30
		> 60°	35
Características geológicas-geotécnicas del material (f ₂)	Condiciones muy favorables son alto fracturamiento, meteorización y presencia de agua en el macizo. La orientación de fracturas permite determinar el tipo de deslizamiento. RMR >30 es una condición muy favorable	Muy favorable	35
		Favorable	28
		Medianamente favorable	18
		Poco favorable	11
		Muy poco favorable	4
Acumulación de nieve (f ₃)	Según estacionalidad	Estacional	5
		Siempre	2
		Esporádica	1
		Nula	0
Desestabilización artificial de laderas (f ₄)	Por ejemplo, cortes artificiales en laderas, construcción de terraplenes, etc	Importante	5
		Poco importante	3
		No observado	0
Deslizamientos declarados en la ladera (f ₅)	Información escrita y/u observación de superficies de deslizamiento	Presente	15
		Sin antecedentes	5
		No observado	0
Tipo de material (f ₆)		Suelo	0



	Suelo no está en estudio, por lo tanto, pondera por 0 al resto de los factores	Roca (<1-1,5 m de suelo)	1
--	--	--------------------------	---

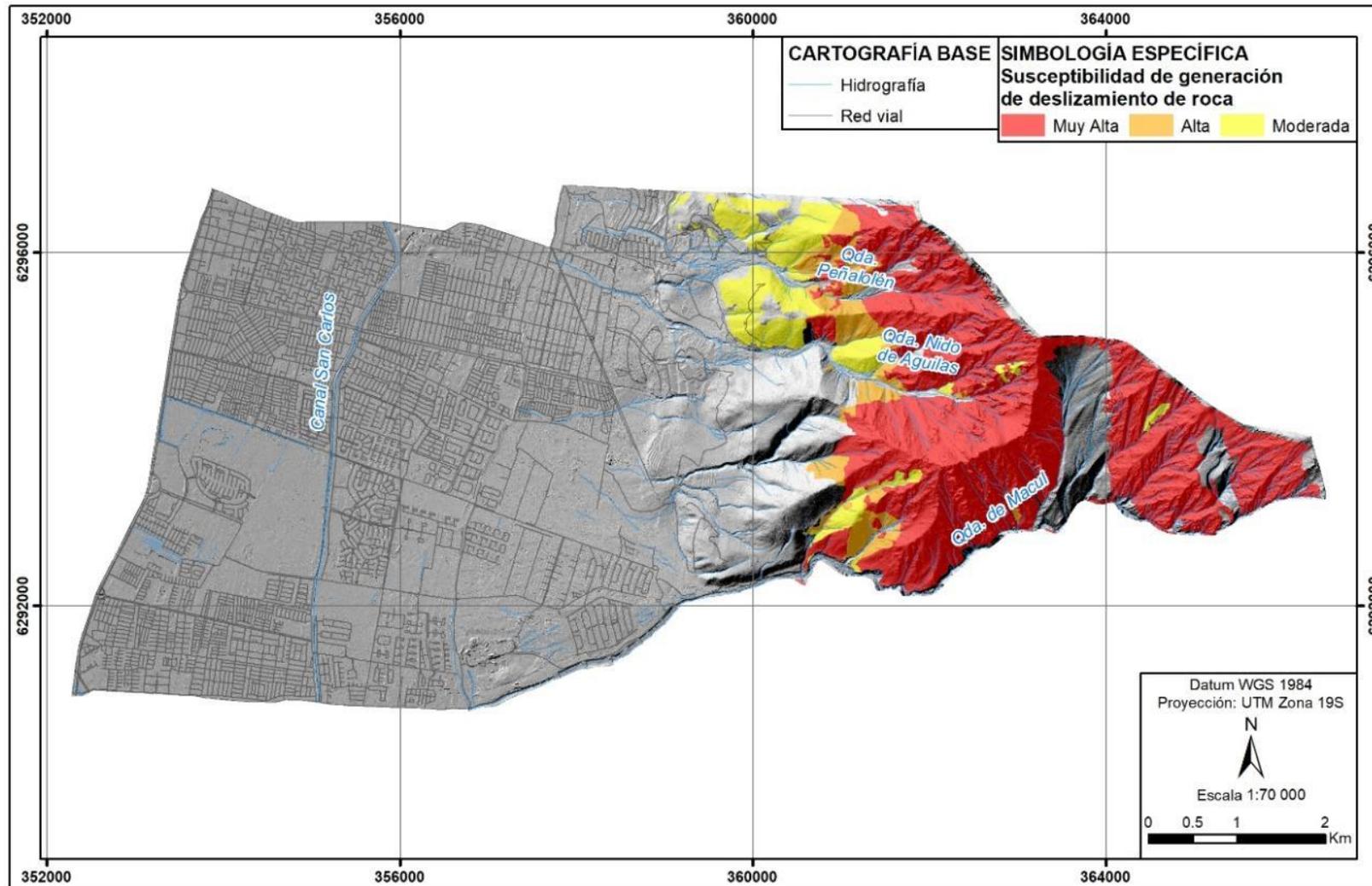
Fuente: Modificado de Lara (2007).

La escala de trabajo para el mapa de susceptibilidad de inundación por desborde de cauces fue de 1:5.000.

En este informe se añaden figuras a una escala de representación gráfica de 1:70.000, (FIGURA N° 4-4) y un plano a escala 1:10.000 fuera de texto.



FIGURA Nº 4-5:
Mapa representativo de la zonificación de generación de deslizamiento de roca en la comuna.



Fuente: elaboración propia.

4.4.2.3. Deslizamiento de suelo

Al igual que en los otros procesos de ladera recién mencionados, el máximo valor que puede tomar cada uno de los factores condicionantes se muestra en el (CUADRO N°4-2), sin embargo, en el (CUADRO N° 4-5), se muestra el desglose de ellos en distintos rangos dependiendo de las condiciones que presenta la unidad estudiada (Lara M. , 2007).

Para calcular el índice de susceptibilidad de este tipo de remoción, existen nueve factores condicionantes a considerar (f_1 al f_9), que se suman y un ponderador (f_{10}) que se multiplica (CUADRO N° 4-5). Al deslizamiento en suelo, cualquier unidad asociada a roca tendría que tener un $IS=0$, de esta manera es que este último ponderador, $f_{10}= 0$ si la unidad es roca y $f_6=1$ si la zona representa una unidad geológica no consolidada o suelo, por lo tanto, el Índice de Deslizamiento en suelo se calcula como:

$$IS_{Deslizamiento\ en\ suelo} = \left(\sum_{i=1}^9 f_i \right) \cdot f_{10}$$

Los criterios que se usaron para clasificar en rangos cada uno de estos, fueron los siguientes:

- **Pendientes de laderas, f(1):** se obtuvo un mapa (raster) de pendientes a partir del DEM entregado por el mandante, donde a cada rango se le asignó el IS de acuerdo al (CUADRO N° 4-5).
- **Exposición al sol, f(2):** se obtuvo un mapa (raster) de orientación de las laderas donde las que son más susceptibles a generar deslizamientos de suelo son las de orientación norte, mientras las que menos susceptibles son las con orientación sur (CUADRO N° 4-5).
- **Características geológicas geotécnicas, f(3):** las unidades que pueden generar este tipo de remoción son principalmente las unidades depósitos no consolidados con un alto desarrollo de suelo, donde las zonas más favorables son las que presentan abundante material suelto, menor cantidad de vegetación, laderas con que presentan varias quebradas, mientras que más menos favorables son las laderas con abundante vegetación, sin material suelto presente y pocas quebradas. Los criterios para determinar los rangos se basaron en las observaciones y caracterizaciones realizadas por Celis Saez (2018) y Lara M (2007), observación de imágenes satelitales, topografía entregada por el mandante y experiencia y criterio del experto a cargo.
- **Acumulación de nieve, f(5):** se realizó una división de acuerdo a la altura sobre el nivel del mar, dividiendo la comuna en tres, una zona entre los 586 y 1000 m.s.n.m, donde la presencia de nieve es prácticamente nula, entre los 1000 y 1500 donde cae nieve esporádicamente y sobre los 1500, sería estacional, que corresponde a la altura de línea de nieve (Garreaud & Rutllant, 1996).

- **Cobertura vegetal f(6):** se realizó una división de la cobertura vegetal de acuerdo a lo observado en la imagen satelital entregada por el mandante.
- **Desestabilización artificial de las laderas, f(7):** se seleccionaron las laderas intervenidas antrópicamente mediante imagen satelital entregada por el mandante clasificando, según lo observado, se determinó si la presencia de actividad antrópica es importante, poco importante o nula.
- **Deslizamientos en la unidad geomorfológica, f(8):** de acuerdo a las unidades geomorfológicas y observación de imágenes satelitales se determinaron las unidades que tengan evidencias y/o antecedentes de que haya ocurrido este tipo de proceso.
- **Deslizamientos en la unidad geológica de suelo f(9):** de acuerdo a la geología, descripción de las unidades de suelo realizadas por (Celis Saez , 2018) y observación de imágenes satelitales se determinaron las laderas que tengan evidencias y/o antecedentes de que haya ocurrido este tipo de depósitos.
- **Material, f(10):** basado en la geología se seleccionaron todas las unidades de suelo, incluyendo las unidades de roca de la formación abanico que presente algún desarrollo de suelo.

Cada uno de estos factores es representado distintos ráster, donde cada celda tiene un valor asignado según el (CUADRO N° 4-5) y la suma de estos factores, multiplicado por este ponderador f_{10} entrega el valor del IS. Al igual que en los casos anteriores, se establece un factor de seguridad de 1,2, el cual asigna una susceptibilidad importante a unidades con un $IS \geq 40$. De esta manera es que se definen tres grados de susceptibilidad:

- **Susceptibilidad Muy Alta de deslizamiento en suelo:** unidades con IS entre 50 y 100
- **Susceptibilidad Alta de caída de deslizamiento en suelo:** unidades con IS entre 40 y 50
- **Susceptibilidad Moderada de deslizamiento en suelo:** unidades con IS entre 25 y 40

CUADRO N° 4-5: Factores condicionantes de deslizamientos en suelo.

Factor	Especificaciones	Rangos	%
Pendientes de laderas (f_1)		15° 20°	9
		20° 25°	15
		25° 30°	21
		30° 40°	26
		> 40°	30
Exposición al sol (f_2)	Alta: laderas mirando al N	Alta	5



Factor	Especificaciones	Rangos	%
	Parcial: laderas mirando al E-W Bajo: laderas mirando al S	Parcial	3
		Baja	1
Características geológicas-geotécnicas del material (f ₃)	Condiciones muy favorables son baja densidad, baja resistencia, alta cantidad de finos en su composición. Además de la estructura y estratificación del suelo, junto con la alta meteorización y alteración	Muy favorable	20
		Favorable	14
		Medianamente favorable	10
		Poco favorable	6
		Muy poco favorable	2
Condiciones de humedad y saturación (f ₄)	Alta saturación y almacenaje son favorables para la generación de deslizamientos. Relación del nivel freático y el espesor del suelo cercana a 0 es muy favorable	Muy poco favorable	10
		Favorable	7
		Poco favorable	3
		Sin antecedentes	2
Acumulación de nieve (f ₇)	Según estacionalidad	Siempre	5
		Estacional	2
		Esporádica	1
		Nula	0
Cobertura vegetal (f ₈)	Densidad en la ladera	Nula a baja	5
		Moderada	2
		Alta	0
Desestabilización artificial de laderas (f ₇)	Por ejemplo, cortes artificiales en laderas, construcción de terraplenes, etc	Importante	10
		Poco importante	5
		No observado	0
Deslizamientos en la unidad geomorfológica (f ₈)	Información escrita y/u observaciones de escarpes y superficies de deslizamiento	Presente	10
		Sin antecedentes	3
		No observado	0
Deslizamientos en la unidad geológica de suelo (f ₉)	Información escrita y/u observaciones de escarpes y superficies de deslizamiento	Presente	5
		Sin antecedentes	2
		No observado	0
Tipo de material (f ₁₂)	Roca no está en estudio, por lo tanto, pondera por 0 al resto de los factores	Suelo	1
		Roca	0

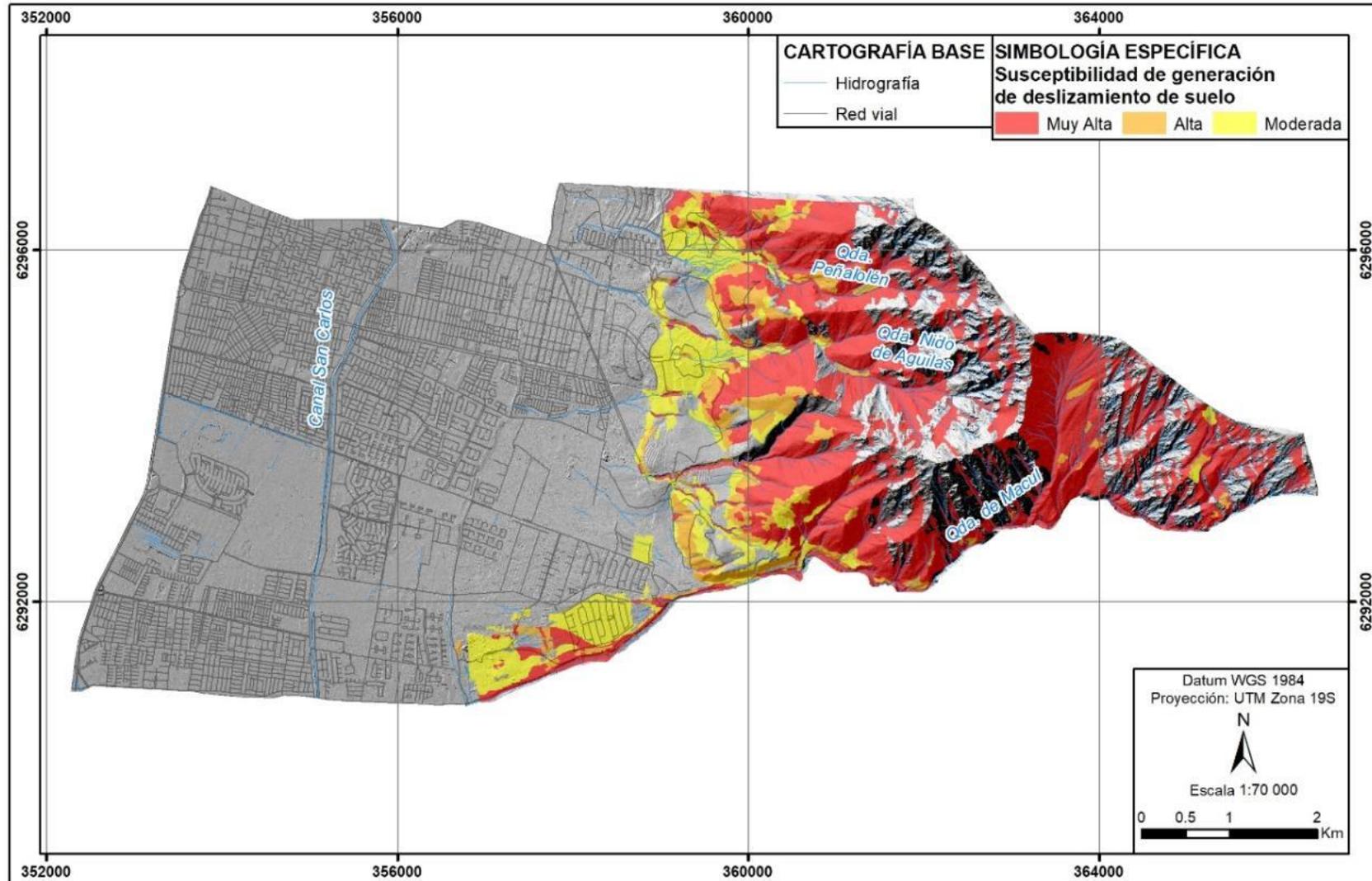
Fuente: Celis Saez (2018), modificado de Lara (2007).

La escala de trabajo para el mapa de susceptibilidad de inundación por desborde de cauces fue de 1:5.000.

En este informe se añaden figuras a una escala de representación gráfica de 1:70.000 (FIGURA N°4-6) y un plano a escala 1:10.000 fuera de texto.



FIGURA N° 4-6: Mapa representativo de la zonificación de generación de deslizamiento de suelo en la comuna.



Fuente: Elaboración propia.

5. SISMICIDAD

El contexto geodinámico de subducción, dado por la convergencia entre las placas de Nazca y Sudamericana, posiciona al territorio chileno sobre un borde tectónicamente activo que ha caracterizado la historia sísmica del país. El fenómeno de convergencia entre las placas oceánica y continental produce un alto nivel de acoplamiento mecánico en la zona de contacto interplaca, lo que genera acumulación de energía elástica que posteriormente es liberada generando grandes terremotos. Los sismos presentan una clara distribución espacial, donde existe una banda sísmica activa muy angosta (100-150 Km de ancho) y profundidad variable (5-150 Km de profundidad) entre la fosa Perú-Chile, al oeste, y la Cordillera de los Andes, al este.

5.4. TIPOS DE SISMOS

Existen cuatro tipos de sismos tectónicos que afectan al territorio chileno, los cuales se distribuyen espacialmente segregándose en franjas paralelas de orientación aproximada NS. Estas fuentes sismogénicas, de oeste a este son: *outer-rise*; interplaca tipo *thrust*; intraplaca de profundidad intermedia; y corticales (Ver ANEXO 8.2.3.1.1).

A la latitud de la zona de interés, el contacto entre las placas se extiende desde la fosa hasta unos 35-51kms., de profundidad (Tichelaar & Ruff, 1993; Hayes, Wald, & Johnson, 2012). Es en esta zona donde se localizan la mayoría de los hipocentros de los terremotos que han ocurrido en la zona central del país. Entre este tipo de terremotos destacan: 1730, 1906 y 1985; cuyos largos de ruptura se ilustran en la (FIGURA N° 5-1). Adicionalmente, el área de estudio ha sido afectada por sismos intraplaca de profundidad intermedia, tales como los de 1647, 1965 y 1971. A partir de la sismicidad registrada por la red sismológica internacional se puede visualizar la distribución de las cuatro fuentes que se describen a continuación (FIGURA N° 5-2).

Antes de 1960, el registro de los sismos no tenía la precisión que trajeron los sismómetros modernos, por lo tanto, no existe información exacta para determinar las características de los terremotos previos a esa fecha. Así, las rupturas de los terremotos anteriores son estimaciones, a partir de datos históricos y la intensidad de los daños provocados, según la metodología propuesta por Kausel & Ramírez (1992). En el (CUADRO N°5-1: Datos de terremotos históricos con subducción con magnitud superior a 7.5 cuya zona de ruptura coincide con el área de estudio.

CUADRO N°5-1: Datos de terremotos históricos con subducción con magnitud superior a 7.5 cuya zona de ruptura coincide con el área de estudio.

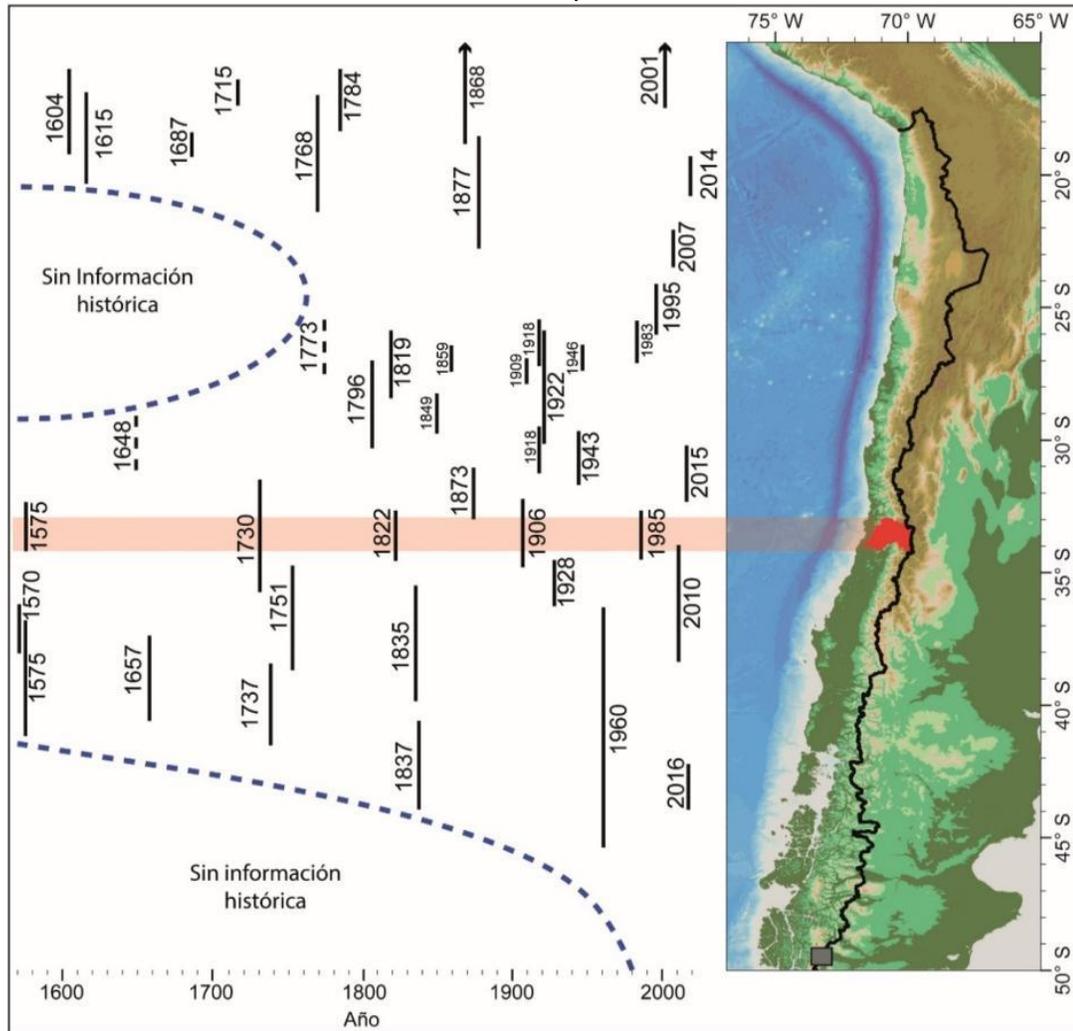
Latitud	Longitud	Profundidad	Magnitud Aprox.	Año	Mes	Día
-33.40	-70.06	-	7.5	1575	03	17
-33.05	-71.63	-	8.9	1730	07	07
-33.05	-71.60	-	8.4	1822	11	19



-33 ≈	-72.00	25	8.2	1906	08	16
-32.01	-71.17	68 km	7.6	1965	03	28
-32.45	-71.57	60	7.7	1971	07	08
-33.20	-71.80	33	8.0	1985	03	03

Fuente: Elaboración propia en base a Kausel & Ramírez (1992).

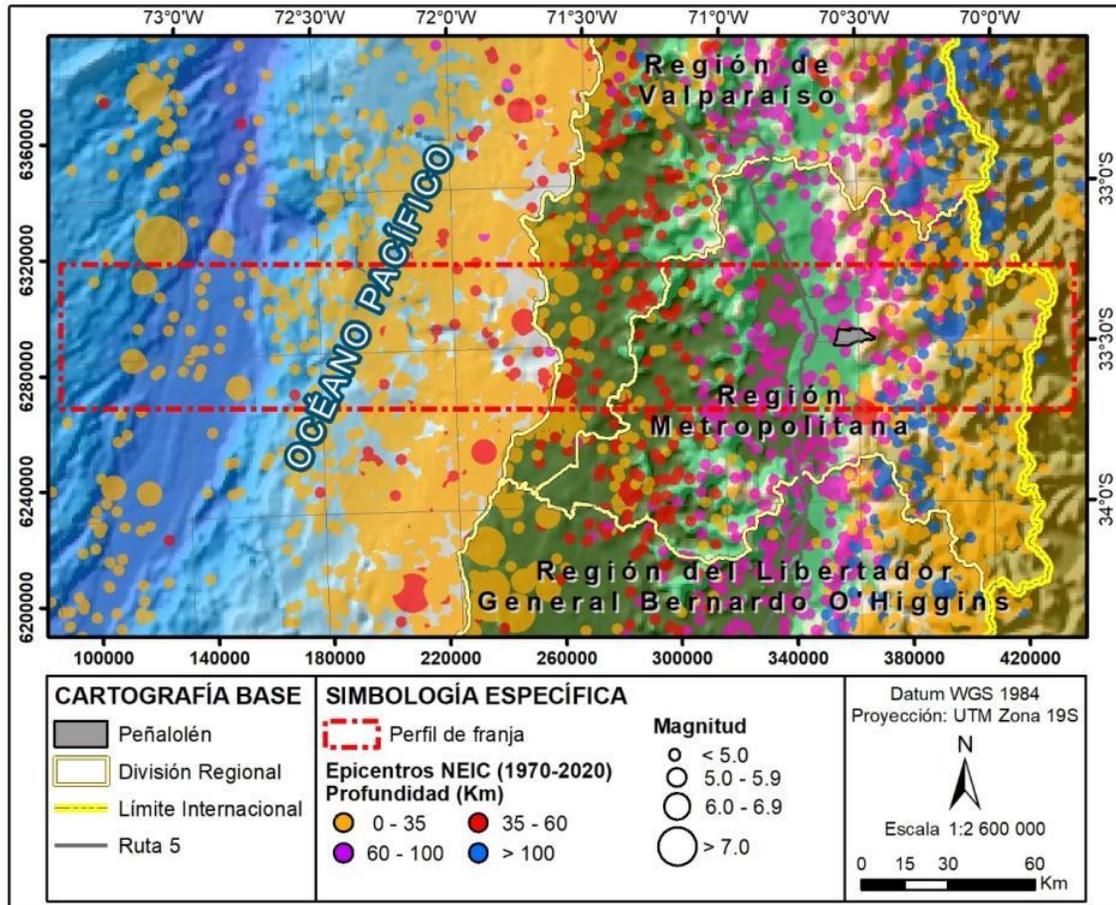
FIGURA N° 5-1: Terremotos de subducción históricos con magnitud estimada y calculada mayor a 7.2 y sus respectivas áreas de ruptura.



