

ETAPA IV

ANTEPROYECTO

ESTUDIO DE RIESGO Y PROTECCIÓN AMBIENTAL

Informe Estudio Fundado de Riesgos

“Proyecto de Actualización Plan Regulador Comunal de Lo Barnechea”

Licitación Pública ID N° 2735-14-LR19

Versión 1: AGOSTO 2022

Preparado por:



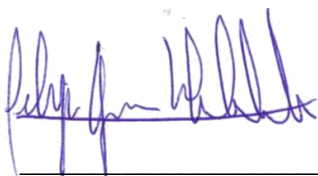
CONSULTORES
HABITERRA Ltda. CONSULTORES

Príncipe de Gales N° 5921
Of. 1009-1010
La Reina | Santiago
Telf. 56 2 2635 2768 | 2635 9620 | 2665 7344
E mail: pguzman@habitterra.cl
izapata@habitterra.cl |
Web www.habitterra.cl

Preparado para:



**DIRECCIÓN DE ASESORÍA URBANA Y
ESPACIO PÚBLICO (DAEP)**
MUNICIPALIDAD DE LO BARNECHEA
Av. El Rodeo 12.777 Piso 5,
Lo Barnechea | Santiago



FELIPE GARCÍA-HUIDOBRO COVARRUBIAS
Profesional Responsable del Estudio de Riesgos Naturales

EQUIPO TÉCNICO ESPECIALISTA

Estudio de Riesgos Naturales

Cargo	Descripción del cargo	Nombre
Geólogo	Encargado del Estudio de Riesgos en IPT	Felipe García-Huidobro Covarrubias
Ingeniera Civil	Encargada de estudio hidrológico e hidráulico	Macarena Facuse Meléndez

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	8
1.1	Marco jurídico	8
1.2	Alcance y limitaciones	9
1.3	Objetivos	10
1.4	Ubicación del área de estudio	10
1.5	Metodología general del estudio	12
1.5.1	Recopilación y revisión de antecedentes	12
1.5.2	Elaboración de líneas de base	13
1.5.3	Catastro de peligros	13
1.5.4	Diagnóstico de peligros	13
1.5.5	Modelación de peligros	13
1.5.6	Elaboración de mapas de peligros	13
1.5.7	Definición de áreas de riesgo y recomendaciones	14
2	INUNDACIONES TERRESTRES	14
2.1	Catastro	14
2.2	Diagnóstico	21
2.3	Modelación	