Fuente: Elaboración propia.



FIGURA N° 5-2: Mapa regional del contexto del área de estudio con los epicentros de la sismicidad registrada de magnitud superior a 2,5 entre 1970 y 2020, según el Catálogo NEIC.



Fuente: Elaboración propia en base al catálogo NEIC

En la (FIGURA N° 5-2), se pueden observar cuatro franjas subparalelas de orientación aproximada norte-sur, donde se concentran sismos con hipocentros a diferentes profundidades. En el océano, al extremo oeste de la figura, se emplazan los sismos con fuente *outer-rise*. En la costa, donde hay una mayor concentración de puntos, se ubican los sismos con fuente interplaca tipo *thrust*. Luego, continente adentro, donde se desarrolla la Depresión Central y la Cordillera Principal, la fuente sísmica que denomina es interplaca de profundidad intermedia. Adicionalmente, en la zona cordillerana, de forma mucho más dispersa y generalmente de baja magnitud, se generan sismos someros de fuente cortical. Los sismos *outer-rise*, interplaca tipo *thrust*, intraplaca de profundidad intermedia y corticales son claramente distinguibles a lo largo una franja oeste-este, de 50 x 350 km², que incluye el área de estudio (FIGURA N° 5-3). Las observaciones que se pueden realizar en la franja espacial entre los 32° y 34°S son las siguientes:

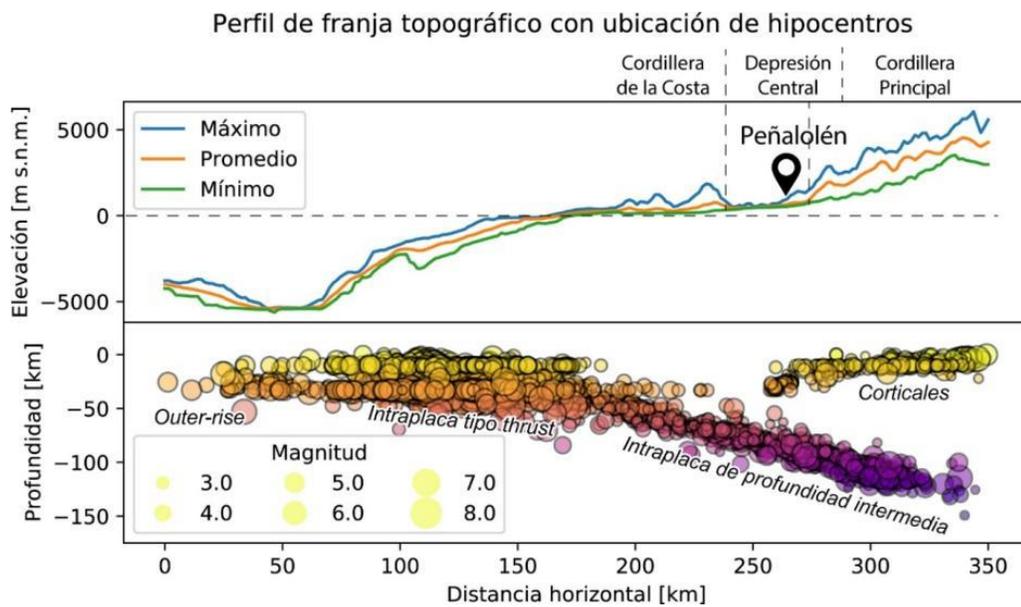
1. La mayor concentración de sismicidad en el periodo registrado por el catálogo de la **National Earthquake Information Center (NEIC)**, se dispone en la línea paralela a la costa y gran parte de estos sismos tienen hipocentros a menos de 35 km de profundidad. Son estos terremotos los que

se genera en el contacto de las placas, de Nazca y Sudamericana, es decir, corresponden a sismos interplaca tipo *thrust*. Ejemplo más reciente y cercano de estos sismos fue el terremoto de 1985, de magnitud 8.0 Mw a 33 km de profundidad según el CSN.

2. En la zona central, donde se ubican los valles transversales al norte y la Depresión Central a la latitud de Santiago, la densidad de los sismos es menor que los terremotos interplaca y ocurren a una profundidad que aumenta de oeste a este entre 60 y 100 Km. Estos sismos corresponden a la fuente sísmica intraplaca de profundidad intermedia. Dentro de esta categoría destacan los terremotos de 1965 y 1971 con profundidades entre 60 y 70 Km y magnitudes 7.6 Mw y 7.7 Mw, respectivamente. Estos eventos afectaron fuertemente a la Región Metropolitana.
3. En el ámbito de la cordillera de los Andes tiene lugar la sismicidad de tipo cortical que, aunque mucho más escasa y dispersa que las otras fuentes, se asocia con la deformación actual del macizo montañoso. Un ejemplo de este tipo de sismos fue el Terremoto de las Melosas del 4 de septiembre de 1958 (7.0Mw) que sacudieron el área del Cajón del Maipo. Particularmente, el territorio comunal es atravesado por la Falla San Ramón, una falla cortical con capacidad de generar sismos superficiales.

En resumen, el área de estudio se encuentra expuesta a la ocurrencia de tres tipos de sismos observables en la (FIGURA N°5-3), (1) sismos interplaca tipo *thrust*; (2) sismos intraplaca de profundidad intermedia, (3) sismos corticales.

FIGURA N° 5-3: Perfil de franja topográfica sobre localización de hipocentros sísmicos a lo largo de una franja de 50 km de ancho por 350 km de largo demarcada con rectángulo punteado en la FIGURA N° 5-2. (Notar diferencia en escala vertical de ambos gráficos).



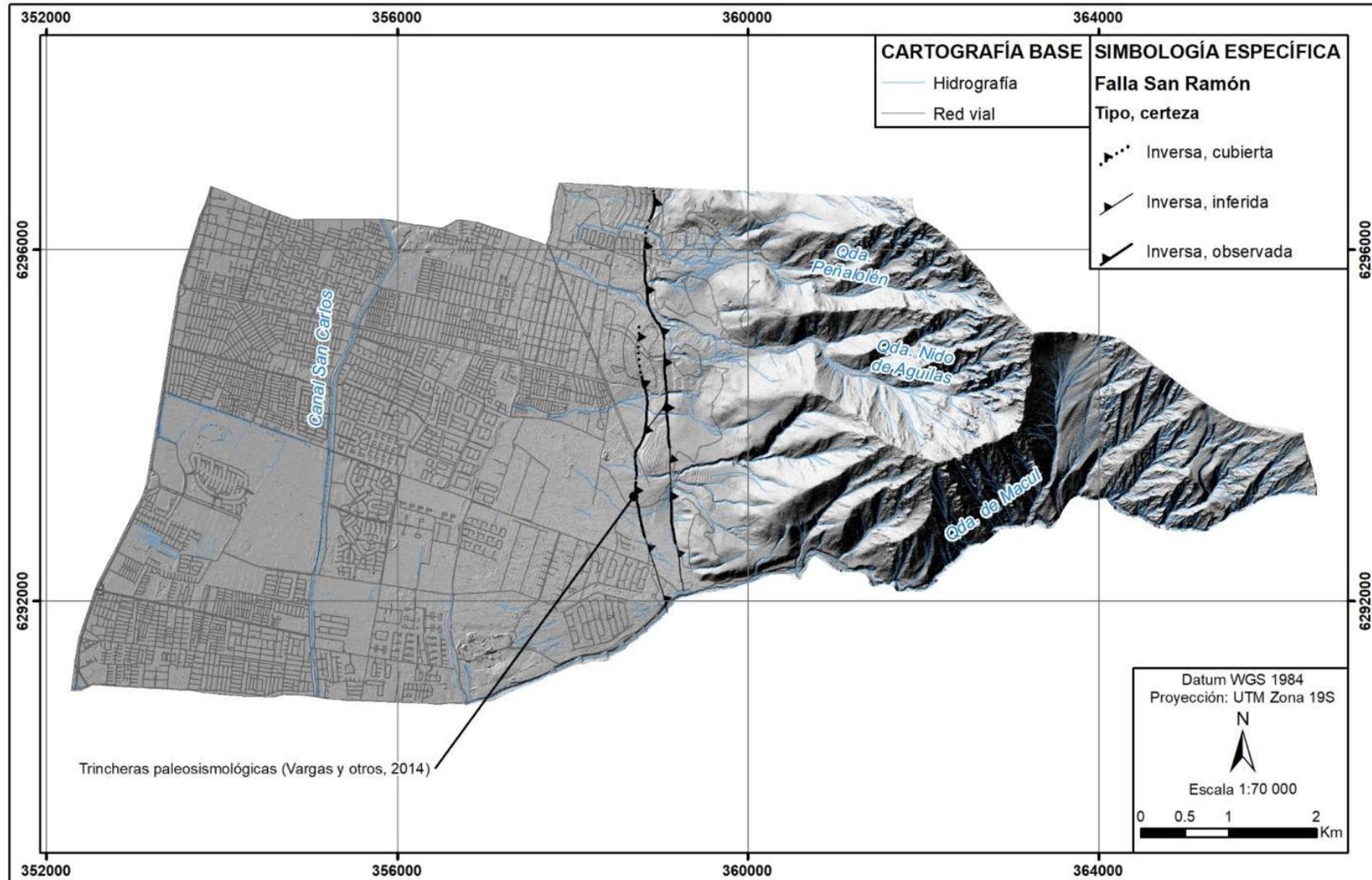
Como se detalló en la línea de base geomorfológica, la comuna de Peñalolén se ubica en el límite entre la Cordillera Principal y la Depresión Central, zona que se conoce como frente cordillerano occidental. El frente cordillerano oriental está caracterizado por la ocurrencia de fallas inversas que alcanzan la cordillera respecto a la depresión central, lo anterior, está evidenciado por morfologías como escarpes de falla, terrazas fluviales deformadas, abanicos aluviales cortados por falla y estructuras como pliegues y fallas secundarias que afectan tanto a rocas como a depósitos no consolidados, lo que corresponde a evidencias geológicas de fallas activas (Rauld R. , 2002; Armijo R. , y otros, 2010; Rauld R. , 2011).

En el frente cordillerano occidental, la falla más estudiada corresponde a la Falla San Ramón que limita el valle de la Depresión Central con el frente cordillerano. Se prolonga por lo menos desde unos 10-12 km. de profundidad en la corteza hasta la superficie del territorio. Su trazado ha sido definido geomorfológicamente extendiéndose por más de 35-40 km a lo largo de su traza, o ubicación en superficie, desde el Río Mapocho al sur del Río Maipo, (Rauld R. , 2002; Rauld, y otros, 2006; Armijo R. , y otros, 2010). La traza de los distintos segmentos de la Falla San Ramón en la comuna de Peñalolén se ilustra en la (FIGURA N°5-4).

El movimiento de esta falla es inverso, es decir, que provoca que el frente cordillerano se monte sobre el valle. Esta falla es sísmicamente activa y ha producido el levantamiento de la Cordillera Principal formando un gran acantilado que se eleva sobre Santiago durante los últimos millones de años (Armijo R., y otros, 2010; Rauld R., 2002; Rauld R., 2011; Pérez, y otros, 2010; Riesnier, y otros, 2017; Vargas, y otros, 2014; Pérez A. , y otros, 2014).



FIGURA N° 5-4: Traza de la Falla San Ramón en la comuna de Peñalolén.



Fuente: Elaboración propia.

5.2. CATASTRO DE SISMOS

A continuación, se identifica una gran cantidad de sismos que han ocurrido en una zona que pueden sentirse o producir efectos en el área de estudio. Estos registros son el resultado de recopilaciones históricas y de registros instrumentales, principalmente con base en Urrutia & Lanza (1993) y Petit-Breuilh (2004).

Terremoto del 13 de Mayo de 1647: La ciudad de Santiago quedó prácticamente arruinada. Los efectos del terremoto abarcaron desde los ríos Limarí y Choapa por el norte y hasta Cauquenes y Maule por el sur.

Terremoto de 22 de Julio de 1687: De intensidad aproximada de VII. Su epicentro se ubica entre San Felipe y La Ligua, con latitud entre los 32° y 34° sur. Daños en convento en San Felipe y daños en Santiago.

Terremoto del 8 de Julio de 1730 (M ≈ 8.9): Es considerado uno de los mayores sismos que han afectado el territorio de Chile, con magnitud estimada entre 8.5 y 9. Produjo daños entre La Serena-Coquimbo y Chillán. Grandes daños en San Felipe, Tiltil y Renca. Y un maremoto que afectó la zona centro y sur de Chile.

Terremoto del 19 de Noviembre de 1822: Sismo que fue sentido desde Illapel hasta Chiloé. Valparaíso y Quillota fueron afectados, falleciendo en la primera 66 personas. En Santiago no se registraron personas muertas.

Terremoto del 2 de Abril de 1851: Terremoto que causó daños de consideración en Valparaíso y Santiago, dejando una decena de muertos y varios heridos. Grandes daños se registraron en el pueblo de Renca y Pudahuel.

Terremoto del 7 de Julio de 1873: El terremoto afectó la zona central del país produciendo los mayores daños en Petorca, la Ligua y los alrededores. Daños menores en Santiago y Valparaíso.

Terremoto del 16 de Agosto de 1906 (M=8.2): El epicentro de este terremoto se ubicó entre Limache y Valparaíso. Hubo más de dos mil personas fallecidas. En Santiago se registraron daños de consideración. Hubo levantamientos de terreno en la costa.

Terremoto del 14 de Abril de 1927: Terremoto de intensidad IX. El epicentro fue entre los volcanes Tupungato y Aconcagua. Las zonas afectadas fueron Santiago, San Felipe, Los Andes, Mendoza. El sismo produjo grandes daños, pérdidas humanas y heridos.

Terremoto del 28 de Marzo de 1965 (M =7.6): El epicentro se encontró en la comuna de la Ligua. La profundidad del foco fue de 50 a 60 km. En Santiago murieron dos personas.

Terremoto del 8 de Julio de 1971 (M =7.75): Afectó principalmente las zonas de Coquimbo, Aconcagua, Valparaíso y Santiago.

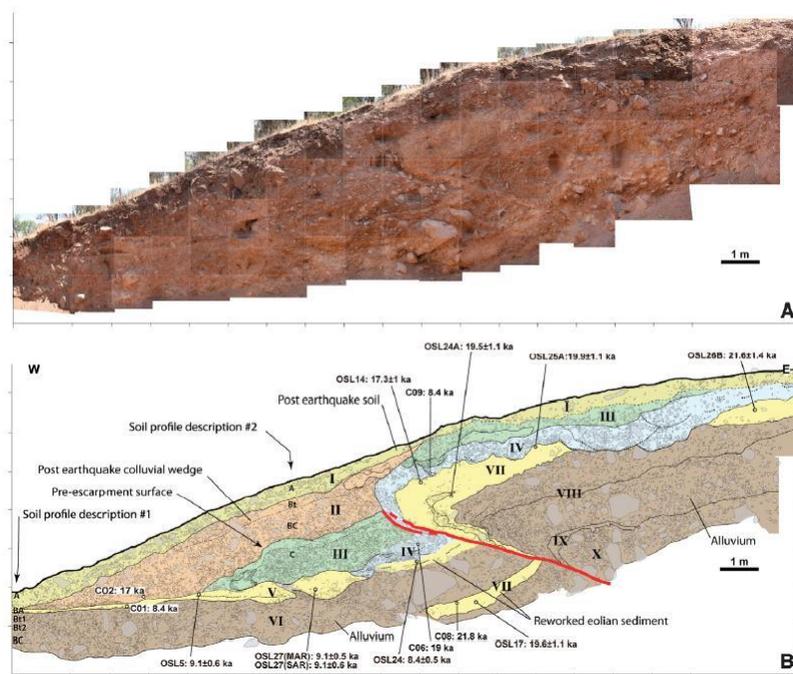
Terremoto del 3 de Marzo de 1985 (M =7.7): El movimiento se sintió desde la III y IX región. Con este terremoto hubo destrucción de viviendas que causaron víctimas fatales, destrucción de pavimentos, caída de puentes.

5.3. DIAGNÓSTICO

El estudio “Riesgo y Modificación PRMS Falla San Ramón”, que buscaba proponer una modificación en función a los riesgos que la falla genera en su área de influencia, a fin de modificar el Plan Regulador Metropolitano de Santiago; se realizaron trincheras perpendiculares a la traza de la falla, al norte de la quebrada de Macul, las cuales han permitido precisar las observaciones respecto de la manifestación en superficie de esta estructura.

En ese contexto, se realizó un estudio de paleosismología, cuyos resultados fueron publicados en Vargas y otros (2014). Los registros paleosismológicos han permitido observar directamente estratos del suelo de Santiago afectados por esta estructura (FIGURA 5-5), demostrando que es una falla activa que representa dos tipos de amenaza para la ciudad; por una parte, la posibilidad de ruptura en superficie a lo largo de su traza, y por otra, la posibilidad de fuertes intensidades en sus inmediaciones (Vargas, y otros, 2014).

FIGURA N° 5-5: Trinchera paleosismológica en la Falla San Ramón, para ubicación ver . A) Excavación limpia. B) Interpretación geológica y paleosismológica (en rojo se destaca la falla cortando las capas geológicas).



Fuente: Vargas y otros (2014).

Se encontró evidencia de dos episodios de gran magnitud ($M_w = 7,2-7,5$) asociados a la Falla San Ramón ocurridos en los últimos 17.000 años y el último hace unos 8.000 años atrás, (Vargas, y otros, 2014). De acuerdo con estos mismos antecedentes, como se menciona en Easton y otros (2018), en cada uno de estos terremotos la propagación de la ruptura a lo largo de la falla movió del orden de 4 a 5m. el bloque oriental de la corteza terrestre respecto del occidental, levantando de 2 a 3m., el bloque cordillerano por sobre el valle de Santiago, impactando así directamente la superficie. Esta evidencia ha mostrado que la Falla San Ramón ha producido ruptura superficial, con desplazamiento vertical, y que es capaz de acumular esfuerzos tectónicos y producir, por sí misma, terremotos mayores. Estos terremotos serían del tipo “Sismos corticales o superficiales”, los cuales tienen un efecto mucho más local que los otros tipos de sismos (de interplaca y de intraplaca de profundidad intermedia), pero que pueden ser muy destructivos en las cercanías del epicentro. Además, a partir del estudio de los registros sísmicos de dos estaciones cordilleranas entre los años 2001 y 2011 se detectaron sismos de baja magnitud ($M_w 3-4$), imperceptibles para las personas, pero compatibles con la estructura geológica de la Falla San Ramón (Pérez A. , y otros, 2014). También se desplegó, durante un año, una red de monitoreo temporal en el valle de Santiago que permitió la detección de sismos menores que también ha sugerido la ocurrencia de sismicidad activa asociada a esta falla (Estay, Yañez, Carretier, Lira, & Maringue, 2016).

En el Informe del Estudio; “**Riesgo y Modificación PRMS Falla San Ramón**” (SEREMI MINVU, 2012), se menciona que la observación de las trincheras evidenció que la traza o expresión en superficie de esta falla se alcanza en la base o sector medio de los escarpes.

En ese mismo estudio y como se resume en el Informe de la Comisión Especial Investigadora de los Actos del Gobierno sobre Permisos de Construcción para Instalar Proyectos Inmobiliarios y Otras Infraestructuras sobre la Faja de Ruptura Superficial a lo largo de la Falla Geológica de San Ramón (Ce1 57), (Cámara de Diputados, 2021), se destacan los siguientes puntos en relación a lo que se ha determinado sobre la Falla San Ramón y su implicancia en la planificación territorial:

- La falla de San Ramón es una falla activa y que su trazado cruza las comunas de Vitacura, Las Condes, La Reina, Peñalolén, La Florida y Puente Alto, arrojando evidencias de que también podría alcanzar las comunas de Lo Barnechea y Pirque.
- El terremoto que podría originar la Falla San Ramón es de características distintas de los terremotos de subducción (de interplaca y de intraplaca de profundidad intermedia) que, si bien puede tener menor magnitud, podría generar movimientos del suelo mucho mayores y también ruptura en superficie.
- El efecto sísmico de la activación de la Falla es mayor que el establecido en la Norma Chilena de la Construcción (NCh433), en un área extensa de la ciudad de Santiago, que no estaría regulado en el ámbito nacional en la actualidad.

Por otro lado, en la resolución exenta N°1373 de SEREMI MINVU Región Metropolitana², de 02 de noviembre de 2021, se resuelve que **“se dé inicio a la elaboración de los antecedentes y estudios necesarios para la modificación del Plan Regulador Metropolitano de Santiago, con el objetivo de definir normas técnicas acordes a la identificación de un Área de Riesgo- conforme al núm. 3 del Artículo 2.1.17 de la OGUC - en una parte del sector oriente de la Región Metropolitana de Santiago debido a la presencia de la denominada falla geológica Falla San Ramón, la que dada su actividad constituye un peligro potencial a los asentamientos humanos”**.

Por lo tanto, en concordancia con lo que ya se ha planteado, y debido al carácter intercomunal de la Falla San Ramón, se insiste en la importancia de reconocer esta estructura geológica en el Plan Regulador Metropolitano de Santiago, como primer paso para normar las áreas de riesgo relacionadas con fallas corticales en el país.

Las fuentes sísmicas descritas con anterioridad generan terremotos que afectan al territorio a una escala regional. En particular, los sismos interplaca que corresponden a los que ocurren con mayor frecuencia y magnitud y se encuentran considerados en la norma sísmica. Sin embargo, respecto a los sismos intraplaca de profundidad intermedia, no se tiene suficiente información debido a que son escasos y, por ende, en el marco de este estudio a escala de detalle esta amenaza tampoco es zonificable.

En conclusión, el área de estudio se encuentra expuesta a la amenaza sísmica de tres fuentes sismogénicas. Sin embargo, en el caso de los sismos interplaca e intraplaca de profundidad intermedia, el alcance de este estudio a escala de detalle de 1:1.000 no permite que se pueda zonificar esta amenaza a la escala urbana.

Para los efectos de los sismos corticales, no existe información suficiente para hacerlo, y se requieren estudios específicos al respecto como los que se iniciarán según la Res. Exenta N°1373 de la SEREMI MINVU.

² Resolución exenta N° 1373 de Departamento de Desarrollo Urbano e Infraestructura, SEREMI MINVU Región Metropolitana, resuelve iniciar la elaboración de los antecedentes y estudios necesarios para la modificación del Plan Regulador Metropolitano de Santiago, MPRMS 132 – Área de riesgo falla San Ramón.

6. VOLCANISMO

Chile se dispone en la zona de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, en la costa occidental del Océano Pacífico, que se caracteriza por concentrar una intensa actividad sísmica y volcánica en las zonas que abarca. En particular, el área de estudio se ubica en el extremo norte del segmento denominado Zona Volcánica Sur (ZVS) desarrollado a lo largo de 1400km., del margen andino, desde los 33,3°S (Volcán Tupungatito), hasta los 45,9°S (Volcán Hudson).

6.1. CATASTRO

El área de estudio abarca parte del sector cordillerano de la Región Metropolitana, por tanto, corresponde a una de las zonas urbanas relativamente cercanas a centros volcánicos del Gran Santiago. Existen tres volcanes considerados activos por el SERNAGEOMIN en la región, estos son: Volcán Tupungatito, Complejo Volcánico San José, y Volcán Maipo, de los cuales solo los dos primeros se encuentran monitoreados por la Red Nacional de Vigilancia Volcánica. Estos tres volcanes tienen las características que se resumen en el (CUADRO N° 6-1).

CUADRO N° 6-1: Volcanes activos de la región metropolitana.

Volcán	Tipo de Volcán	Coordenadas		Ranking de Peligrosidad ³	Distancia área de estudio
		Longitud	Latitud		
Tupungatito	Estratovolcán	-69.802	-33.401	22	60 Km
San José	Estratovolcán	-69.894	-33.790	21	68 Km
Maipo	Estratovolcán	-69.828	-34.166	47	106 Km

Fuente: Red Nacional de Vigilancia Volcánica (2015).

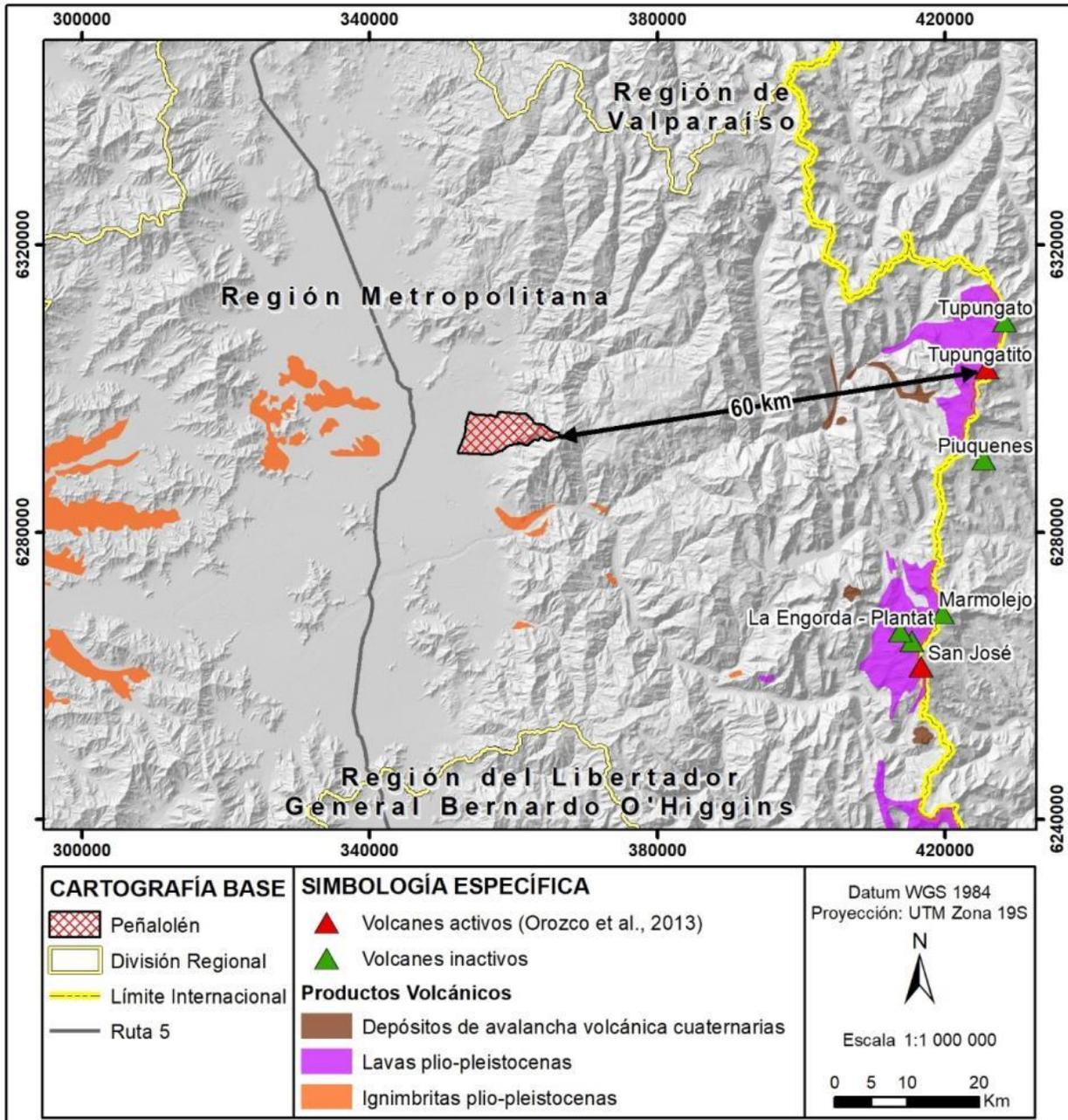
Además de estos tres centros volcánicos, existen otros inactivos: (Tupungato, Cerro Negro, Piuquenes, Marmolejo, La Engorda), que se muestran en la (FIGURA 6-1). Al norte de los 33° el segmento volcánico no presenta actividad volcánica reciente debido a su contexto geodinámico de subducción plana.

La historia eruptiva del Volcán Tupungatito, del Complejo Volcánico San José y del Volcán Maipo se presenta en el (CUADRO N° 6-2), (CUADRO N° 6-3) y (CUADRO N° 6-4), respectivamente.

³ Considera la peligrosidad, relacionada con características del volcán y sus erupciones, y la vulnerabilidad, que se asocia a factores relacionados con la población y la infraestructura que podrían ser afectados.



FIGURA Nº 6-1: Centros y depósitos volcánicos en contexto regional con la comuna de Peñalolén.



Fuente: Elaboración propia.



CUADRO N° 6-2: Historia eruptiva del volcán Tupungatito.

Fecha Inicio	Fecha Término	Certeza de la erupción	VEI	Evidencia
28/11/1987	30/11/1987	Confirmada	2	Observaciones históricas
20/01/1986	20/11/1986	Confirmada	1	Observaciones históricas
10/01/1980	11/01/1980	Confirmada	2	Observaciones históricas
02/07/1969 +- 182 d	Desconocido	Confirmada	2	Observaciones históricas
03/08/1964	19/09/1964	Confirmada	2	Observaciones históricas
05/05/1961 +- 4 d	16/08/1961 +- 15 d	Confirmada	2	Observaciones históricas
15/07/1960 +- 5 d	Desconocido	Confirmada	2	Observaciones históricas
16/10/1959	Desconocido	Confirmada	2	Observaciones históricas
26/03/1959 +- 5 d	Desconocido	Confirmada	2	Observaciones históricas
16/01/1958 +- 15 d	Desconocido	Confirmada	2	Observaciones históricas
1946	1947	Confirmada	2	Observaciones históricas
1925	Desconocido	Confirmada	2	Observaciones históricas
15/02/1907	Desconocido	Confirmada	2	Observaciones históricas
04/1901	Desconocido	Confirmada	2	Observaciones históricas
01/1897	12/04/1897	Confirmada	2	Observaciones históricas
1889	1890	Confirmada	2	Observaciones históricas
1881	Desconocido	Incierta		Observaciones históricas
1861	Desconocido	Confirmada	2	Observaciones históricas
1835	Desconocido	Incierta	2	Observaciones históricas
1829	Desconocido	Confirmada	2	Observaciones históricas

Fuente: Instituto Smithsonian, Global Volcanism Program.

CUADRO N° 6-3: Historia eruptiva del Complejo Volcánico San José.

Fecha Inicio	Fecha Término	Certeza de la erupción	VEI	Evidencia
02/07/1960 +- 182 d	Desconocido	Confirmada	2	Observaciones históricas
02/07/1959 +- 182 d	Desconocido	Confirmada	2	Observaciones históricas
1895	1897	Confirmada	2	Observaciones históricas
1889	1890	Confirmada	2	Observaciones históricas
1881	Desconocido	Confirmada	2	Observaciones históricas
1838	Desconocido	Confirmada	1	Observaciones históricas
19/11/1822	1838	Confirmada	2	Observaciones históricas

Fuente: Instituto Smithsonian, Global Volcanism Program.

CUADRO N° 6-4: Historia eruptiva del volcán Maipo.

Fecha Inicio	Fecha Término	Certeza de la erupción	VEI	Evidencia
1912	Desconocido	Confirmada	2	Observaciones históricas
1908	Desconocido	Incierta	2	-
28/10/1905	30/10/1905	Confirmada	2	Observaciones históricas
1881	Desconocido	Incierta		-
24/08/1869	Desconocido	Incierta	2	-
1837	Desconocido	Incierta		-
1835	Desconocido	Incierta		-
1833	Desconocido	Incierta	2	-
16/02/1831	Desconocido	Incierta	2	-
26/09/1829	Desconocido	Confirmada	2	Observaciones históricas
01/03/1826	Desconocido	Confirmada	2	Observaciones históricas
1822	Desconocido	Incierta		-
1788	Desconocido	Incierta		-

Fuente: Instituto Smithsonian, Global Volcanism Program.

6.2. DIAGNÓSTICO

La ausencia de material de origen volcánico que se aprecia en el mapa geológico y la (FIGURA N°6-1), indican que la comuna no ha sido afectada por actividad volcánica en tiempos recientes. Por otra parte, la amenaza volcánica asociada a erupciones de carácter explosivo extremo, como la que generó la unidad geológica conocida como Ignimbrita Pudahuel (Stern, y otros, 1994), producida por el colapso de la caldera “El Diamante” y cuyos depósitos se encuentran incluso en la Cordillera de la Costa, no son un peligro para la comuna, debido a que la mayor parte de los peligros relacionados con el volcanismo se expanden a través de los cauces, y los tres centros volcánicos más cercanos no tienen conexión hidráulica con el área estudiada.

De esta forma, el único peligro relacionado con volcanismo que realmente podría afectar al territorio estudiado es la caída de tefra. Con respecto a este peligro, debe tenerse en consideración que el viento en la zona de estudio tiene una dirección predominante hacia el noreste, lo que reduce la probabilidad de que la tefra se dirija hacia la zona estudiada, aunque no lo descarta, porque también existen épocas en que el viento se dirige hacia el suroeste y oeste. En consecuencia, aunque es posible que en caso de ocurrir una erupción deposite tefra sobre la comuna de Peñalolén, la cantidad de material que se puede acumular no debiera ser peligroso para las personas o infraestructura, por lo que a este peligro se le asigna una susceptibilidad moderada de manera homogénea en toda el área estudiada.



7. REFERENCIAS

- Aguirre, L. (1960). *Geología de los Andes de Chile Central*. Boletín N°9, Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago.
- Anderson, M., Alvarado, P., Zandt, G., & Beck, S. (2007). Geometry and brittle deformation of the subducting Nazca Plate, Central Chile and Argentina. *Geophysical Journal International*, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03483.x>.
- Antinao, J., Fernández, J., Naranjo, J., & Villarroel, P. (2003). *Mapa de Peligro de Remociones en Masa e Inundaciones en la Cuenca de Santiago 1:100.000*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago: . Obtenido de https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF/RMET-021.pdf
- Antinao, J., Naranjo, J., Iriarte, S., Fernández, C., Santibañez, I., Venegas, M., . . . Moreno, H. (2000). *Evaluación del temporal pluvial que afectó Santiago el 14 de junio de 2000*. SERNAGEOMIN. Obtenido de https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF/RMET-017.pdf
- Armijo, R., Rauld, R., Thiele, R., Vargas, G., Campos, J., Lacassin, R., & Kausel, E. (2010). The West Andean Thrust, the San Ramón Fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. *Tectonics*, 29(2).
- Armijo, R., Rauld, R., Thiele, R., Vargas, G., Campos, J., Lacassin, R., & Kausel, E. (2010). The West Andean Thrust (WAT), the San Ramón Fault and the seismic hazard for Santiago (Chile). *Tectonics*, 29(2), 1-34.
- Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. (2008). *Diagnostico de cauces sector Pie Andino, Region Metropolitana*.
- Cahill, T., & Isacks, B. (1992). Seismicity and shape of the subducted Nazca Plate. *Journal of Geophysical Research*, <https://doi.org/10.1029/92JB00493>.
- Cámara de Diputados. (2021). *INFORME DE LA COMISIÓN ESPECIAL INVESTIGADORA DE LOS ACTOS DEL GOBIERNO SOBRE PERMISOS DE CONSTRUCCIÓN PARA INSTALAR PROYECTOS INMOBILIARIOS Y OTRAS INFRAESTRUCTURAS SOBRE LA FAJA DE RUPTURA SUPERFICIAL A LO LARGO DE LA FALLA GEOLÓGICA DE SAN RAMÓN*.
- Celis Saez , C. A. (2018). *Susceptibilidad de remociones en masa y peligro de flujos en el frente cordillerano de Santiago, Región Metropolitana*. Tesis para optar al grado de magíster en ciencias, mención geología, Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago de Chile.
- Centeno, J., Fraile, M., Otero, M., & Pividal, A. (1994). *Geomorfología Práctica. Ejercicios de fotointerpretación y planificación geoambiental*. Madrid: Ed. Rueda.
- Coloma, F., Valin, X., Oliveros, V., Vásquez, P., Creixell, C., Salazar , E., & N. Ducea, M. (Mayo de 2017). Geochemistry of Permian to Triassic igneous rocks from northern Chile (28°-30°15'S): Implications on the dynamics of the proto-Andean margin. *Andean Geology*, 44(2), 147-178.
- 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* (págs. 268-317). Berlin: Springer-Verlag.



- 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), 2191-2194.
- DeMets, C., Gordon, R., Argus, D., & Stein, S. (1994). Effects of recent revisions of the geomagnetic reversal time scale on estimates on current plate motion. *Geophysical Research Letters*, 21(20), pp.2191-2194.
- DGA. (2017). *Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N°417. Realizado por: Universidad de Chile y Pontificia Universidad Católica de Chile.*
- DGA-MOP. (1995). *Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica*. Santiago: Centro de Información de Recursos Hídricos.
- Díez-Herrero, A., Laín-Huerta, L., & Llorente-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.
- Easton, G., Inzulza, J., Pérez, S., Ejsmentewicz, D., & Jiménez, C. (2018). ¿Urbanización fallada? La Falla San Ramón como nuevo escenario de riesgo sísmico y la sostenibilidad de Santiago, Chile. *Revista de Urbanismo*, 38, 1-20.
- 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.
- Estay, N., Yañez, G., Carretier, S., Lira, E., & Maringue, J. (2016). Seismic hazard in low slip rate crustal faults, estimating the characteristic event and the most hazardous zone: study case San Ramón Fault, in southern Andes. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 16, 2511-2528.
- Garreaud, R., & Rutllant, J. (1996). Meteorological analysis of debris flow in Antofagasta and Santiago de Chile during 1991-1993. *Atmósfera*(9(4)), 251-271.
- Geotest. (2018). *J. Determinación de amenazas actuales por aluviones e inundaciones y su representación por medio de Mapas de Intensidades de Amenazas en la Quebrada Macul Región Metropolitana.*
- 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.
- Hasanzadeh Nafari, R., Ngo, T., & Mendis, P. (2016). An assessment of the effectiveness of tree-based models for multi-variate flood damage assessment in Australia. *Water*, v. 8(n. 282), p. 1-18.
- 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*, 25-26, 125-133.
- Hauser, A. (2000). *Remociones en masa en Chile* (2da ed.). Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín N° 59, versión actualizada, 89 pág.

- Hayes, G., Wald, D., & Johnson, R. (2012). Slab1.0: A three-dimensional model of global subduction zone geometries. *Journal of Geophysical Research*, B1302.
- JTC-1. (2008). Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102(3-4), 85-98.
- Kausel, E., & Ramírez, D. (1992). Relaciones entre parámetros focales y macrosísmicos de grandes terremotos chilenos. *Revista Geofísica, Volumen 37, pp. 36 - 194.*, 37, 36-194.
- Keefer, D. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of América Bulletin*, 95(4), 406-421.
- Keller, E., & Blodgett, R. (2004). *Riesgos Naturales*. Madrid: Pearson Education S.A., 448 pág.
- Kreibich, H., Piroth, K., Seifert, I., Maiwald, H., Kunert, U., Schwartz, J., . . . Thieken, H. (2009). Is flow velocity a significant parameter in flood damage modelling? *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*(n. 9), p. 1679-1692.
- Lara, M. (2007). *Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con la aplicación en quebradas San Ramón, Santiago oriente, Región Metropolitana*. Tesis para optar al grado de magister en ciencias mención geología. Tesis para optar al título de Geologo, Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago.
- Lara, M., Sepúlveda, S., Celis, C., Rebolledo, S., & Pablo, C. (2018). Landslide susceptibility maps of Santiago city Andean foothills, Chile. *Andean Geology*, 45(3), 433-442.
- Manea, V., Pérez-Gussinye, M., & Manea, M. (2012). Chilean flat slab subduction controlled by overriding plate thickness and trench rollback. *Geology*, V.40(Nº 1), pp.35-38.
- 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.
- Merz, B., Kreibich, H., & Lall, U. (2013). Multi-variate flood damage assessment: a tree-bases data mining approach. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, v. 13, p. 53-64.
- MOP. (2002). *Informe Final: Inspección de Quebradas ubicadas en el Piedemonte de Santiago, sector Oriente durante las crecidas de los días 3, 4 y 5 de Junio del 2002*.
- MOP. (2018). *Manual de Carreteras*. Santiago.
- Mpodozis, C., & Ramos, V. A. (1989). *The Andes of Chile and Argentina In: Ericksen, G. E.; Cañas, M. T.; Reinemund, 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., & Hauser, A. (2005). *Informe geológico sobre efectos de las lluvias torrenciales del 26 y 27 de agosto de 2005 en el sector oriente de Santiago*. SERNAGEOMIN. Obtenido de http://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF/RMET-099.pdf
- 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.



- Naranjo, J., & Varela, J. (1996). *Flujos de detrito y barro que afectaron el sector oriente de Santiago el 3 de mayo de 1993*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Obtenido de https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF/RMET-121.pdf
- Oliveros, V., Vásquez, P., Creixell, C., Lucassen, F., Ducea, M., Ciocca, I., . . . Kasemann, S. (2020). Lithospheric evolution of the Pre- and Early Andean convergent margin, Chile. *Gondwana Research*, 202-227.
- 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.
- Pain, C. (1986). *Scarp Retreat and Slope Development Near Picton, New South Wales, Australia*. Braunschewig.
- Pérez, A., Leyton, F., Rauld, R., Campos, J., Barrientos, S., Vargas, G., & Thiele, R. (2010). Peligro sísmico en la Región Metropolitana: Nuevas perspectivas en un contexto tectónico andino: caso Santiago de Chile. *X Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica, ACHISINA*. Santiago, Chile.
- Pérez, A., Ruiz, J., Vargas, G., Rauld, R., Rebolledo, S., & Campos, J. (2014). Improving seismotectonics and seismic hazard assessment along the San Ramon Fault at the eastern border of Santiago city, Chile. *Natural Hazards*, 71, 243-274.
- Petit-Breuilh, M. E. (2004). *Desastres naturales y ocupación del territorio en Hispanoamérica (siglos XVI al XX)*. España: Universidad de Huelva.
- Pierson, T., & Scott, K. (1985). Downstream dilution of Lahar: transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow. *Water Research*, 21(10), 1511-1524.
- PMA. (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.
- 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.
- Rauld, R. (2002). *Análisis morfoestructural del frente cordillerano: Santiago oriente entre el río Mapocho y Quebrada de Macul*. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago.
- Rauld, R. (2002). *Análisis morfoestructural del frente cordillerano: Santiago oriente entre el río Mapocho y Quebrada de Macul, Memoria para optar al título de Geólogo*. Santiago: Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Rauld, R. (2011). *Deformación cortical y peligros sísmico asociado a la Falla San Ramón en el frente cordillerano de Santiago, Chile Central (33° S), tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias mención Geología*. Santiago: Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Rauld, R. (2011). *Deformación cortical y peligro sísmico asociado a la falla San Ramón en el frente cordillerano de Santiago, Chile central (33°S)*. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias, mención Geología, Universidad de Chile, Santiago.

- Rauld, R., Vargas, G., Armijo, R., Ormeño, A., Valderas, C., & Campos, J. (2006). Cuantificación de escarpes de falla y deformación reciente en el frente cordillerano de Santiago. *Actas XI Cong. Geol. Chileno*, 1, págs. 447-450. Antofagasta, Chile.
- Riesnier, M., Lacassin, R., Simoes, M., Armijo, R., Rauld, R., & Vargas, G. (2017). Kinematics of the active West Andean fold-and-thrust belt (central Chile): Structure and long-term shortening rate. *Tectonics*, 36, 287-303.
- Sancho, C. (1997). Los mapas de riesgos. En J. Peña (Ed.), *Cartografía geomorfológica básica y aplicada* (págs. 181-200). Zaragoza: Geomorfa.
- Scholz, C. (1990). *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge: Cambridge University Press, 439 pág.
- Selby, M. J. (1993). *Hillslope materials and processes* (Second Edition ed.). Oxford University Press.
- Sepúlveda, S. (1998). *Metodología para evaluar el peligro de flujos de detritos en ambientes montañosos. Aplicación en la quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana. Memoria de título, Universidad de Chile*. Obtenido de https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF/RMET-149.pdf
- 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*, 80, 336-348.
- Sepúlveda, S., Serey, A., Lara, M., Pavez, A., & Rebolledo, S. (2010). Landslides induced by the April 2007 Aysén Fjord earthquake, Chilean Patagonia. *Landslides*, doi: 10.1007/s1034VI-010-0203-2.
- SEREMI MINVU. (2012). *Estudio de Riesgo y Modificación PRMS Falla San Ramón (ID N° 640-27-LP10)*.
- SEREMI MINVU RM. (2014). *ESTUDIO "ANÁLISIS ÁREAS RIESGO PRE CORDILLERA ETAPA 1 VITACURA Y LA FLORIDA". Parte 1B La Florida Etapa 2: Recopilación y levantamiento de antecedentes.*
- SERNAGEOMIN. (2017). *Principales desastres ocurridos desde 1980 en Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Obtenido de <http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Primer-Catastro-Nacional-Desastres-Naturales.pdf>
- 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*(11), 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.
- Stern, C., Amini, H., Charrier, R., Godoy, E., Hervé, F., & Varela, J. (1994). Petrochemistry and age of rhyolitic pyroclastic flows which occur along the drainage valleys of the río Maipo and río Cachapoal (Chile) and río Yaucha and río Papagayos (Argentina). *Revista Geológica de Chile*, Issue 23, pp.39-52.
- SUBDERE. (2011). *Guía Análisis de Riesgos Naturales para el Ordenamiento Territorial*. Santiago: Subsecretaría de Desarrollo Regional.



- Tichelaar, B., & Ruff, L. (1993). Depth of Seismic Coupling Along Subduction Zones. *Journal of Geophysical Research*, 98(B2), 2017-20137.
- UNISDR. (07 de 08 de 2017). *Words in Action Guidelines: National Disaster Risk Assessment*. UNISDR. Obtenido de <https://www.undrr.org/terminology#N>
- Urrutia, R., & Lanza, C. (1993). *Catástrofes de Chile 1542-1992*.
- USGS. (2008). *The landslide handbook—A guide to understanding landslides*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.
- Vargas, G., Klinger, Y., Rockwell, T., Forman, S., Rebolledo, S., Baize, S., . . . Armijo, R. (2014). Probing large intraplate earthquakes at the west flank of the Andes. *Geology*, 42(12), 1083-1086.
- 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*, 3, 1-61.
- Wall, R., Sellés, D., & Gana, P. (1999). *Area Til til-Santiago, Región Metropolitana*. Mapas Geológicos, SERNAGEOMIN, Santiago.
- Wichmann, V. (2017). The Gravitational Process Path (GPP) model (V 1.0) - a GIS-based simulation framework for gravitational processes. *Geoscientific Model Development*, 10(9).
- Yañez, G., Ranero, C., von Heune, R., & Díaz, J. (2001). Magnetic anomaly interpretation across the southern central Andes (32°–34°S): The role of the Juan Fernández Ridge in the late Tertiary evolution of the margin. *Journal of Geophysical Research*, <https://doi.org/10.1029/2000JB900337>.

8. ANEXOS

8.1. DEFINICIONES DE PELIGRO Y RIESGO UTILIZADAS EN ESTE ESTUDIO

8.1.1. Contexto

En el artículo 2.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones se establece que un Plan Regulador Comunal estará conformado por varios documentos. Uno de ellos es el “Estudio de Riesgos y Protección Ambiental”, que establece áreas de restricciones y condiciones para ser utilizadas de acuerdo a las disposiciones contempladas en los artículos 2.1.17 y 2.1.18 del mismo cuerpo legal.

En particular, el artículo 2.1.17, define las “áreas de riesgo” en función de las amenazas que las pueden afectar. Los criterios utilizados en el artículo en cuestión para definir las áreas de riesgo difieren mucho de los criterios que se utilizan universalmente. Por esta razón se hace necesario revisar las definiciones que regulan la elaboración de este documento a partir de otros trabajos que homologan el lenguaje, ordenan el conocimiento en este aspecto y sistematizan los criterios y metodologías de acuerdo a los objetivos actuales de los estudios de este tipo.

De esta forma, para sistematizar las definiciones a utilizar en este estudio se han revisado los siguientes documentos:

- “Terminología sobre reducción del riesgo de desastres” (UNISDR, 2009).
- “Guía de análisis de riesgos naturales para el ordenamiento territorial” (SUBDERE, 2011).
- “Marco Sendai para la reducción del riesgo de desastres 2015-2030”.

8.1.2. Definiciones

Los procesos geodinámicos producen modificaciones de diversas magnitudes en la superficie terrestre que constituyen peligros geológicos que afectan de forma directa o indirecta a la población y a las actividades humanas.

Una **Amenaza Natural** corresponde a un proceso o fenómeno natural que puede ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales (SUBDERE, 2011; UNISDR, 2017).

Asociados a los peligros naturales se reconocen cuatro conceptos principales: **susceptibilidad**, amenaza o **peligrosidad** (hazard), **vulnerabilidad** 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 catastro, 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, peligro 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; SUBDERE, 2011). 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.

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, Ferre, Ortuño, & Oteo, 2002; SUBDERE, 2011).

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; Gonzalez de Vallejo, Ferre, Ortuño, & Oteo, 2002; JTC-1, 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, Ferre, Ortuño, & Oteo, 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

* 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

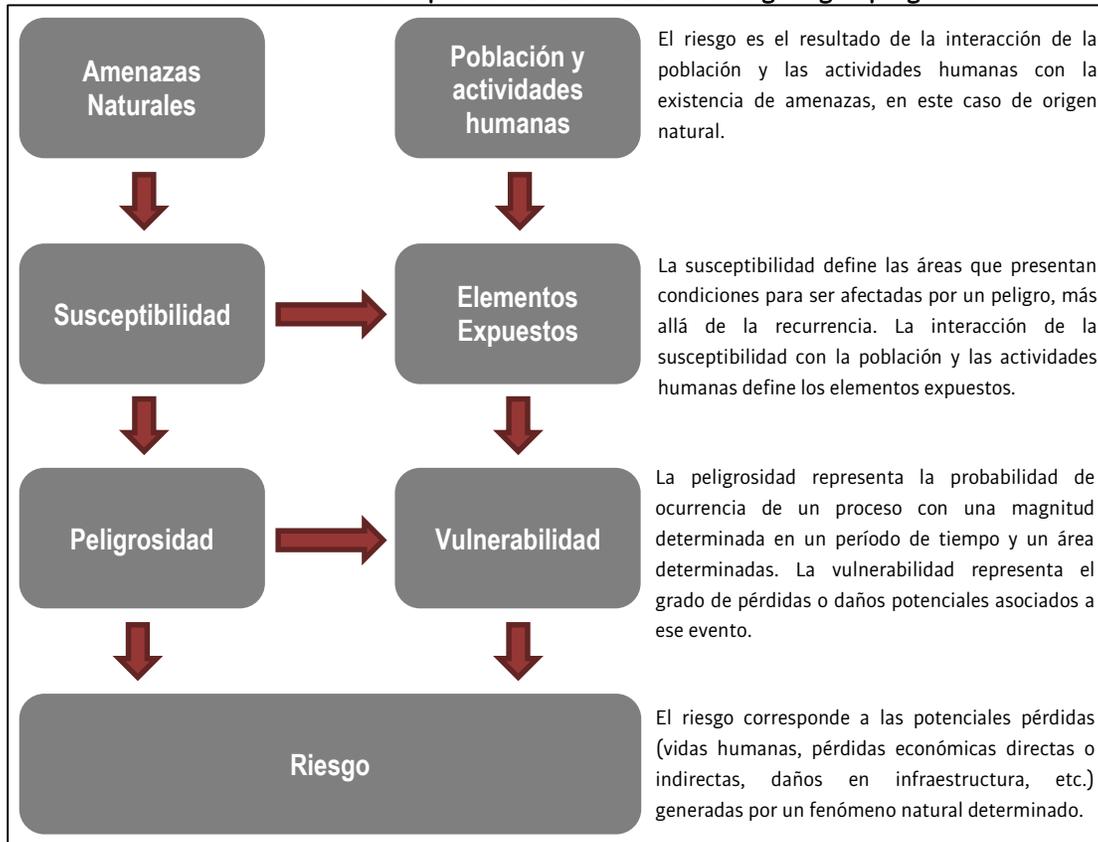
peligrosidad y V a la vulnerabilidad. En este caso no es posible obtener una evaluación cuantitativa de las pérdidas (Gonzalez de Vallejo, Ferre, Ortuño, & Oteo, 2002).

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 FIGURA ANEXO N° 8-1 muestra la relación entre el conocimiento y la estimación de la susceptibilidad, amenaza y riesgo.

FIGURA ANEXO N° 8-1: Etapas de evaluación de un evento geológico peligroso.



Fuente: Elaboración propia basado en Varnes (1984).

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.

CUADRO ANEXO N° 8-1: Clasificación de los peligros analizados en este estudio.

Clasificación de las amenazas utilizada en este estudio		“Áreas de riesgo” definidas en el artículo 2.1.17 de la OGUC	
Amenazas naturales	Procesos externos o exógenos	Inundaciones terrestres y litorales: <ul style="list-style-type: none"> • Inundación por desborde de cauces • Inundación por anegamiento • <i>Inundación por afloramiento de la napa (*)</i> • <i>Inundaciones por maremoto (*)</i> • <i>Inundaciones por marejadas (*)</i> 	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.
		Procesos de remociones en masa: <ul style="list-style-type: none"> • Flujos de detritos y barro • Desprendimientos o caídas de rocas • Deslizamientos • <i>Avalanchas (*)</i> 	2. Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas.
		Volcanismo	

	Procesos internos o endógenos	Sismicidad	3. Zonas con peligro de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas.
--	-------------------------------	------------	--

(*) No existen condiciones en el área de estudio para ser afectada por estos peligros.

8.2. DESCRIPCIÓN DE LOS PELIGROS GEOLÓGICOS ANALIZADOS

En este anexo se describen los peligros naturales asociados a procesos geológicos que potencialmente podrían afectar o han afectado al área de estudio, que constituyen una amenaza al emplazamiento de población. Esta descripción considera una explicación del peligro, los factores condicionantes y los principales efectos para la población y sus actividades.

Para este análisis los peligros se han dividido según su origen, diferenciando los procesos internos o endógenos de la tierra (peligro sísmico y volcánico), y los procesos externos o exógenos (remociones en masa, inundaciones). En el (CUADRO ANEXO N° 8-1 N°8-1), se presenta un esquema con la clasificación de los peligros según el artículo 2.1.17 de la Ordenanza General Urbanismo y Construcciones (OGUC). Este esquema sirve como guía de los peligros descritos en este anexo.

8.2.1. Procesos externos o exógenos de la tierra

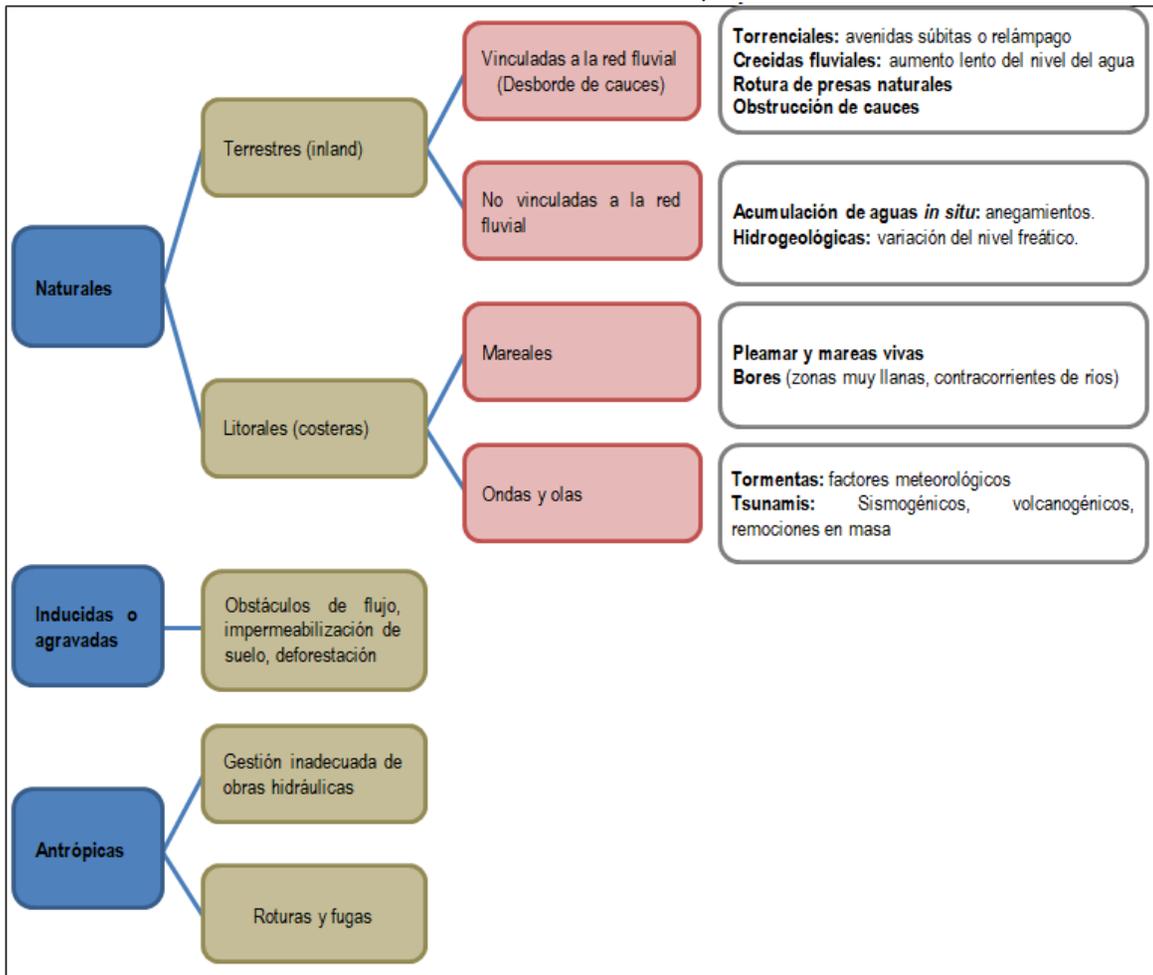
8.2.1.1. Inundaciones terrestres y litorales

Las inundaciones, sin considerar aquellas generadas por causas antrópicas, pueden ser de dos tipos (FIGURA ANEXO N°8-2): (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 (por las características de la comuna, éstas no se analizan). 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.

FIGURA ANEXO 8-2: Clasificación de los tipos de inundación.



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

8.2.1.1.1. Inundaciones 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 que se pueden generar como consecuencia de una inundación estarán dados por varios factores. Naturalmente, los efectos dependen de la intensidad de la inundación, sin embargo, se deben diferenciar los efectos sobre los edificios, que se correlacionan mejor con la altura de inundación, de la afectación a la infraestructura vial, que se correlaciona mejor con la velocidad de escurrimiento (Kreibich, y otros, 2009), aunque, se debe tener en consideración que existe una buena correlación entre ambas variables. Por otra parte, existen otras variables que inciden en el nivel de daño que generan las inundaciones (Merz, Kreibich, & Lall, 2013; Hasanzadeh Nafari, Ngo, & Mendis, 2016):

- Superficie de las construcciones (que se correlaciona con la densidad de población y con el nivel socioeconómico de los habitantes), valor de las propiedades y calidad de la construcción.
- Medidas preventivas, asociadas a la construcción.

8.2.1.1.2. Inundaciones por 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. Solo 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.

8.2.2. Procesos de remociones 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 (FIGURA ANEXO N°8-3). El movimiento de estos materiales puede ser por caída, volcamiento, deslizamiento, propagación lateral o flujo (PMA-GCA, 2007).

FIGURA ANEXO N° 8-3: Clasificación de tipos de remociones en masa en relación al movimiento que lo origina y el tipo de material constituyente de la ladera.

Material	ROCA	DETRITO	SUELO
CAIDA			
VOLCAMIENTO			
DESIZAMIENTO			
PROPAGACION			
FLUJO			
COMPLEJO			

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.

8.2.2.1. 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, Fernández, Naranjo, & Villarroel, 2003). 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. Solo durante las últimas décadas se han instalado pluviógrafos que miden la intensidad instantánea u horaria de precipitaciones (mm por hora). Solo 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 (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.

8.2.2.2. 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). Estos ocurren cuando existe una discontinuidad en la roca (por ejemplo, fracturas, planos de estratificación u otras estructuras propias de las características de la roca) 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 este 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 este 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 este. 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.

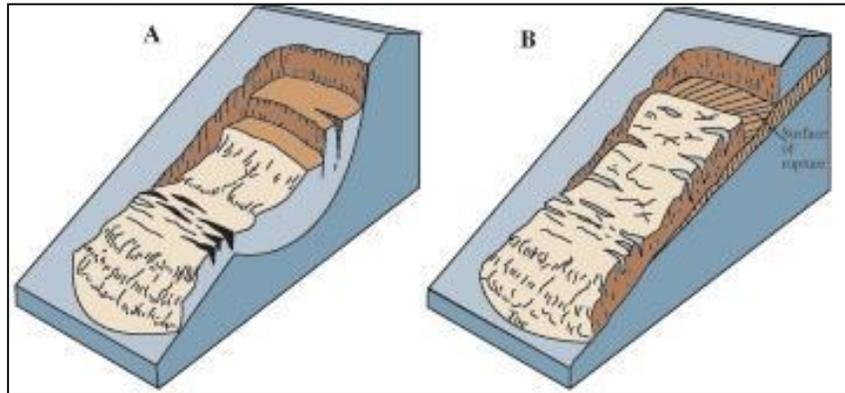
8.2.2.3. Deslizamientos

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

Estos fenómenos pueden ocurrir de varias formas dependiendo de las propiedades del material y las características geológicas y geomorfológicas del entorno, siendo principalmente divididos en

rotacionales y traslacionales (FIGURA ANEXO N°8-4). Esto implica que las superficies de ruptura son ya sea curvas y cóncavas o a lo largo de un plano o superficie ondulada, respectivamente.

FIGURA ANEXO N°8-4: 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>

Adicionalmente, los deslizamientos que ocurren en escarpes de terrazas fluviales producto de la erosión fluvial, o el retroceso de acantilados costeros por erosión marina basal, se les denomina como “Retroceso de laderas”, que corresponde a la retirada del escarpe en dirección aguas arriba, sin que este sufra cambios en sus rasgos geométricos, es decir, con posterioridad al movimiento de material, la forma del escarpe permanece constante (Pain, 1986).

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

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

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

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

- 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.

8.2.3. PROCESOS INTERNOS O ENDÓGENOS DE LA TIERRA

8.2.3.1. Sismicidad

8.2.3.1.1. Tipos de sismos en Chile

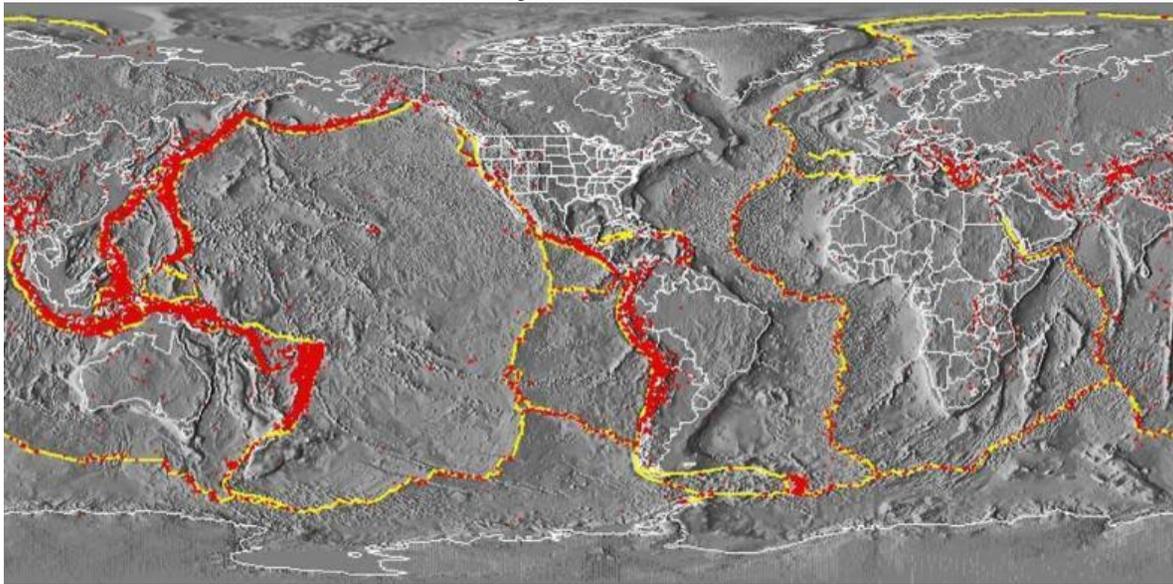
La costa Oeste de Sudamérica está delineada por el borde occidental de la placa Sudamericana y se caracteriza por una intensa sismicidad debido a su convergencia con la placa de Nazca. En planta se aprecia una banda sísmica activa muy angosta (100-150 km) y de profundidad variable (~5-200 km) entre el cordón montañoso de los Andes y la fosa Perú-Chile. La (FIGURA ANEXO N°8-5), 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.

El margen de subducción donde se ubica Chile está caracterizado por una convergencia del orden de 8 cm/año (DeMets, Gordon, Argus, & Stein, Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, 1994). Una serie de fuerzas actúan sobre la Placa de Nazca, como por ejemplo el flujo convectivo de material del manto, que “mueve” a la placa en dirección al este generando la convergencia, o el mismo peso de la placa oceánica que “tira hacia abajo” esta placa, favoreciendo la subducción (FIGURA ANEXO N°8-6). Debido a sus distintas composiciones, la placa oceánica que es comparativamente más densa (de composición basáltica)



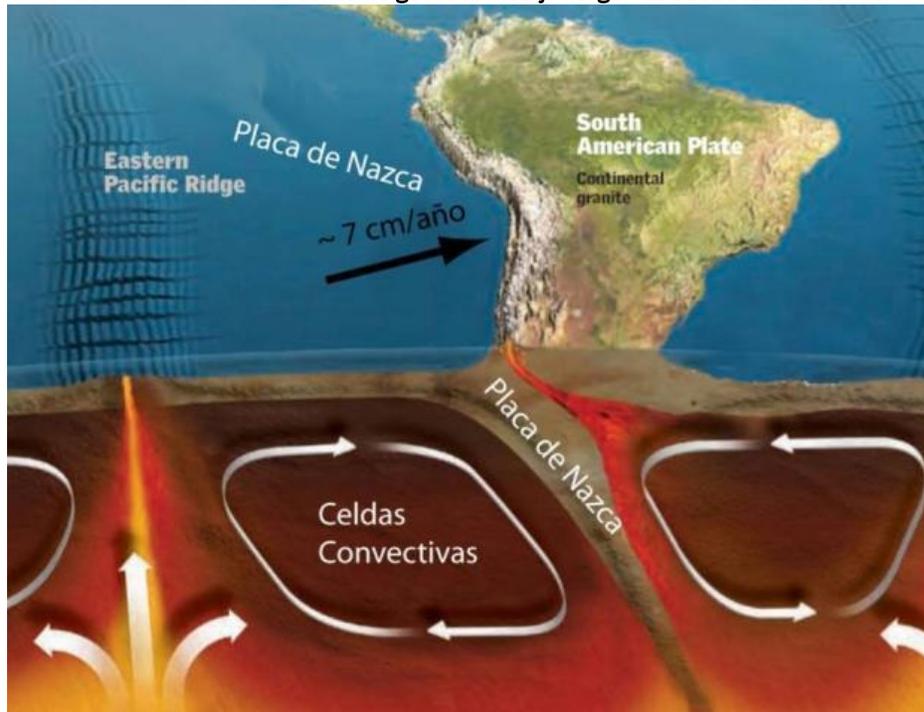
tiende a introducirse bajo la corteza continental menos densa (de composición granítica). Las fuerzas que actúan sobre la interfaz entre ambas placas, así como las de interacción entre las placas y el manto generan el llamado acoplamiento sísmico interplaca, el que puede entenderse como la resistencia al deslizamiento en la zona de contacto entre ambas. A mayor acoplamiento interplaca la capacidad de generar terremotos de gran magnitud aumenta (Scholz, 1990).

FIGURA ANEXO N° 8-5: Sismicidad mundial entre los años 1980 y 1990, se representan en puntos rojos los epicentros con magnitud mayor que 5. Nótese cómo la sismicidad “ilumina” los límites de las placas tectónicas, dibujados en amarillo.



Fuente: Western Washington University(2011).

FIGURA ANEXO N°8-6: Contexto geodinámico y margen de subducción de Chile.



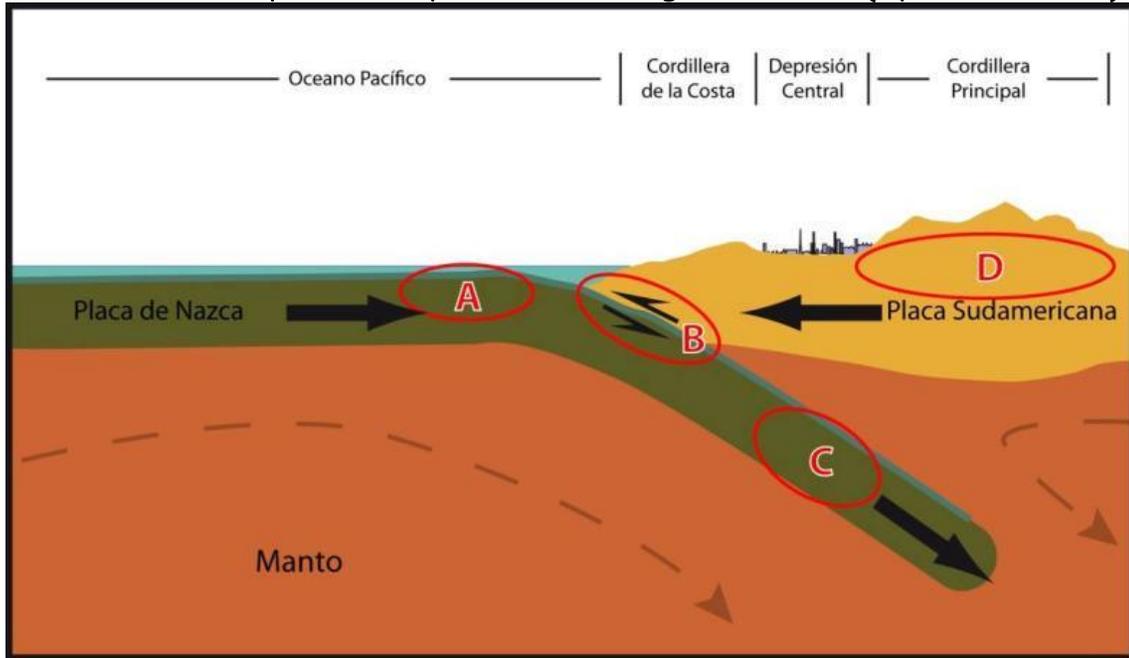
Fuente: Modificado de Enciclopedia Britannica (2008).

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 ANEXO N°8-7), que corresponde a:

- Zona A: Sismos “Costa afuera”, que se producen por los esfuerzos extensivos por abombamiento en la placa subductante antes de la zona de contacto. A pesar de llegar a tener magnitudes cercanas a $M_w = 6$, prácticamente no causan efectos significativos en áreas pobladas debido a su ocurrencia en zonas mar adentro.
- Zona B: Sismos asociados al contacto interplaca, como los ocurridos en Antofagasta 1995, Chile Central 1985, Mejillones 2005 y Constitución-Concepción en el 2010. Estos son producto de la liberación de energía acumulada por la convergencia de placas.
- Zona C: Sismos intraplaca de profundidad intermedia, como los sismos de Punitaqui 1997, Copiapó 2002, Calama 1950, Tarapacá 2005 y Chillán 1939. Se producen por el fracturamiento tensional de la placa de Nazca (la placa se quiebra por su propio peso).
- Zona D: Sismos superficiales intraplaca de profundidad intermedia, 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 de profundidad intermedia se encuentran asociados a fallas superficiales que pueden tener movimientos normales, inversos y de rumbo, que responden a campos de esfuerzos compresivos o extensivos.

FIGURA ANEXO N°8-7: Tipos de sismos que ocurren en un margen de subducción (explicación en el texto).

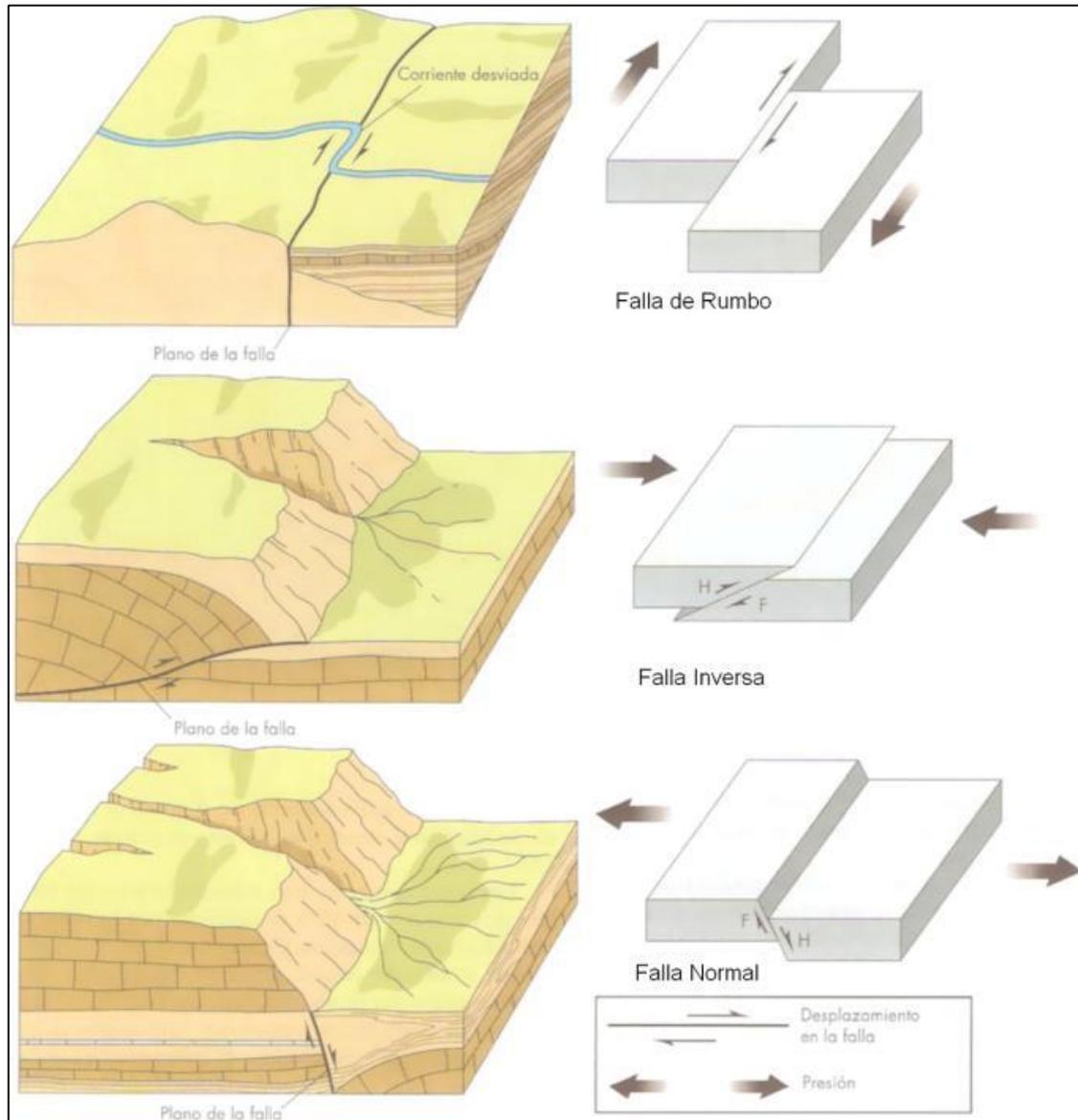


Fuente: Elaboración propia.

8.2.3.2. Mecanismos de daños asociados a los sismos

Independientemente de la ubicación particular de uno u otro sismo, todos ellos corresponden a un desplazamiento violento paralelo al plano de falla que libera la energía acumulada en la interfaz. La energía que se acumula producto de la convergencia de placas, tanto en el contacto interplaca como en la corteza, en algún momento supera la resistencia de las rocas. En dicho instante se produce una ruptura que se propaga a través de un plano de falla, el que, de acuerdo a su geometría, generará diferentes tipos de movimientos (FIGURA ANEXO N°8-7). A su vez, esta ruptura conlleva una liberación de energía que se propaga por medio de ondas sísmicas.

FIGURA ANEXO N° 8-7: Tipos de falla y esfuerzos asociados.

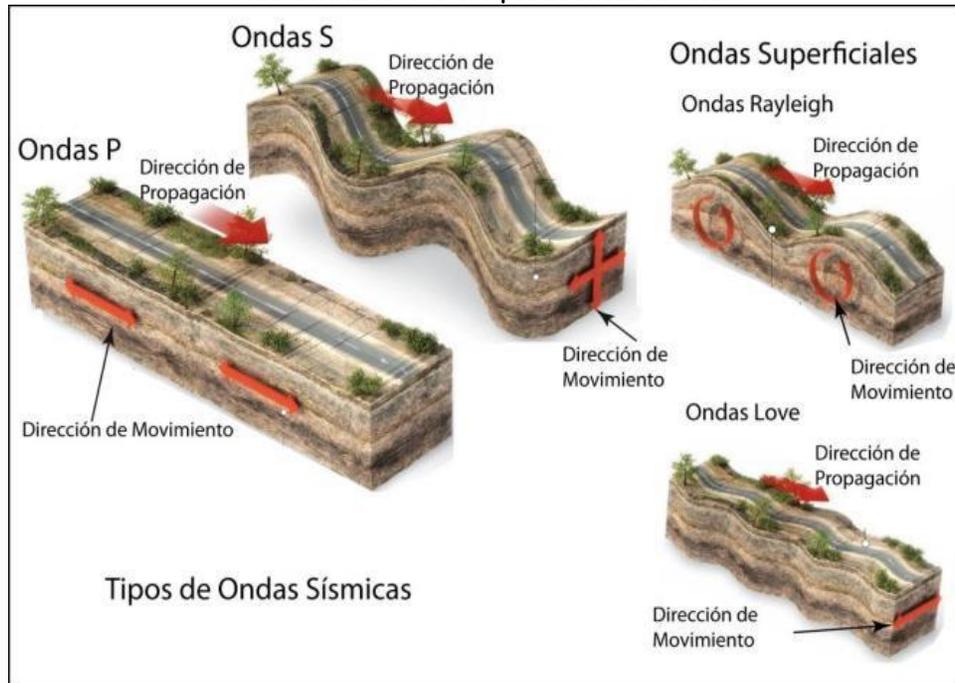


Fuente: Keller y Blodgett (2004).

Las ondas que transmiten la energía sísmica se agrupan en dos tipos principales: ondas de cuerpo y ondas de superficie. Las primeras se dividen en ondas P (compresivas) y ondas S (ondas de corte o de cizalle), mientras que las segundas se dividen en ondas Rayleigh y Love (FIGURA ANEXO N°8-8). 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.

FIGURA ANEXO N° 8-8: Tipos de ondas sísmicas.



Fuente: Modificado de Enciclopedia Britannica (2008).

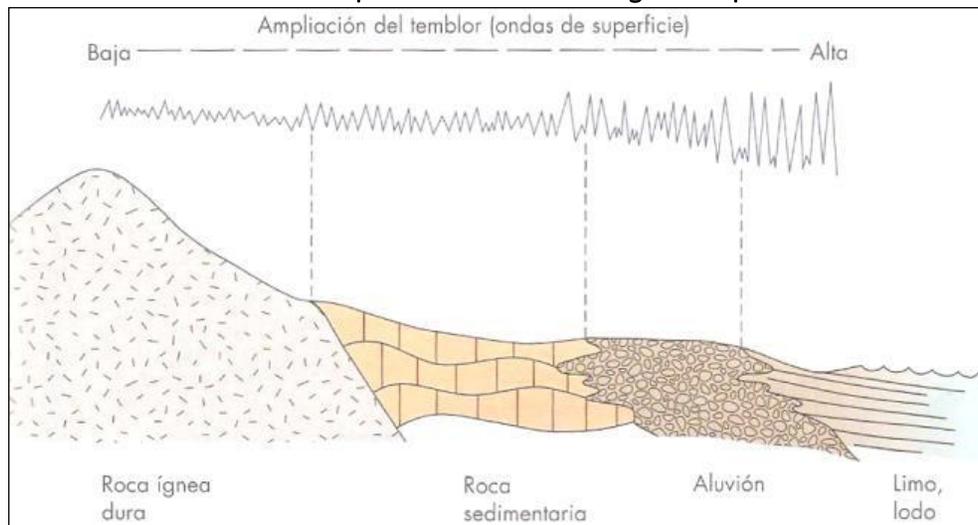
Para medir los sismos se utilizan, principalmente, dos escalas: *magnitud* e *intensidad*. La *magnitud* es una medida única y objetiva, que normalmente se relaciona con la escala de RICHTER (M_S). Actualmente para grandes sismos se utiliza la escala de magnitud de momento (M_W) que se calcula a partir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

Finalmente, debe destacarse el llamado “efecto sitio”, que indica un condicionamiento de carácter local bajo el cual para un mismo terremoto y dependiendo del tipo de terreno donde uno se encuentra ubicado, las ondas sísmicas pueden amplificarse durante el desarrollo del terremoto (FIGURA ANEXO N°8-9).

El principal efecto asociado a la ocurrencia de sismos son fuertes movimientos del terreno, que originan un peligro directo sobre las estructuras y sobre las personas, debido a las fuertes aceleraciones generadas por las ondas sísmicas. Sumado a lo anterior, la ocurrencia de estos fenómenos es generalmente sin previo aviso, por lo que la única manera de mitigar el riesgo es con

campañas de educación y estrictas normas de construcción. Muchos de estos fenómenos son acompañados por asentamientos en las superficies, normalmente irregulares, dañando construcciones, infraestructura y cañerías. Esto implica en una alta vulnerabilidad estructural, económica y social. Particularmente con respecto a esta última se deben mencionar las potenciales pérdidas de vidas humanas y heridos por el derrumbe de estructuras, además de la vulnerabilidad a enfermedades gastrointestinales y epidemias por el colapso de los sistemas sanitarios y de conectividad, entre los innumerables efectos adversos para la sociedad que provocan este tipo de fenómenos.

FIGURA ANEXO N°8-9: Amplificación de la vibración generada por un terremoto.



Fuente: Keller y Blodgett (2004).

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

Los deslizamientos y derrumbes se dan en diversos tipos de suelos y bajo variadas condiciones sismotectónicas, incluso se han detectado en sismos de grado $M_w = 4.0$. La cantidad y severidad de estos están en directa relación con la cercanía al epicentro y la magnitud del evento causante (Keefer, 1984; Sepúlveda, Murphy, Jibson, & Petley, 2005; Sepúlveda, Serey, Lara, Pavez, & Rebolledo, 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, Fraile, Otero, & Pividal, 1994; Sancho, 1997).

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.

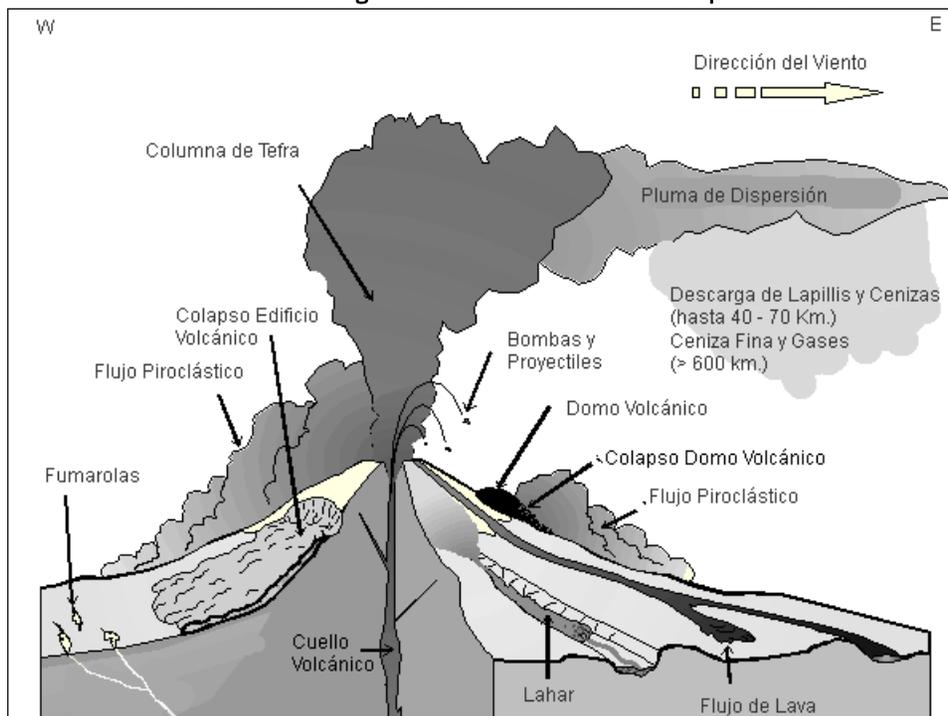
8.2.4. VOLCANISMO

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 ANEXO N°8-10) y en el (CUADRO ANEXO N°8-2).

La lluvia de ceniza y tefra se produce durante erupciones explosivas en las que una gran cantidad de material volcánico se inyecta en la atmósfera a gran altura, generando columnas de tefra, compuestas por piroclastos y gases. Estas columnas, ascienden velozmente alcanzando en pocos minutos alturas estratosféricas, siendo dispersadas por el viento y esparcidas las cenizas y piroclastos alrededor de una gran área. En caso de colapso de esta columna se producen flujos y oleadas piroclásticas que pueden alcanzar centenares de kilómetros, en función de la altura de la columna de tefra (energía potencial transformada en energía cinética) y la dirección del viento, generando grandes depósitos de ceniza y piroclastos incandescentes. Adicionalmente, es común que se produzca contaminación de aguas superficiales en todo el sector afectado por la caída de cenizas, así como también de los acuíferos en los alrededores del volcán por la inyección de aguas hidrotermales, además del envenenamiento por dispersión de gases tóxicos hacia la atmósfera.

FIGURA ANEXO N° 8-10: Peligros volcánicos asociados a la erupción de un volcán.



Fuente: Myers y Brantley (Myers & Brantley, 1995).

Los flujos de lava se producen cuando material magmático se desplaza aguas abajo del centro de emisión. El alcance que tendrán estos flujos está determinado por la tasa de efusión (emisión del centro volcánico), la pendiente del terreno sobre el cual la lava escurre y la viscosidad de la lava. Además, en las cercanías del centro de emisión se producen comúnmente temblores de magnitud inferior a 6 en la escala de Richter (M_w), pero a poca profundidad (entre 1 y 20 km), los que están asociados a intensidades mayores a VI en las cercanías del epicentro. Estos sismos provienen de

diversos procesos, tales como ascenso del magma y fracturamiento de la corteza, explosiones volcánicas y esfuerzos tectónicos compresivos y expansivos asociados al ciclo eruptivo (González-Ferrán, 1995).

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 en que la velocidad sea mayor a 150 Km/h pueden remontar barreras topográficas.

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

- a) Pérdida de tierras cultivables
- b) Colapso de techos y obras civiles
- c) Pérdidas de vidas humanas y forraje
- d) 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, cuya pluma de ceniza dio la vuelta al mundo.



CUADRO ANEXO N° 8-2: 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 peligro de Flujos y Oleadas Piroclásticas, si bien presenta un alcance de hasta centenares de kilómetros, este se restringe únicamente a las hoyas hidrográficas que drenan cada aparato volcánico.

8.3. HIDROLOGÍA

8.3.1. Revisión de antecedentes

8.3.1.1. Plan Regulador Comunal de Peñalolén (PRC) – Plan Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS)

Si bien el Plan Regulador Vigente de la Comuna data de 1989, de han realizado una serie de modificaciones. En particular para las áreas de las quebradas, se considera la zonificación de Parque Quebrada establecida en el Plan Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS) de acuerdo al Artículo 5.2.3.3. Este artículo define en la comuna lo siguiente:

- Parque Quebrada Peñalolén: Ancho de faja de 40m, desde límite Extensión Urbana hasta canal Las Perdices.
- Parque Quebrada Nido de Águilas: Ancho de faja de 40m, desde Límite Extensión Urbana hasta calle Álvaro Casanova, y ancho de faja de 25m desde Calle Álvaro Casanova hasta canal Las Perdices.
- Parque Quebrada Lo Hermida: Ancho de faja de 40m, desde Límite Extensión Urbana hasta calle Álvaro Casanova, y ancho de faja de 25m desde Calle Álvaro Casanova hasta canal Las Perdices.
- Parque Quebrada Macul-ramal secundario: Ancho de faja de 40m desde Límite Extensión Urbana hasta canal San Carlos.
- Parque Quebrada Macul-cauce principal (intercomunal Peñalolén/La Florida): Ancho de faja de 100m desde Límite Extensión Urbana hasta canal San Carlos.

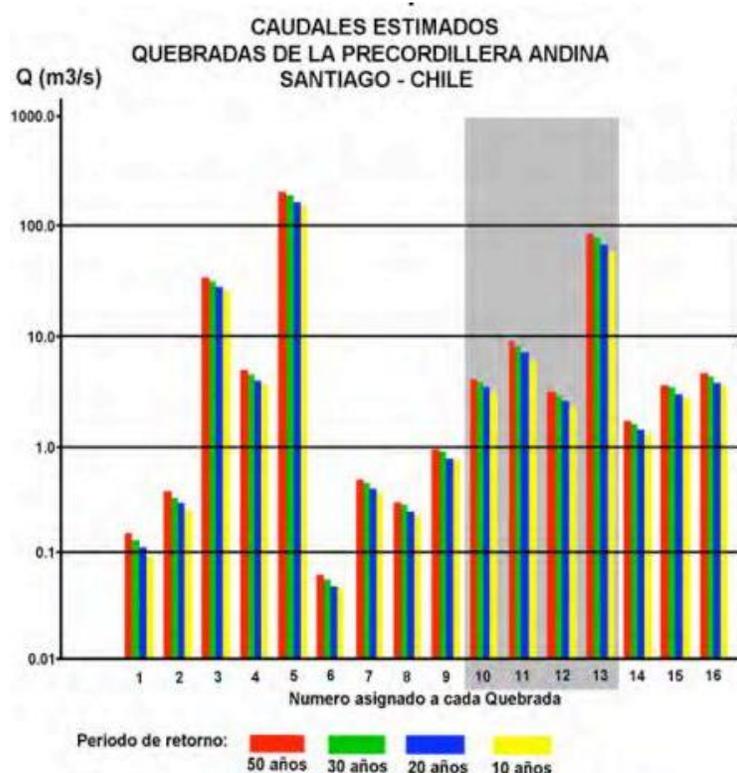
8.3.1.2. Estudios para la Actualización Plan Regulador Comunal de Peñalolén

Se analizó el estudio riesgo y protección ambiental (ERPA) desarrollado como parte de los estudios para el proceso de Actualización Plan Regulador Comunal de Peñalolén desarrollados durante el año 2011, el cual, si bien no concluyó en la elaboración de un nuevo PRC, contiene información respecto a las áreas de riesgos, por inundación por desborde de cauces, a nivel comunal y los niveles de restricción al desarrollo urbano asociado a ellas que resultan de interés.

El sistema hidrológico definido en el Plan Regulador Comunal de Peñalolén contempla el área de las cuatro microcuencas aportantes a la comuna, correspondientes a las quebradas Peñalolén, Nido de Águila, Lo Hermida y Macul, según orden de norte a sur. En el ERPA se consideraron los caudales de cada microcuenca, determinados en el estudio de Bertrand (1994), para periodos de retorno de 50, 30, 20 y 10 años (FIGURA). Las quebradas de la zona de estudio corresponden a la quebrada de Peñalolén (Nº10), Nido Águilas (Nº11), Lo Hermida con el (Nº12) y Macul (Nº13), cuyos caudales estimados varían según:

- Quebrada Lo Hermida arroja caudales entre 1.6 a 2.3 m³/s.
- Quebrada Peñalolén entre 2.1 a 2.7 m³/s.
- Quebrada Nido de Águilas entre 4.6 a 5.1 m³/s.
- Quebrada de Macul entre 35 a 60 m³/s.

FIGURA ANEXO N°8-11: Caudales estimados en quebradas precordilleranas.



Fuente: Bertrand (1994).



8.3.1.3. Plan Maestro de Aguas Lluvias PM-01 (MOP, 2001)

El Plan Maestro del Gran Santiago tuvo como objetivo la elaboración de un diagnóstico y proposición de soluciones para resolver los problemas de anegamiento asociados a aguas lluvias en la ciudad de Santiago, definiendo las redes primarias de evacuación y de drenaje.

Para calcular y dimensionar las redes primarias de evacuación y drenaje de aguas lluvias este estudio realizó análisis hidrológico de las cuencas aportantes a la comuna de Santiago La información pluviométrica utilizada corresponde al periodo de 1941 a 1998 (58 años), a partir de las cuales se estimaron las precipitaciones máximas y curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) en 8 estaciones.

La estimación de caudales se realizó a partir de dos métodos: la fórmula Racional y el Hidrograma Unitario (HU), para precipitaciones máximas en 6 y 24 horas. La información correspondiente a las cuencas de interés se presenta en el (CUADRO ANEXO N°8-3), destacando que el Método Racional entrega los mayores valores.

CUADRO ANEXO N° 8-3:
Caudales máximos [m³/s] para distintos periodos de retorno, de acuerdo al PM-01.

Cuenca	Pp máx. 24 hrs. [mm]	Método	Caudales Máximos [m ³ /s] - Periodo de retorno [años]					
			2	5	10	20	50	100
Quebrada de Macul	82	HU d = 24	8,36	13,68	16,99	24,22	29,43	34,67
		HU d = 6	14,01	20,47	25,45	33,69	40,44	47,17
		Racional	17,95	23,93	28,80	37,57	44,82	53,68
Quebrada Lo Hermida	78	HU d = 24	0,54	0,98	1,32	1,82	2,22	2,63
		HU d = 6	1,15	1,85	2,38	3,21	3,87	4,55
		Racional	1,95	2,59	3,1	4,02	4,78	5,69
Quebrada Nido de Águilas	80	HU d = 24	1,09	1,94	2,62	3,58	4,37	5,17
		HU d = 6	2,2	3,49	4,47	6,01	7,25	8,5
		Racional	3,58	4,8	5,77	7,52	8,95	10,71
Quebrada Peñalolén	77	HU d = 24	0,94	1,69	2,29	3,16	3,87	4,6
		HU d = 6	1,93	3,09	3,97	5,37	6,49	7,64
		Racional	3,23	4,32	5,19	6,74	8,01	9,56

Fuente: PM-01(2001)

8.3.1.4. Catastro de obras en cauces naturales y áreas de restricción (DGA, 2006)

El Informe “Catastro de obras en cauces naturales y áreas de restricción” consiste en la recopilación de las obras de modificación de cauces naturales, ubicadas en los sectores del piedemonte de las comunas de Las Condes, La Reina, Peñalolén, La Florida, Puente Alto y San José de Maipo (sólo zona urbana).



Para cada cauce natural, el documento presenta una ficha con sus principales características y un cuadro resumen con las obras catastradas, en el cual se indica si cuentan o no con expediente de la DGA-RM y el grado de peligro o riesgo que representa la obra para asentamientos humanos.

A continuación, se presenta un resumen de la definición de las quebradas y las obras hidráulicas identificadas. Cabe destacar que el estudio incluye, además, para cada obra, una descripción, dimensiones, ubicación y antecedentes legales en caso de existir, así como lo observado durante una visita a terreno y el grado de peligrosidad.

i. Quebrada Peñalolén

El recorrido de la quebrada comenzó 2.5 km. aguas arriba del cruce del primer puente de entrada al loteo de los militares, ubicada al sur del Club de Campo de la institución (FIGURA ANEXO N°8-12). El Club de Campo está ubicado al final de la calle Las Palmas, hacia el oriente, donde cruza a la quebrada Peñalolén que ya se encuentra canalizada (CUADRO ANEXO N°8-4).

CUADRO ANEXO N° 8-4: Catastro de obras hidráulicas Quebrada Peñalolén.

N° Obra	Obra
1	Aquietador de cauce
2	Badén
3	Canalización quebrada
4	Obra de descarga
5	Puente
6	Puente
7	Tubo
8	Obra de descarga
9	Obra de descarga
10	Obra de descarga
11	Tubo
12	Obra de descarga
13	Tubo
14	Puente
15	Muro con paso de agua inferior
16	Canalización en tierra (*)
17	Muro de ladrillos (*)
18	Rejilla de descarga (*)

Fuente: DGA (2006)



FIGURA ANEXO N° 8-12: Obras hidráulicas en la quebrada Peñalolén.



Fuente: DGA (2006)

ii. Quebrada Nido de Águilas

La quebrada comienza varios kilómetros aguas arriba del Sendero de Chile y desemboca en calle Diagonal Las Torres a 125 m. de la intersección de esta calle con José Arrieta, medidos desde la intersección por calle diagonal las torres hacia el suroriente (CUADRO ANEXO N°8-5) y (FIGURA ANEXO N°8-13).

CUADRO ANEXO N° 8-5: Catastro de obras hidráulicas quebrada Nido de Águilas.

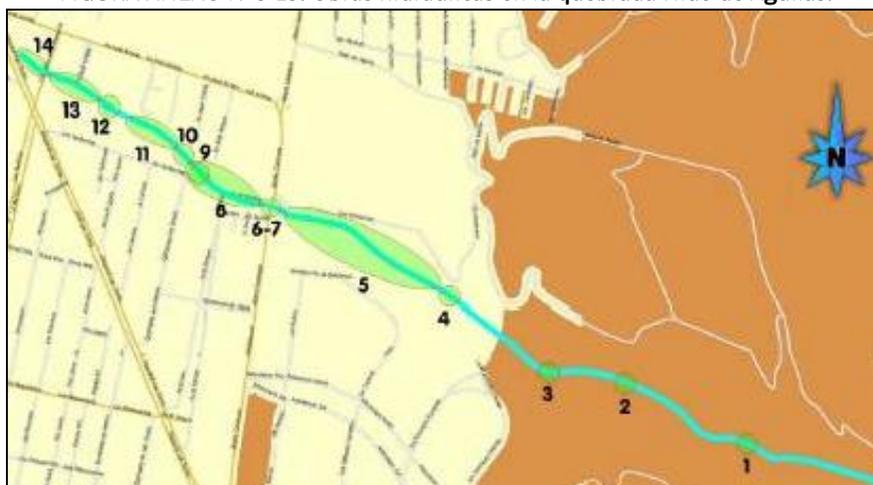
N° Obra	Obra
1	Muro tipo pirca
2	Muro tipo pirca (*) ⁴
3	Cerco y muralla en la quebrada
4	Tubería colgante
5	Canalización quebrada (*)
6	Cerco y muralla en la quebrada (*)
7	Badén
8	Canalización quebrada
9	Soportes de puente peatonal
10	Reja que cruza quebrada
11	Canalización quebrada (*)
12	Muros de albañilería
13	Canalización quebrada
14	Canalización quebrada (*)

Fuente: DGA (2006)

⁴ (*) Obras que presentan un grado de peligro alto según el estudio de la DGA, 2006



FIGURA ANEXO N°8-13: Obras hidráulicas en la quebrada Nido de Águilas.



Fuente: DGA (2006).

iii. Quebrada Lo Hermida

La quebrada Lo Hermida se conforma de dos ramales, norte y sur. Para el ramal norte, el recorrido comenzó en el recinto del club de Golf “Old Grangonian Club”, aproximadamente 1 km. aguas arriba del cruce de la quebrada con calle Diagonal Las Torres. Para el ramal sur comenzó 870 m. aguas arriba del cruce de la quebrada con calle Diagonal Las Torres, en un predio vecino a los terrenos pertenecientes a la Universidad Adolfo Ibáñez (CUADRO ANEXO N°8-6) y (FIGURA ANEXO N°8-14).

CUADRO ANEXO N°8-6: Catastro obras hidráulicas Quebrada Lo Hermida.

N° Obra	Obra
1	Tubería bajo camino
2	Estanque de retención
3	Vertedero de estanque
4	Muro y paso peatonal
5	Diseño cruce quebrada Av. Las Torres
6	Cerco
7	Paso bajo puente peatonal
8	Cerco
9	Cerco
10	Regularización de cauce y obras de protección (*)
11	Batería de tubos de hormigón (*)
12	Abovedamiento y canalización
13	Paso bajo calle de servicio
14	Regularización de cauce y obras de protección
15	Reja metálica
16	Cámara de agua potable
17	Cimientos de puente peatonal

Fuente: DGA (2006)



FIGURA ANEXO N° 8-14: Obras hidráulicas en la Quebrada Lo Hermida.



Fuente: DGA (2006)

iv. Quebrada de Macul

El recorrido de la quebrada se inició 8 km. aguas arriba de la intersección de ella con Avda. Canal Las Perdices, en la comuna de La Florida y terminó en la intersección de la quebrada con Avda. Tobalaba en la misma comuna. Luego la quebrada continúa canalizada recibiendo el nombre de Zanjón de la Aguada (CUADRO ANEXO N°8-7) y (FIGURA ANEXO N°8-15).

CUADRO ANEXO N°8-7: Catastro de obras hidráulicas quebrada Macul.

N° Obra	Obra
1	Piscinas decantadoras
2	Disipadores de energía
3	Descarga cañería 11 aguas lluvias
4	Descarga a quebrada
5	descarga en canal las perdices
6	Descarga a quebrada
7	descarga en canal las perdices
8	Puente canal Las Perdices
9	cruce de agua potable y alcantarillado
10	Gaviones tipo Pirca
11	Cámara
12	Descarga encajonada
13	Badén
14	Descarga a quebrada
15	Matiz agua potable y colector de aguas lluvias
16	Reposición canal san Carlos
17	Pasada Q. Macul canal San Carlos
18	Obra de descarga al Zanjón de la Aguada

Fuente: DGA (2006)



FIGURA ANEXO N° 8-15: Ubicación obras hidráulicas en la quebrada de Macul.



Fuente: DGA (2006)

8.3.1.5. Expediente VP-1306-796 (1997): “Canalización Quebrada 0-14 y 0-15, sector Club de Campo entre calle Talinay y Álvaro Casanova, comuna de Peñalolén”

El documento presenta el proyecto de canalización para la quebrada de Peñalolén, sector Club de Campo, localizado en el Club de Campo de Oficiales Peñalolén, en la calle Alvaro Casanova, comuna de Peñalolén.

El proyecto la protección de las riberas y regularización de las quebradas con el fin de garantizar que el Conjunto Habitacional no estará sometido a riesgos de inundación. Para esto, plantea la modificación del trazado de la quebrada O-14 a la altura de la cota 885, sector desde el cual se trasvasiarán las aguas a la quebrada O-15, para este efecto se proyectarán las obras necesarias de captación, aducción y entrega (T=100 años).

En el (CUADRO ANEXO N°8-8) se presentan los resultados obtenidos para el estudio hidráulico, definiendo como caudales de diseño: 16,5 m³/s (O-14), 14,70 m³/s (O-15) y 30 m³/s (Quebrada unificada).

CUADRO ANEXO N° 8-8: Parámetros y caudales máximos estimados.

Quebrada	Área [km ²]	Coeficiente de escorrentía	Tiempo concentración [h]	Caudal máximo [m ³ /s]				
				T=5	T=10	T=25	T=50	T=100
Peñalolén 1 (O-14)	4,11	0,68	0,344	10,21	11,59	13,36	14,93	16,5
Peñalolén 2 (O-15)	3,10	0,53	0,355	9,17	10,4	12,23	13,46	14,68

Fuente: Expediente VP-1306-796 (1997)

En el estudio se realiza una estimación del eje hidráulico, cálculo de socavaciones y estimación/cubicación de las obras que consideran una modificación del trazado a la altura de la cota 885, sector en el cual se trasvasan las aguas hacia la quebrada O-15, además de la protección de sus riberas. El emplazamiento de las obras proyectadas se localiza entre la Avda. Álvaro Casanova y la proyección de la Avda. Pie Andino.

8.3.1.6. Expediente VP-1306-1114 (2003): “Proyecto Canalización quebrada Nido de Águilas en propiedad Av. José Arrieta N°9773”

El documento corresponde al informe técnico del proyecto de la canalización de la quebrada Nido de Aguilas en el tramo que atraviesa la propiedad ubicada en Av. Jose Arrieta N°9773, en la comuna de Peñalolen, el proyecto fue realizado por SIGA Consultores Ltda. El proyecto incluye revestimiento del cauce y la construcción de una obra de arte que permita el paso sobre ella. De acuerdo al informe, el revestimiento se realizará con mampostería de piedra con una superficie de expuesta de 30x50cm² y la obra de arte para el paso de vehiculos consistirá en una losa de hormigón armado apoyada sobre las paredes del cauce. Las principales características corresponden a:

Sección Trapezoidal

Ancho: 1,6 m (base) y 2,15 m (superior)

Altura: Variable 2,27 a 2,99 m

Longitud total: 26,3 m

Pendiente 8% revestimiento y 2,8% (obra de arte)

En el (CUADRO ANEXO N°8-9), se presentan los resultados del estudio hidrológico necesario para la obtención del caudal de diseño del canal.

CUADRO ANEXO N°8-9: Resultados obtenidos del estudio hidrológico.

Área [km ²]	Coeficiente de escorrentía	Tiempo de concentración [h]	Caudal máximo [m ³ /s]					
			T=5	T=10	T=20	T=25	T=50	T=100
4,11	0,34	0,68	8,25	9,58	10,70	11,00	12,43	13,25

Fuente: Expediente VP-1306-1114 (2003)

El analisis hidrológico esta basado en la aplicación del método Racional recomendado para cuencas de menos de 15 km². El coeficiente escorrentía se estimó del estudio IPLA de 1974. El coeficiente de escorrentía se obtuvo por el método de California; la intensidad media máxima se obtuvo a partir de las curvas IDF indicados en la publicación “métodos estadísticos de hidrología”; el calculo de la precipitación se baso en registros pluviométricos de la estación “la Obra” corregidos en base a la estación Quinta Normal y para la determinación de las precipitaciones máximas en 24 hrs. se aplico la distribución de Weibull.

Se realiza un análisis hidráulico de la situación con y sin proyecto, obteniéndose capacidades de porteo de 18,27 m³/s y 21,92 m³/s, respectivamente. Adicionalmente se realiza un análisis de arrastre de sedimentos y socavación.

8.3.1.7. Expediente VP-1306-1177 (1999): “Regularización de cauce y obras de protección de ribera de la Quebrada Lo Hermida en conjunto habitacional Antupirén”

Informe técnico del proyecto de abovedamiento y canalización de la quebrada Lo Hermida, en conjunto habitacional Antupirén, tramo entre KM 0+000 u caññe Maihue, en la comuna de Peñalolén proyecto realizado por Proctora ingeniería y contrucción S.A.

Del informe “Regularización de cauce y obras de protección de ribera de la Quebrada Lo Hermida” se obtuvo el análisis hidrológico correspondiente a la construcción de dicha obra (CUADRO ANEXO N°8-10).

CUADRO ANEXO N° 8-10: Resultado análisis hidrológico en la cuenca Lo Hermida.

Área [km ²]	Coef. De escorrentía	Tiempo concentración [hrs.]	Caudal máximo [m3/s]					
			T=2	T=5	T=10	T=20	T=50	T=100
1,05	0,37	0,33	3,88	4,48	5,07	5,18	5,83	6,26

Fuente: Expediente VP-1306-1177 (1999)

Se realizó una estimación del eje hidráulico y cálculo de socavaciones. La identificación de la cuenca Lo Hermida por parte del documento técnico cuenta con un área considerablemente menor a la definida por el presente estudio de riesgo por inundación y plan maestro de aguas lluvias.

8.3.1.8. Diagnóstico de cauces sector Pie Andino, Región Metropolitana (Ayala, Cabrera y Asociados Ltda., 2008)

Este estudio tiene por objetivo obtener un diagnóstico actualizado y detallado del comportamiento hidráulico fluvial y aluvional de las quebradas existentes en el sector del Pie Andino del Gran Santiago. Dentro del área de estudio considera las quebradas de la comuna de Peñalolén presentes en el análisis del PRMS, que corresponden a las quebradas de Peñalolén, Nido de Águila, Lo Hermida, Antupirén y La Gringa, desde la cota 900 m s.n.m., hasta su punto de descarga, que corresponde a:

- Peñalolén: Comando de Telecomunicaciones del Ejército
- Nido de Águila: Avenida Diagonal Las Torres
- Lo Hermida: Canal Las Perdices
- Antupirén: Desaparece ante la construcción de un complejo de departamentos sociales
- La Gringa: Calle del Sol

El principal objetivo del estudio hidrológico fue la estimación de caudales para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, en los puntos de control y de descarga del conjunto de quebradas del pie andino. Para ello se realiza un análisis de frecuencia de las precipitaciones en las estaciones de la zona, cuyos resultados se incluyen en el (CUADRO ANEXO N°8-11).



CUADRO ANEXO N° 8-11: Precipitaciones Diarias Máximas para Diferentes Períodos de Retorno [mm].

8.1.1.1.2 Estación	8.1.1.1.3 A latitud 8.1.1.1.4 m.s.n.m	Período de Retorno, en años					
		2	5	10	25	50	100
Antupiren	920	49,6	68,2	80,5	96,0	107,7	119,3
La Ermita	1.350	52,9	75,9	91,6	112,0	127,6	143,4
Cerro Calan	800	52,0	73,8	89,0	109,1	124,5	140,4
Pirque	670	56,7	75,4	87,5	102,5	113,6	124,6
Quebrada Ramón	800	45,8	62,8	74,1	88,3	98,9	109,5
Terraza of. DGA	560	44,7	63,9	76,9	93,9	106,7	119,8
Tobalaba	654	45,9	64,3	76,7	92,5	104,5	116,6
La Florida	665	55,5	75,4	89,0	106,4	119,7	133,2
La Obra	780	78,9	107,1	126,8	153,0	173,4	194,6

Fuente: Ayala Cabrera y Asociados (2008)

A partir de estos resultados se determinaron isoyetas y curvas IDF, y a partir de esto las precipitaciones en las cuencas de estudio para periodo de retorno de 10 años. Posteriormente, y utilizando el método racional, se estimaron los caudales de crecida, cuyo resumen para las cuencas en la comuna se presentan en el (CUADRO N°8-12).

CUADRO N° 8-12: Caudales de Crecida Quebradas en Estudio.

Cuencas	Nombre	Precipitación T= 10 años (mm.)	Método Racional (m ³ /s)					
			T= 2 años	T= 5 años	T= 10 años	T= 25 años	T= 50 años	T= 100 años
O-15/ O-14	Peñalolén	80,0	4,8	6,6	8,0	10,6	12,8	15,5
O-13	Nido de Águilas	80,5	6,8	9,3	11,4	14,9	18,1	21,9
O-12	Lo Hermida	80,0	3,5	4,7	5,8	7,6	9,2	11,1
O-12a	Sin Nombre	80,0	3,2	4,3	5,3	7,0	8,4	10,2
O-11	La Gringa	81,0	2,2	3,1	3,8	4,9	6,0	7,2

Fuente: Ayala Cabrera y Asociados (2008)

En base a la experiencia producto de los análisis de los eventos aluvionales de Antofagasta 1991 y Santiago 1993, las características de los eventos de precipitación, y a la caracterización geológica y geomorfológica realizada, este estudio define un caudal detrítico para un subconjunto de las cuencas estudiadas, entre las cuales se encuentra únicamente la quebrada Nido de Águila en la comuna de Peñalolén. Para esto, basado en el estudio “Análisis de la Vulnerabilidad del Sector Oriente de la Ciudad de Santiago ante la ocurrencia de Aluviones y Crecidas” de la Dirección de Vialidad del MOP de 1996 (AC Ingenieros Consultores Ltda.), según el cual la concentración más alta de sólidos puede alcanzar valores del orden de 45% como cota superior, junto con el análisis de otros antecedentes, se define una concentración volumétrica del 45%

para los periodos de retorno de 50 y 100 años. Los caudales finales se presentan en el (CUADRO ANEXO N°8-13).

CUADRO ANEXO N° 8-13: Caudales de Crecida Detríticos Quebradas en Estudio.

Denominación PRMS	Quebrada	Caudal Líquido (m3/s)				Caudal Detrítico (m3/s)			
		T= 10 años	T= 25 años	T= 50 años	T= 100 años	T= 10 años	T= 25 años	T= 50 años	T= 100 años
O-15/O-14	Peñalolén	8,0	10,6	12,8	15,5	-	-	-	-
O-13	Nido de Águilas	11,4	14,9	18,1	21,9	-	-	32,9	39,8
O-12	Lo Hermida	5,8	7,6	9,2	11,1	-	-	-	-
O-12a	Sin Nombre	5,3	7,0	8,4	10,2	-	-	-	-
O-11	La Gringa	3,8	4,9	6,0	7,2	-	-	-	-

Fuente: Ayala Cabrera y Asociados (2008)

Finalmente, se desarrolló un estudio hidráulico, que, a través de modelos HEC-RAS, tuvo como objetivo determinar las características de los escurrimientos tanto líquidos como detríticos en las diferentes quebradas. Se determinaron los niveles y características de escurrimientos asociados a caudales de diferente período de retorno, estableciendo a partir de ello el comportamiento de los cauces durante crecidas. La metodología consideró la evaluación de caudales sucesivamente crecientes hasta identificar el valor para el cual se origina rebase de una o ambas riveras, la identificación de puntos críticos y se estimaron revanchas disponibles para los distintos periodos de retorno, estableciendo como valor mínimo de 0,5 m, considerándose dicho valor como un límite físico razonables para evitar posibilidad de desborde por efecto de ondas asociadas a la turbulencia del flujo.

8.3.1.9. Obras DOH en Quebrada Macul y EIA

8.3.1.9.1. Determinación de amenazas actuales por aluviones e inundaciones y su representación por medio de Mapas de Intensidades de Amenazas en la Quebrada Macul Región Metropolitana (Geotest, 2018)

Este estudio busca determinar la amenaza existente en la Quebrada de Macul, y sus zonas de riesgo asociadas en las comunas de Peñalolén y La Florida, y validar el beneficio de las medidas propuestas. Para esto el estudio consideró la identificación, documentación y evaluación de todas las amenazas para los procesos de aluvión e inundación; el desarrollo de mapas de intensidades para la situación actual, la propagación de las amenazas para procesos hidrometeorológicos (aluviones, inundaciones) por medio de modelos hidráulicos a base de un modelo digital de terreno y la elaboración de propuestas preliminares de medidas de mitigación.

8.3.1.9.2. Análisis de la vulnerabilidad del sector oriente de la ciudad de Santiago ante la ocurrencia de aluviones y crecidas, Región Metropolitana. (Ayala, Cabrera y Asociados Ltda., 1996)

Este estudio tuvo por objetivo fundamental evaluar la vulnerabilidad o grado de riesgo que presenta el sector oriente de la ciudad de Santiago, con relación a la ocurrencia y comportamiento de las crecidas líquidas y de los flujos de detritos o aluviones generados en las cuencas afluentes de la zona.

Este estudio analizó un conjunto de quebradas que presentaron mayores problemas durante el evento de 3 de mayo de 1993, entre las que se incluyen la quebrada Nido de Águilas, hasta la Avenida Diagonal Las Torres, y de la quebrada de Macul hasta el cruce con el canal Las Perdices.

El estudio hidrológico se basó en la aplicación de relaciones precipitación escorrentía, tales como el Hidrograma Unitario Sintético, Formulas de Verni y King y Racional con la metodología propuesta en el estudio “Análisis de Eventos Hidrometeorológicos Extremos. Caudales Máximos y Mínimos” (DGA, 1995). Los valores finalmente determinados de caudal líquido se resumen en El (CUADRO ANEXO N°8-14).

CUADRO ANEXO N° 8-14: Caudales de Crecidas Líquidas del Estudio de Riesgos Quebradas del Sector Oriente de Santiago.

Período de Retorno [años]	Caudal Líquido [m ³ /s]	
	Nido de Águila	De Macul
10	10	16
25	17	31
50	24	51
100	32	75
200	41	94

Fuente: Ayala Cabrera y Asociados (1996).

Los caudales detríticos fueron estimados en base a una revisión de estudios previos, de los cuales se estimó la concentración de detritos para el evento ocurrido en mayo de 1993. El valor estimado correspondió a un 38 % según, el estudio “Proyecto para el Control de Avenidas en la Quebrada de Macul” (AC Ingenieros consultores, 1994). En el (CUADRO ANEXO N°8-15), se resumen los caudales generados en el estudio señalado.

CUADRO ANEXO N° 8-15: Caudales de Crecidas Detríticas del Estudio de Riesgos Quebradas del Sector Oriente de Santiago.

Período de Retorno [años]	Caudal Detrítico [m ³ /s]	
	Nido de Águila	De Macul
50	39	82
100	52	121
200	66	152

Fuente: Ayala Cabrera y Asociados (1996).

8.3.2. Descripción cuencas aportantes

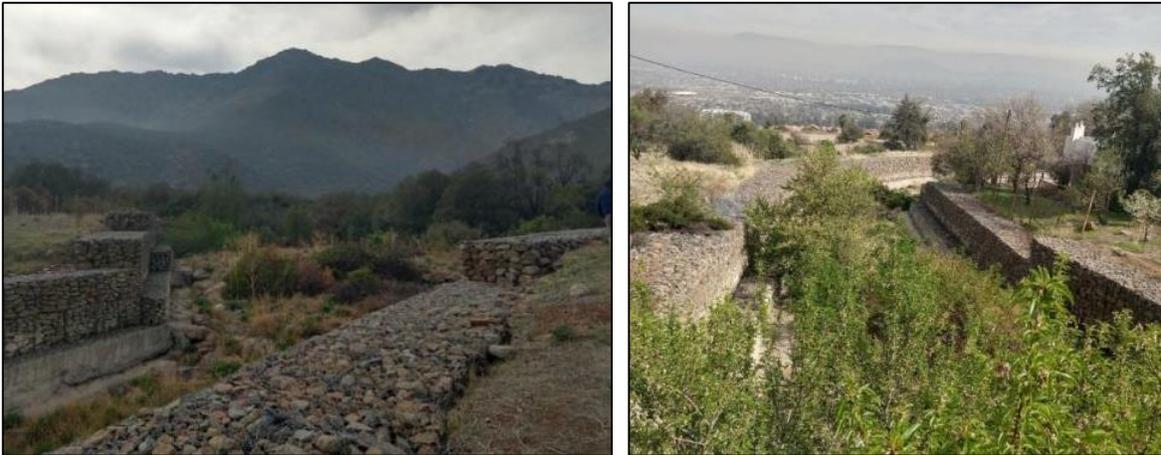


A continuación, se presenta una breve descripción para cada sistema, de acuerdo a la revisión de antecedentes y a la información obtenida durante la visita a terreno realizada el día 4 de septiembre de 2019.

8.3.2.1. Quebrada Peñalolén

La quebrada Peñalolén se desarrolla en forma natural en su zona superior hasta llegar al recinto militar, ubicado en Av. Las Palmas, lugar en el cual es completamente canalizada, según se muestra en la (FIGURA ANEXO N°8-16). Se observa que no existe limpieza de la canalización en el tramo al interior del recinto militar.

FIGURA ANEXO N° 8-16: Inicio canalización quebrada Peñalolén (izquierda) y desarrollo al interior del recinto militar.



Fuente: Fotografías visita a terreno 04/09/2019.

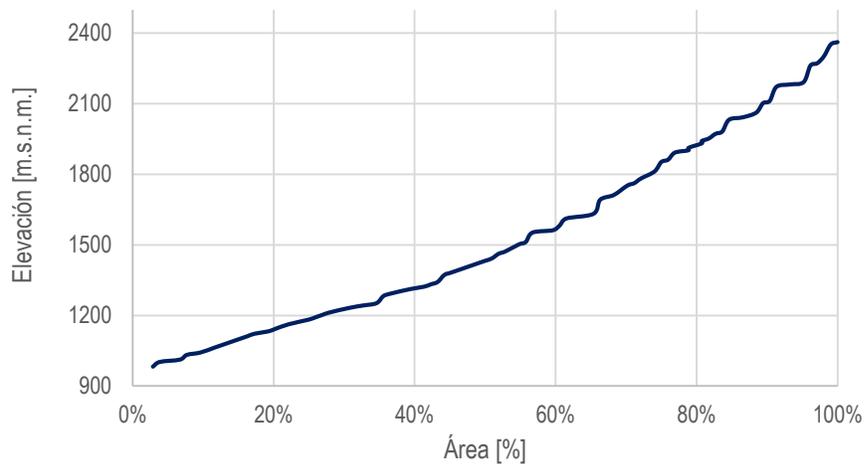
La quebrada canalizada fluye paralelamente a Av. Las Palmas y cruza la calle Álvaro Casanova, según se muestra en la (FIGURA ANEXO N°8-17). Aguas debajo de dicho cruce desemboca en un canal excavado en tierra, paralelo a la calle Álvaro Casanova, el cual luego vuelve a bifurcarse hacia el oriente. Este recorrido se mantiene hasta llegar a un muro de albañilería, construido por el dueño del fundo, dicho muro conduce el caudal hasta Avenida José Arrieta, en donde descarga sin ningún tipo de obra que proteja las calles o el entorno. En la (FIGURA ANEXO N°8-18), se presenta la curva hipsométrica de la cuenca.

FIGURA ANEXO N° 8-17: Canalización quebrada Peñalolén paralela a Av. Las Palmas (izquierda) y puente en cruce con calle Álvaro Casanova (derecha).



Fuente: Fotografías visita a terreno 04/09/2019.

FIGURA ANEXO N° 8-18: Curva hipsométrica Quebrada de Peñalolén.



Fuente: Elaboración propia.

8.3.2.2. Quebrada Nido de Águila

La quebrada Nido de Águila, también llamada Caballero de la Montaña conserva en su zona alta características naturales, con presencia de árboles de gran tamaño y zonas concentradas de arbustos. Aun así, existen algunas obras sobre la cota 850 en el mismo lecho de la quebrada.

El cauce ingresa al sector urbano al poniente de la calle Álvaro Casanova y escurre paralelamente a la calle Las Vertientes mediante una canalización que presenta una serie de estructuras decantadoras o disipadores de energía, zona en la cual no se observa un buen mantenimiento.

El cauce cruza la calle Álvaro Casanova a través de un badén, y se observa una serie de estructuras (lomos de toro) que buscan dirigir el escurrimiento hacia la canalización aguas abajo de la calle Álvaro Casanova,



según se muestra en la (FIGURA ANEXO N°8-19). Esta canalización presenta dimensiones menores a las observadas hacia aguas arriba, lo que provoca que mucha del agua de la quebrada termine bajando por la calle Las Vertientes.

FIGURA ANEXO N° 8-19: Cruce Quebrada Nido de Águilas en badén calle Álvaro Casanova (izquierda) y canalización hacia aguas abajo (derecha).



Fuente: Fotografías visita a terreno 04/09/2019

Continuando con su desarrollo, el cauce se caracteriza por un desorden de canalizaciones, pasando de fondo natural a revestimientos de mampostería y hormigón. En la zona más cercana a Álvaro Casanova, la canalización revestida en mampostería se ha ido socavando, provocando que queden al aire pasos de alcantarillas y agua potable. Aguas abajo la canalización se encuentra muy intervenida con obras menores que cruzan la quebrada, por ejemplo: rejas, murallas, etc., que tienen como finalidad proteger a los loteos del lugar de posibles robos.

Pocos metros antes de descargar en la Avenida Diagonal las Torres, el canal cruza la calle Caballero de la Montaña, y cuya estructura en este punto se observa en la (FIGURA ANEXO 8-20). El caudal que conduce esta quebrada descarga directamente a Avenida Diagonal Las Torres, haciendo que las aguas se desplacen luego por la Avenida José Arrieta. En la (FIGURA ANEXO N°8-21), se presenta la curva hipsométrica de la cuenca.

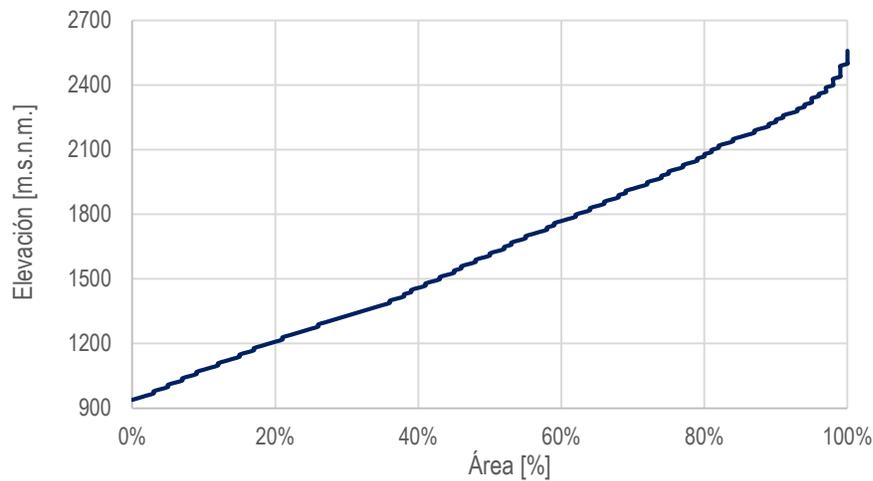


FIGURA ANEXO N° 8-20: Canalización aguas arriba de la calle Caballero de la Montaña (izquierda) y aguas abajo (derecha).



Fuente: Fotografías visita a terreno 04/09/2019

FIGURA ANEXO N° 8-21: Curva hipsométrica Quebrada Nido de Águila.



Fuente: Elaboración propia.

8.3.2.3. Quebrada Lo Hermida

En la zona alta, antes de calle Diagonal Las Torres, la quebrada Lo Hermida se encuentra, prácticamente, sin mayores intervenciones. La sección principal del flujo está cubierta por matorral y árboles, mientras que, saliendo hacia las laderas, el terreno se encuentra seco, sin vegetación y expuesto a la erosión. Esta zona corresponde a dos ramales se juntan unos pocos metros aguas arriba del cruce de la quebrada con la avenida Diagonal Las Torres. La quebrada cruza Avenida Diagonal Las Torres a través de una tubería, encontrándose canalizada desde ese punto hacia aguas abajo, según se muestra en la (FIGURA ANEXO N°8-22).



FIGURA ANEXO N° 8-22: Quebrada Lo Hermida canalizada aguas abajo del cruce con Avenida Diagonal Las Torres.



Fuente: Fotografías visita a terreno 04/09/2019.

Hacia aguas abajo el cauce se encuentra por tramos revestido, excavado en tierra o bien entubado completamente. En algunos tramos se observa la cercanía de las casas con los bordes del canal y existe una sección en la cual las casas se tomaron el territorio contiguo, taparon el canal y realizaron construcciones no autorizadas arriba del canal, mientras que en algunos puntos se observan acumulaciones de basura, de acuerdo a lo presentado en la (FIGURA ANEXO N°8-23).

FIGURA ANEXO N° 8-23: Secciones Quebrada Lo Hermida.



Fuente: Fotografías visita a terreno 04/09/2019



La quebrada descarga finalmente al canal Las Perdices, sección en que existe una rejilla y cuyo ingreso se encuentra controlado por dos compuertas, las cuales se encuentran sin mantenimiento y oxidadas. Durante la vista solo una de las compuertas se encontraba parcialmente abierta, según se observa en la (FIGURA ANEXO N°8-24).

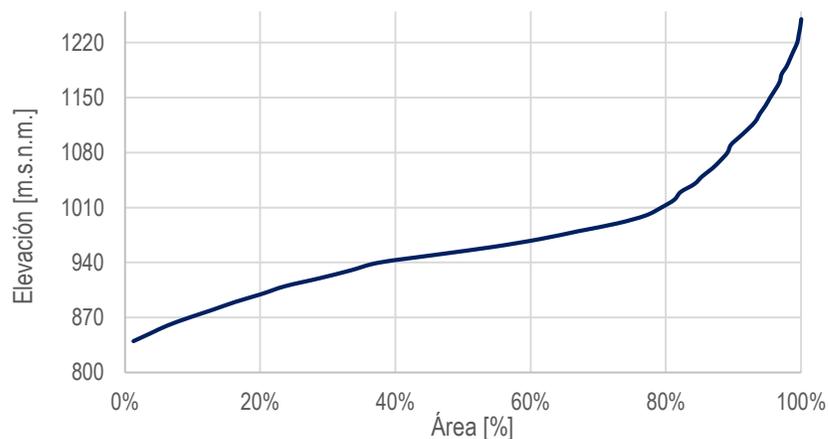
FIGURA ANEXO N° 8-24: Quebrada Lo Hermida en punto de descarga al canal Las Perdices.



Fuente: Fotografías visita a terreno 04/09/2019

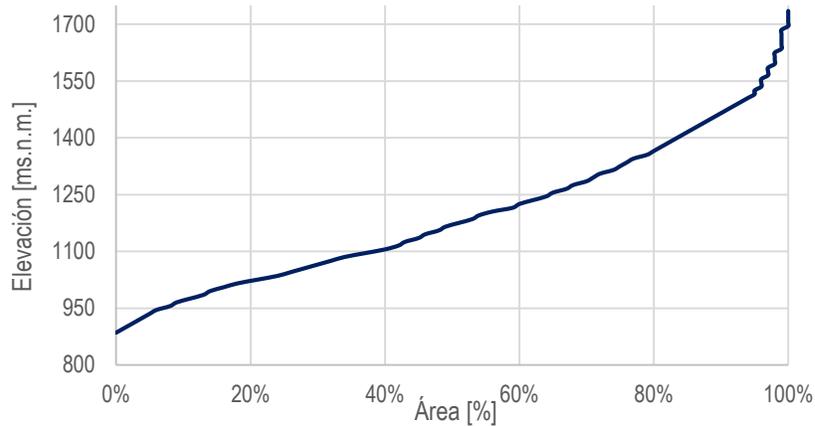
Esta quebrada presenta igualmente un ramal Sur que se interna en propiedad de la Universidad Adolfo Ibáñez y según datos estudios revisados este ramal aporta un caudal considerable ya que recibe todas las aguas lluvias que se originan por la infraestructura de la universidad. En la (FIGURA ANEXO N°8-25) y en la (FIGURA ANEXO N°8-26), se presentan las curvas hipsométricas de la Quebrada Lo Hermida, en sus ramales norte y sur, respectivamente.

FIGURA ANEXO N° 8-25: Curva hipsométrica Quebrada Lo Hermida (norte).



Fuente: Elaboración propia

FIGURA ANEXO N°8-26: Curva hipsométrica Quebrada Lo Hermida (sur).



Fuente: Elaboración propia

8.3.2.4. Quebrada de Macul

La quebrada tiene su origen 8 km. aguas arriba de su intersección con el Canal Las Perdices, en la comuna de La Florida, y termina en la intersección con Av. Tobalaba, en la misma comuna. Luego la quebrada continúa canalizada recibiendo el nombre de Zanjón de la Aguada.

La quebrada de Macul es una de las quebradas más activas de Santiago, en ella han ocurrido catástrofes por aludes en años anteriores. Su zona alta se caracteriza por encontrarse sin mayores alteraciones, salvo basura, el cauce posee gran cantidad de rocas, que son fáciles de transportar en crecidas.

La zona media se encuentra alterada a través de siete piscinas decantadoras diseñadas para reducir la energía del escurrimiento en crecidas, construidas luego del aluvión de 1993. En la (FIGURA ANEXO N° 8-27), se muestran algunas de estas obras.

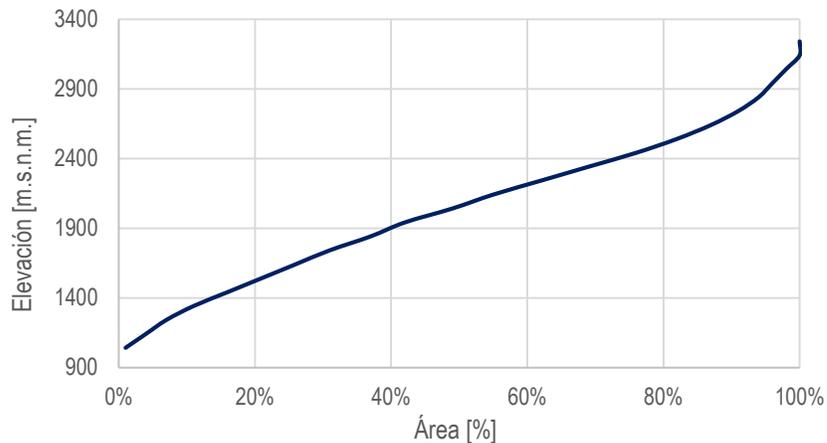
FIGURA ANEXO N° 8-27: Obras en Quebrada Macul.



Fuente: Fotografías visita a terreno 04/09/2019.

Aguas abajo, la quebrada recupera su forma natural, aunque rodeada de urbanizaciones que hacen de la quebrada su descarga de aguas y basuras. Finalmente, la quebrada se canaliza en una obra mayor bajo Avda. Tobalaba, que implica la solución al paso bajo el canal San Carlos, y descarga en una canalización conocida como el Zanjón de la Aguada. En la (FIGURA ANEXO N°8-28), se presenta la curva hipsométrica de la cuenca.

FIGURA ANEXO N° 8-28: Curva hipsométrica Quebrada de Macul.



Fuente: Elaboración propia.

8.3.3. Información hidrometeorológica

Se recopiló la información meteorológica de la red de estaciones de monitoreo de la Dirección General de Aguas (DGA) y de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). En la (FIGURA ANEXO N°8-29), se presenta la ubicación de todas las estaciones meteorológica y pluviométrica de la red de estaciones, mientras que la extensión del registro se presenta en el (CUADRO ANEXO N°8-16). La información recopilada corresponde a valores diarios de precipitación, a partir de los cuales se estiman los valores máximos anuales en 24 horas.

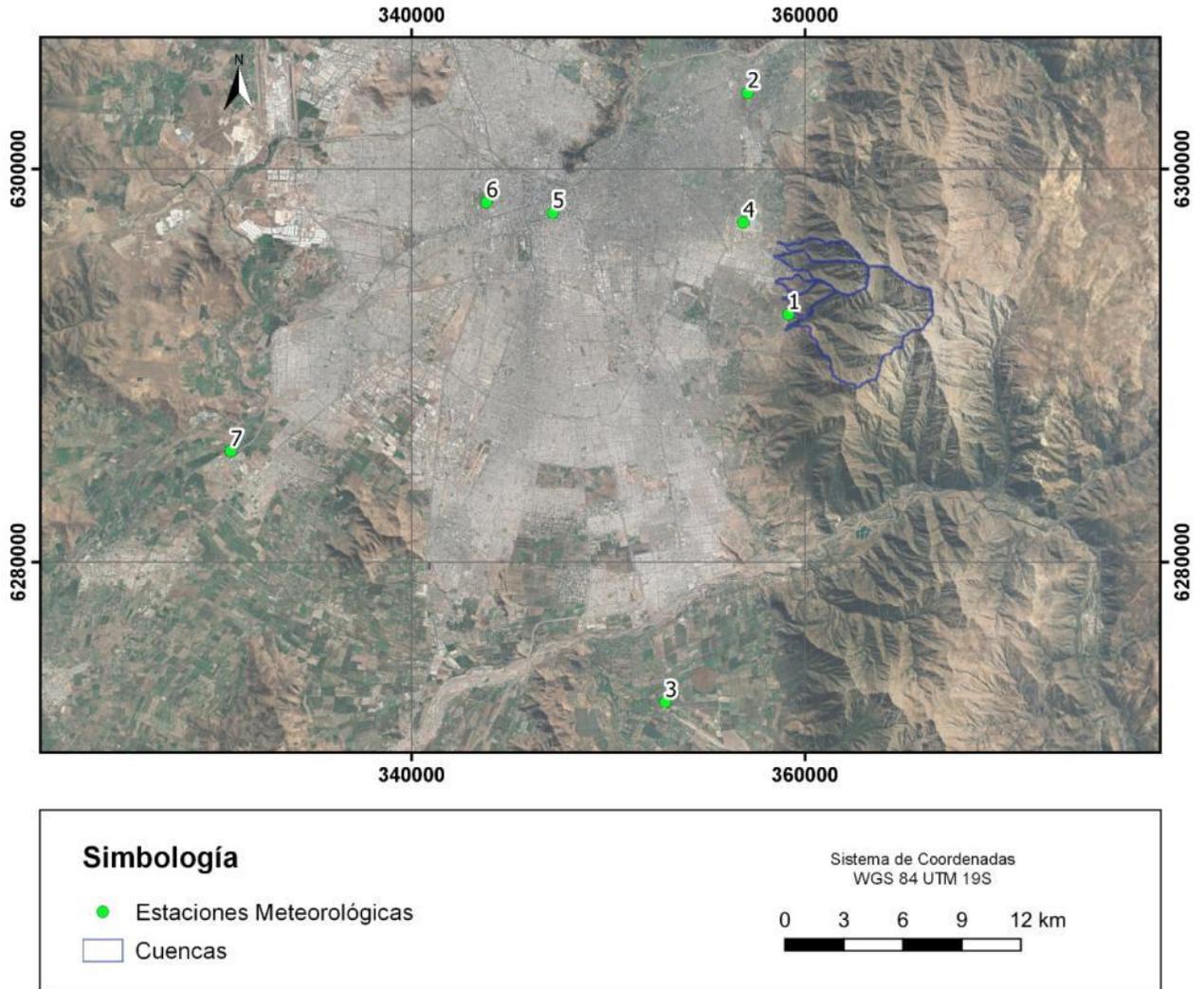
CUADRO ANEXO N° 8-16: Estaciones pluviométricas área de estudio.

N° Mapa	Estación	Entidad	Cota [m.s.n.m.]	Periodo de registro
1	Antupirén	DGA	904	1980-2020
2	Cerro Calán	DGA	848	1976-2020
3	Pirque	DGA	659	1967-2020
4	Tobalaba	DMC	650	1969-2020
5	Terraza Oficinas Centrales DGA	DGA	560	1960-2020
6	Quinta Normal	DMC	527	1950-2020
7	Fundo Marruecos	DGA	430	1989-2020

Fuente: Elaboración propia



FIGURA ANEXO N° 8-29: Ubicaciones estaciones meteorológicas.



Fuente: Elaboración propia

8.3.4. Precipitaciones máximas

Para la obtención de la precipitación máxima en 24 hrs., se realizó un análisis de frecuencia utilizando los valores máximos anuales en 24 hrs., en las estaciones meteorológicas. Tomando en cuenta que la extensión de los registros varía entre las estaciones, y buscando además representar las condiciones climáticas actuales, se optó por utilizar un periodo homogéneo de 30 años, tomando los datos entre 1990 y 2020, detallados en el (CUADRO ANEXO N°8-17).



CUADRO ANEXO N° 8-17: Precipitaciones máximas anuales en 24 hrs.

Año	Antupirén	Terraza Oficinas Centrales DGA	Cerro Calan	Tobalaba	Quinta Normal	Fundo Marruecos	Pirque
1990	51	53	59,6	54	56,1	8,5	55,5
1991	75	39	68	66,6	36,1	45,5	56
1992	55	46,9	62,4	50,2	60,8	51	73
1993	40	34,4	42,5	46	35,4	29,3	50
1994	53	27	48,5	51,6	33,5	30	51,5
1995	29,5	29,4	30,3	34	24,9	38,9	50
1996	35,7	40,1	36,4	39	41,4	31,1	41
1997	63	58	56	50,7	54,2	66	63
1998	17,5	19,3	30	18,5	16,5	17,1	23
1999	42	32,7	38	37,9	31,3	34,5	47
2000	89,5	67,6	95	105,3	58,4	72,5	117
2001	56,4	58	63,7	54,8	57,7	57,5	62,6
2002	102	109,4	146,3	103	111,1	103,5	68,5
2003	62	55,5	50	47,6	59,2	60	78,6
2004	82,5	46,2	70,5	50,6	44,6	45,8	67,8
2005	62,5	62,3	70,8	65,4	57,5	53,8	67
2006	45	62,5	51,3	47,4	57,4	53	64
2007	39	29,1	32	29,6	25,6	17	36,5
2008	100	77,7	100,5	83,1	78,3	85	93
2009	50	20	37	40,4	39,9	47,8	57,5
2010	76	44	61	51,6	36,7	25	48,9
2011	37	17,5	27,6	31,5	19,8	18,5	37,5
2012	35,5	22,6	38,5	27,3	24,6	35	41,2
2013	39	34,3	50,2	36,1	33,4	40	45,5
2014	45	27,9	31	38,3	28,8	26,5	36,7
2015	39	45,5	56,8	32,7	42,1	46	50,3
2016	70	41	61	65,2	50	0	66
2017	50	52,9	53,6	47,9	51,4	21	44
2018	39	36,1	36,5	31,3	35,2	22	29
2019	21	12,3	17,4	16,4	14,4	14	31,5
2020	52	32,4	40,5	43,5	42,8	40	49,5

Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes estaciones DGA y DMC

Los resultados del análisis de frecuencia se presentan en el (CUADRO ANEXO N°8-18), donde se incorpora la función de distribución adoptada y los valores asociados a los distintos periodos de retorno. La selección de la función de distribución se basó en el análisis estadístico del test chi-cuadrado, así como en la revisión gráfica de los resultados, gráficos que se presentan en la (FIGURA ANEXO N°8-30).

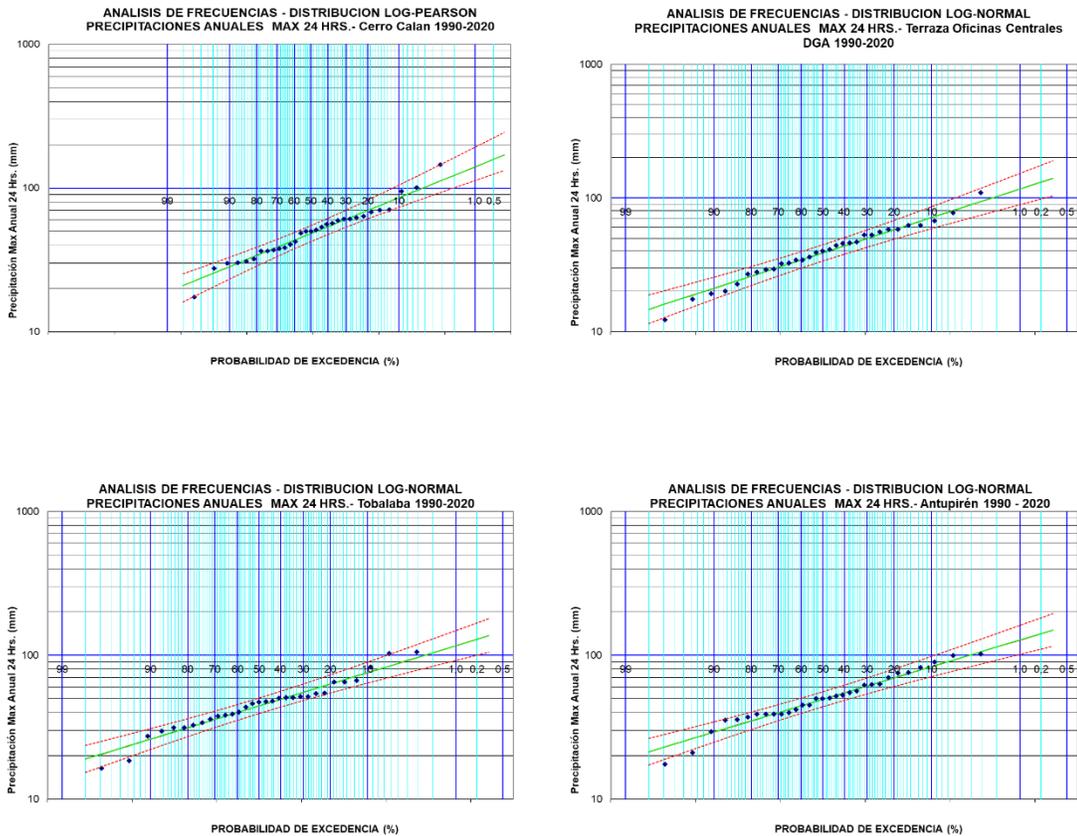


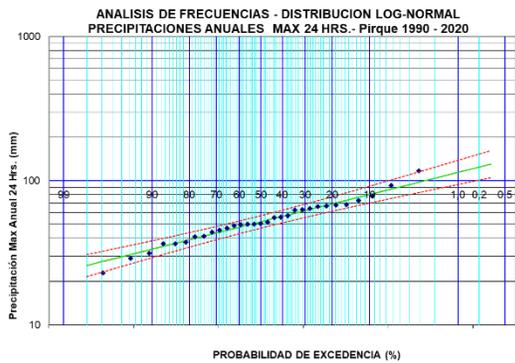
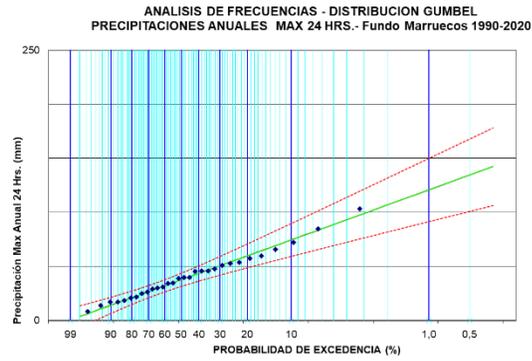
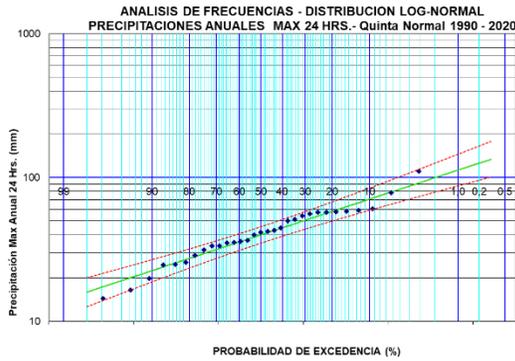
CUADRO ANEXO N° 8-18: Resultados análisis de frecuencia para distintas estaciones meteorológicas.

Periodo de retorno [años]	Terraza Oficinas Centrales DGA	Cerro Calan	Tobalaba	Quinta Normal	Fundo Marruecos	Pirque
	Log-Normal	Log-Pearson	Log-Normal	Log-Normal	Gumbel	Log-Normal
2	49,4	38,8	44,5	40,0	37,8	51,9
5	69,6	57,8	63,1	58,1	60,0	69,2
10	83,4	71,2	75,8	70,8	74,7	80,3
20	96,7	84,6	101,2	88,1	88,8	90,9
50	114,3	102,7	122,9	104,5	107,1	104,5
100	127,8	116,9	140,2	117,0	120,8	114,6

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA ANEXO N° 8-30: Resultados gráficos análisis de frecuencia.

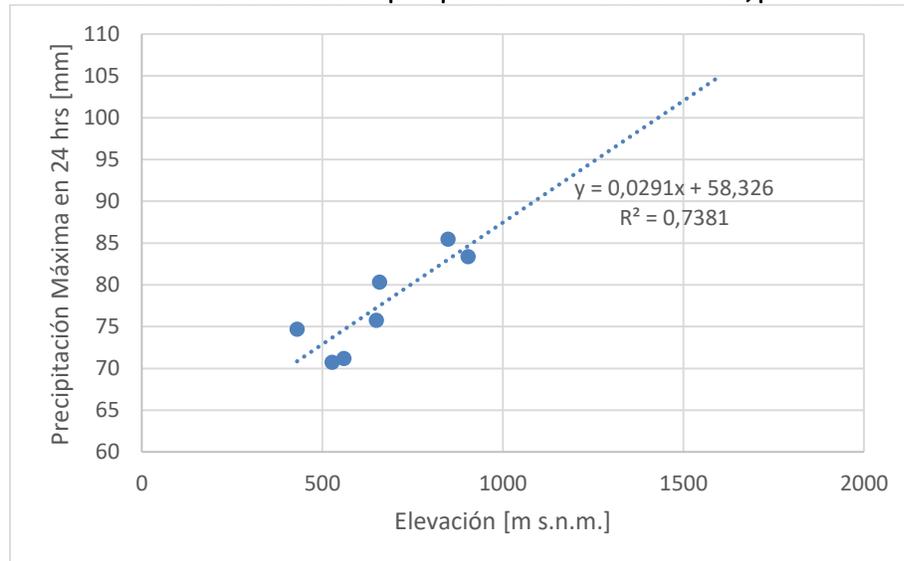




Fuente: Elaboración propia.

A partir de estos resultados, se construyeron gradientes de precipitación asociados a cada periodo de retorno, considerando la elevación de cada estación. La (FIGURA ANEXO N°8-31), presenta un ejemplo gráfico del gradiente generado, correspondiente en este caso al periodo de retorno de 10 años. Luego, el (CUADRO ANEXO N°8-19), presenta el gradiente de precipitación con respecto a la altura media, para cada periodo de retorno.

FIGURA ANEXO N° 8-31: Gradiente de precipitación máxima en 24 horas, para T = 10 años.



Fuente: Elaboración propia.

CUADRO ANEXO N° 8-19: Gradiente de precipitación para distintos periodos de retorno a partir de la altura media de la cuenca.

Periodo de retorno [años]	Gradiente de Precipitación [mm]
T=2	$Pp_m = 0,026 * H_m + 27,1$
T=5	$Pp_m = 0,027 * H_m + 46,0$
T=10	$Pp_m = 0.029 * H_m + 58,3$
T=20	$Pp_m = 0.031 * H_m + 70,0$
T=50	$Pp_m = 0.035 * H_m + 84,8$
T=100	$Pp_m = 0.040 * H_m + 98,0$

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, a partir de estas gradientes, y considerando la elevación media de cada cuenca, se obtuvieron los valores de precipitación máxima en 24 horas para periodos de retorno de 2 a 100 años (CUADRO ANEXO N°8-20).

CUADRO ANEXO N° 8-20: Precipitación máxima en 24 hrs. para cada una de las cuencas.

Cuenca	Hmedia [m s.n.m.]	Precipitación máxima en 24 hrs. [mm]					
		T=2	T=5	T=10	T=20	T=50	T=100
Quebrada de Peñalolén	1.510	66,9	87,5	102,3	117,4	138,3	158,3
Quebrada Nido de Águila	1.573	68,6	89,2	104,2	119,4	140,5	160,8
Quebrada Lo Hermida (norte)	1.029	54,3	74,3	88,3	102,3	121,3	139,1
Quebrada Lo Hermida (sur)	1.241	59,9	80,1	94,5	108,9	128,8	147,5
Quebrada de Macul	2.058	81,4	102,5	118,3	134,6	157,7	180,1

Fuente: Elaboración propia

8.3.5. Caudales de crecida

8.3.5.1. Metodologías utilizadas para la definición de caudales de crecidas en cuencas sin control fluviométrico

Para definir los caudales de crecidas en el caso de las cuencas sin control fluviométrico, se utilizaron relaciones de precipitación escorrentía, a partir de las precipitaciones máximas en 24 horas, de acuerdo a la distribución espacial de las estaciones en la cuenca. Para ello se estimaron las precipitaciones máximas en 24 horas para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años mediante análisis de frecuencia. Posteriormente, se aplicaron las metodologías definidas en el “Manual de Cálculo y Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin información fluviométrica” (DGA-MOP, 1995), en que se plantea básicamente la aplicación de tres fórmulas empíricas para el cálculo de crecidas en cuencas pluviales a partir de la información pluviométrica y las características morfológicas de cada cuenca, en que se aplican parámetros relativos a cada región. Estos métodos son DGA-AC, Verni y King modificado, la Fórmula Racional DGA y el Hidrograma Unitario. Adicionalmente, para cuencas menores, se ha considerado la Fórmula Racional

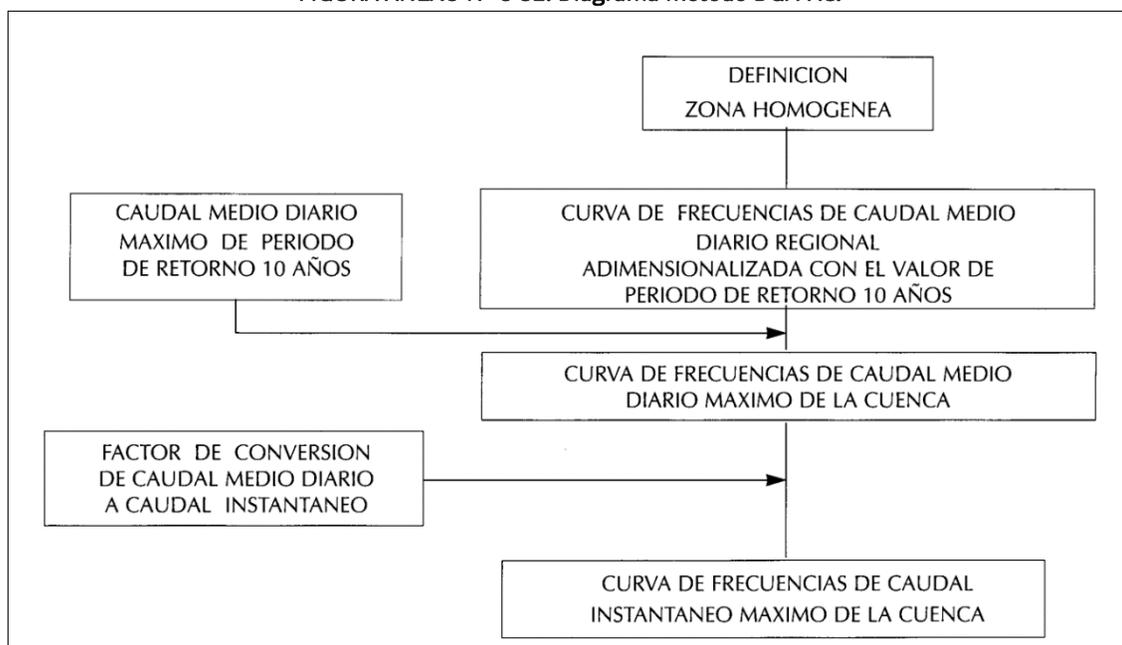
definida de acuerdo al Manual de Carreteras Volumen N°3 Instrucciones y Criterios de Diseño. (MOP, 2018). Cada uno de los métodos se detalla a continuación:

8.3.5.2. Método DGA-AC

El método DGA-AC para crecidas pluviales, corresponde a un análisis regional de crecidas de origen pluvial, basado en series de máximos anuales generadas a partir de información de caudales medios diarios máximos e instantáneos máximos del período pluvial, de 234 estaciones de control fluviométrico. Este método, que abarca estaciones desde la III a la IX Región, es válido para cuencas pluviales o pluvionivales sin información fluviométrica y con áreas comprendidas entre 20 y 10.000 (km²). Su uso está restringido a períodos de retorno inferiores a 100 años.

El método consiste básicamente en determinar una curva de frecuencias para el caudal instantáneo máximo de la cuenca, en base al procedimiento esquematizado en el diagrama presentado en la (FIGURA ANEXO N°8-32).

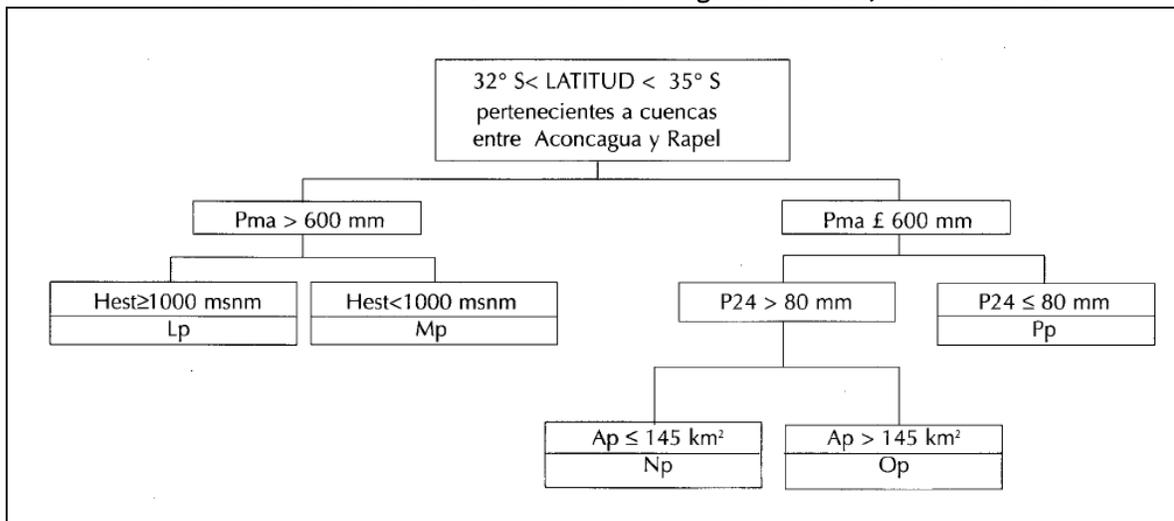
FIGURA ANEXO N° 8-32: Diagrama método DGA-AC.



Fuente: Manual de Cálculo y Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica (DGA-MOP, 1995).

Se definen las cuencas ubicadas entre las latitudes 32°S y 35°S, pertenecientes a las cuencas entre Aconcagua y Rapel, como Lp, Mp, Np, Op y Pp en función de las precipitaciones medias anuales (Pma), la precipitación máxima en 24 horas para periodo de retorno de 10 años (P24), las áreas pluviales (Ap) y la altura del punto de salida de la cuenca (Hest). En la (FIGURA ANEXO N° 8-33), se definen las zonas correspondientes.

FIGURA ANEXO N° 8-33: Definición Zonas Homogéneas Pluviales, método DGA-AC.



Fuente: Manual de Cálculo y Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica (DGA-MOP, 1995).

Una vez definidas las zonas homogéneas pluviales, se define la curva de frecuencia regional de caudales medios diarios máximos para distintos periodos de retorno, según lo establecido en el Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica (DGA-MOP, 1995).

Para la determinación de los caudales medios diarios de período de retorno de 10 años, se plantea la siguiente relación, correspondiente a la Región Metropolitana:

$$Q_{10} = 5,42 \cdot 10^{-8} \cdot Ap^{0,915} \cdot (P_{24}^{10})^{3,432}$$

Ecuación 1

donde:

Q_{10} : Caudal medio diario máximo de periodo de retorno 10 años [m^3/s]

Ap : Área pluvial de la cuenca [km^2]

P_{24}^{10} : Precipitación diaria máxima de periodo de retorno 10 años [mm]

Finalmente, a través de un factor de conversión asociado a las zonas homogéneas, se estima el caudal instantáneo máximo a partir del caudal medio diario máximo.

8.3.5.3. Método Verni y King modificado

Este método relaciona el caudal instantáneo máximo de una crecida con la precipitación diaria máxima y el área pluvial a través de una relación de potencias. Esta fórmula se establece para cuencas sin control fluviométrico de régimen pluvial o nivopluvial, con áreas entre 20 y 10.000 km^2 y, periodos de retorno mayores a 30 años. Tiene la siguiente forma:

$$Q = C(T) \cdot 0,00618 \cdot Ap^{0,88} \cdot P_{24}^{1,24}$$

Ecuación 2

donde:

- Q : Caudal instantáneo máximo de periodo de retorno T años [m^3/s]
- $C(T)$: Coeficiente empírico de periodo de retorno T años
- Ap : Área pluvial de la cuenca [km^2]
- P_{24} : Precipitación diaria máxima asociada al periodo de retorno T años [mm]

Dado que los coeficientes no están definidos en el Manual para la Región Metropolitana, se consideran los valores correspondientes a la V y VI Región, optando al final por aquel que entregue resultados más desfavorables. El coeficiente empírico para período de retorno de 10 años para la V Región es de 0,29 y de 0,68 para la VI Región. La curva de frecuencia del coeficiente empírico para ambas regiones se presenta en el (CUADRO ANEXO N°8-21).

CUADRO ANEXO N° 8-21: Curva de frecuencia de coeficiente empírico V y VI Región para aplicación de Verni y King modificado.

T (años)	V Región	VI Región
	$C(T) / C(T=10)$	$C(T) / C(T=10)$
2	0,38	0,63
5	0,84	0,85
10	1,00	1,00
20	1,15	1,15
50	1,38	1,30
100	1,59	1,55

Fuente: Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluvimétrica (DGA-MOP, 1995).

8.3.5.4. Método de la Fórmula Racional

La expresión para la determinación del caudal máximo instantáneo de período de retorno T es la siguiente.

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{3,6}$$

Ecuación 3

donde:

- Q : Caudal instantáneo máximo de periodo de retorno T años (m^3/s)
- C : Coeficiente de escorrentía asociado al periodo de retorno T años
- Ap : Área pluvial de la cuenca (km^2)

i : Intensidad media de lluvia asociada al periodo de retorno T y a una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca pluvial (mm/hr)

Esta fórmula se establece para cuencas sin control fluviométrico de régimen pluvial o nivopluvial, con áreas entre 20 y 10.000 km² situadas entre las regiones III y IX. Los coeficientes C que se aplican son los mismos definidos para el método de Verni y King modificado (CUADRO ANEXO N°8-21).

Finalmente se aplican 3 fórmulas para determinar el tiempo de concentración de la cuenca, utilizando las características morfológicas de las cuencas, las cuales se indican a continuación.

- California Culverts Practice (1942) $tc = 0,95 \cdot \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0,385}$ Ecuación 4

- Giandotti $tc = \frac{4 \cdot A^{0,5} + 1,5 \cdot L}{0,8 \cdot \sqrt{H_m}}$ Ecuación 5

- Normas Españolas $tc = 0,72 \cdot \frac{L^{0,76}}{S^{0,19}}$ Ecuación 6

donde:

- tc : Tiempo de concentración (h)
- L : Longitud del cauce (km)
- S : Pendiente media de la cuenca (%)
- H : Diferencia de nivel entre las cotas extremas de la cuenca (m)
- H_m : Diferencia de nivel entre la cota media y la cota mínima de la cuenca (m)
- A : Área de la cuenca (km²)

La fórmula de Giandotti tiene una restricción en su utilización, debiendo verificarse que el tiempo de concentración esté dentro del rango definido por la siguiente ecuación:

$$\frac{L}{3,6} \geq tc \geq \frac{L}{5,4} \quad \text{Ecuación 7}$$

8.3.5.5. Método del hidrograma unitario TIPO LINSLEY

El método del hidrograma unitario tipo Linsley permite generar un hidrograma unitario sintético de la crecida, y con ello conocer el caudal máximo de la crecida, a partir de un hidrograma unitario adimensional y del cálculo de los parámetros básicos del hidrograma unitario sintético. Las relaciones que permiten estimar estos parámetros en la Zona I (Regiones III a la VI) son las siguientes:

$$t_p = 0,323 \left(\frac{L \cdot L_g}{S^{0,5}}\right)^{0,422} [hr] \quad \text{Ecuación 8}$$



$$t_B = 5,377 \cdot t_p^{0,805} \text{ [hr]}$$

Ecuación 9

$$q_p = 144,141 \cdot t_p^{-0,796} \text{ [l/s/mm/km}^2\text{]}$$

Ecuación 10

donde:

- t_p : Tiempo al peak (hr)
- t_B : Tiempo base (hr)
- q_p : Caudal peak (l/s/mm/km²)
- L : Longitud del cauce principal (km)
- L_g : Longitud del cauce principal hasta el centro de gravedad de la cuenca [km]
- S : Área de la cuenca (km²)

Este método se establece para cuencas sin control fluviométrico de régimen pluvial o nivopluvial, con áreas entre 10 y 45.000 km² situadas entre las regiones III y X. El hidrograma unitario adimensional, por su parte, queda definido según se indica en el (CUADRO ANEXO N°8-22).

CUADRO ANEXO N° 8-22: Coeficientes de Distribución para el Hidrograma Unitario Sintético.

Razón t/t_p	Razón q/q_p
0	0
0,30	0,2
0,50	0,4
0,60	0,6
0,75	0,8
1,00	1,0
1,30	0,8
1,50	0,6
1,80	0,4
2,30	0,2
2,70	0,1

Fuente: Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica (DGA-MOP, 1995)

El hidrograma unitario se estima a partir del monto de la precipitación efectiva, el cual se obtiene, entre otras formas, a partir del método de la Curva Número, según se presenta a continuación.

$$P_{ef} = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{(P + 0,8 \cdot S)}$$

Ecuación 1

donde:

- P_{ef} : Precipitación efectiva [mm]

- P : Precipitación máxima en 24 hrs [mm]
 S : Retención potencial máxima

La retención potencial máxima se estima a partir del valor de la Curva Número (CN), tabulados en diferentes manuales.

$$CN = \frac{25.400}{254 + S} \quad \text{Ecuación 2}$$

8.3.5.6. Método de la Fórmula Racional – Manual de Carreteras

Al igual que en el caso de la fórmula racional señalada en el Manual de la DGA (DGA-MOP, 1995) la expresión para la determinación del caudal máximo instantáneo de período de retorno T es la siguiente, en este caso el método es utilizable en cuencas pequeñas de área menor a 25 km².

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{3,6} \quad \text{Ecuación 3}$$

donde:

- Q : Caudal instantáneo máximo de periodo de retorno T años [m³/s]
 C : Coeficiente de escorrentía asociado al periodo de retorno T años
 A_p : Área pluvial de la cuenca [km²]
 i : Intensidad media de lluvia asociada al periodo de retorno T y a una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca pluvial [mm/hr]

El coeficiente de escorrentía se determina en función de los valores indicados en el (CUADRO ANEXO N°8-23).



CUADRO ANEXO N° 8-23: Coeficientes de escorrentía (C) para T = 10 años.

Factor	Extremo	Alto	Normal	Bajo
Relieve	0,28-0,35 Escarpado con pendientes mayores que 30%	0,20-0,28 Montañoso con pendientes entre 10 y 30%	0,14-0,20 Con cerros y pendientes entre 5 y 10%	0,08-0,14 Relativamente plano con pendientes menores al 5%
Infiltración	0,12-0,16 Suelo rocoso, o arcilloso con capacidad de infiltración despreciable	0,08-0,12 Suelos arcillosos o limosos con baja capacidad de infiltración, mal drenados	0,06-0,08 Normales, bien drenados, textura mediana, limos arenosos, suelos arenosos	0,04-0,06 Suelos profundos de arena u otros suelos bien drenados con alta capacidad de infiltración
Cobertura vegetal	0,12-0,16 Cobertura escasa, terreno sin vegetación o escasa cobertura	0,08-0,12 Poca vegetación, terrenos cultivados o naturales, menos del 20% del área con buena cobertura vegetal	0,06-0,08 Regular a buena; 50% del área con praderas o bosques, no más del 50% cultivado	0,04-0,06 Buena a excelente; 90% del área con praderas, bosques o cobertura equivalente
Almacenamiento Superficial	0,10-0,12 Despreciable, pocas depresiones superficiales, sin zonas húmedas	0,08-0,10 Baja, sistema de cauces superficiales pequeños bien definidos, sin zonas húmedas	0,06-0,08 Normal; posibilidad de almacenamiento buena, zonas húmedas, pantanos, lagunas y lagos	0,04-0,06 Capacidad alta, sistema hidrográfico poco definido, buenas planicies de inundación o gran cantidad de zonas húmedas, lagunas o pantanos.
Si T > 10 años Amplificar Resultado por: T = 25 ; C x 1,10 T = 50 ; C x 1,20 T = 100 ; C x 1,25				

Fuente: Manual de Carreteras Volumen N°3 Instrucciones y Criterios de Diseño (MOP, 2018).

Para el cálculo de lluvias e intensidades con duración menor a una hora se utiliza la ecuación

$$P_t^T = (0,54 * t^{0,25} - 0,5)(0,21 \ln(T) + 0,52)P_1^{10} \quad \text{Ecuación 4}$$

donde:

P_t^T : Precipitación (mm) con periodo de retorno T años y duración t minutos.

8.3.5.7. Detalle resultados

Debido a que todas las cuencas estudiadas tienen un área menor a 25 km², solo fue posible aplicar la Fórmula Racional, de acuerdo a su formulación en el Manual de Carreteras.

Tiempo de concentración

A partir de los antecedentes morfológicos y utilizando distintos métodos de cálculo, se ha estimado el tiempo de concentración de las cuencas, resultados que se incluyen en el CUADRO ANEXO N°8-24.



CUADRO ANEXO N° 8-24: Cálculo del tiempo de concentración a partir de distintos métodos.

Cuenca	Tiempo de Concentración [hrs.]			
	California Culverts Practice (1942)	Giandotti	Norma Española	Seleccionado (promedio)
Quebrada de Peñalolén	0,31	0,41	1,05	0,59
Quebrada Nido de Águilas	0,36	0,46	1,18	0,67
Quebrada Lo Hermida (norte)	0,16	0,34	0,58	0,36
Quebrada Lo Hermida (sur)	0,18	0,37	0,66	0,40
Quebrada de Macul	0,46	0,61	1,48	0,85

Fuente: Elaboración propia

Coefficientes de escorrentía

La aplicación del método Racional, según lo establecido en el Manual de Carreteras, requiere de definir un valor para el coeficiente de escorrentía de la cuenca. El valor del coeficiente se construye a partir de lo indicado en el (CUADRO ANEXO N°8-25).

CUADRO ANEXO N° 8-25: Determinación Coeficiente de escorrentía.

Parámetro	Valor adoptado
Relieve	0,20
Infiltración	0,06
Cobertura Vegetal	0,08
Almacenamiento Superficial	0,08
Coeficiente de Escorrentía (C) para T=10 años	0,42

Fuente: Elaboración propia

Estimación de caudales de crecida

Finalmente, considerando los parámetros y coeficientes ya definidos, así como los valores de precipitación máxima en 24 hrs. Estimada para cada cuenca para un periodo de retorno de 10 años, se estimaron los caudales de crecida, resultados que se presentan en el (CUADRO ANEXO N°8-26).



CUADRO ANEXO N° 8-26: Caudales de crecida determinados a partir del Método Racional.

Cuenca	Caudal de crecida [m ³ /s] Método Racional					
	T=2	T=5	T=10	T=20	T=50	T=100
Quebrada de Peñalolén	4,95	7,25	9,22	11,64	13,77	15,58
Quebrada Nido de Águila	8,31	12,12	15,38	19,39	22,98	25,94
Quebrada Lo Hermida (norte)	1,81	2,78	3,60	4,58	5,34	6,17
Quebrada Lo Hermida (sur)	3,73	5,60	7,18	9,11	10,69	12,24
Quebrada de Macul	30,33	44,91	57,28	72,43	85,42	97,09

Fuente: Elaboración propia



ANEXO D: LISTAS DE ASISTENCIA

Lista de asistencia REUNIÓN N° 1: Inicio Estudio de Factibilidad Sanitaria



LISTADO DE ASISTENCIA

PROYECTO ID	NOMBRE DEL PROYECTO	MATERIA
079	ACTUALIZACION ESTUDIOS COMPLEMENTARIOS A LA MODIFICACIÓN PRC PEÑALOLÉN	Revisión de Inicio Estudio Factibilidad Sanitaria
FECHA	HORA	LUGAR
28/08/2019	12:02	SECEPLA, MUNICIPALIDAD PEÑALOLÉN

	Nombre	Institución u Organización y Cargo	Teléfono	Correo electrónico	Firma
1	Javier Castillo	Asesoría Urbana	224968114	javiercastillo@penalolen.cl	
2	Habel Urbana	Asesoría Urbana	224868114	hurbana@penalolen.cl	
3	Nestor Riquelme M.	Asesoría Urbana M. de Peñalolén	224868121	nriquelme@penalolen.cl	
4	Jorge Soto J.	Asesoría Urbana	224868114	jsoto@penalolen.cl	
5	Pedro Silva V.	INFRACON		PSILVA@INFRACON.cl	
6	Roberto Lara V.	INFRACON		rlara@infracon.cl	
7	Fabio Dabillao	INFRACON		fdabillao@infracon.cl	



Lisa de asistencia TERRENO N° 1: Recorrido de terreno comuna de Peñalolén



LISTADO DE ASISTENCIA

PROYECTO ID	NOMBRE DEL PROYECTO		MATERIA		
079	ACTUALIZACIÓN ESTUDIOS COMPLEMENTARIOS A LA MODIFICACIÓN PRC PEÑALOLÉN		Recorrido de terreno.		
FECHA	HORA	LUGAR			
04/04/2019	9:45 hr	COMUNA PEÑALOLÉN			

	Nombre	Institución u Organización y Cargo	Teléfono	Correo electrónico	Firma
1	Javier Castro	I. Municipalidad Peñalolén	224868114	javier.castro@penalolen.cl	
2	Nestor Riquelme Nakic	Municipalidad Peñalolén Asesoría Urbana	224868114	nriquelme@penalolen.cl	Riquelme
3	Roberto Soto J	M. Peñalolén	224868114	rsoto@penalolen.cl	
4	Andrés Zapata Arce	M. Peñalolén	89006155	arce@penalolen.cl	
5	Miguel A. Cabrera	M. Peñalolén	974410060	micabrera@penalolen.cl	
6	Pablo Badilla	INFRACON		pbadilla@infracon.cl	
7	Paulina Rodríguez	ICASS	93094802	paulina.rodriguez@icass.cl	



LISTADO DE ASISTENCIA

Nombre	Institución u Organización y Cargo	Teléfono	Correo electrónico	Firma
CAMILA MOLINA	ICASS	959644201	camila.molina@icass.cl	
RODRIGO RAUDEL	XTENA	996896730	rodrigo.raudel@xtena.cl	
PEDRO SILVA	INFRACON		PSILVA@INFRACON.CL	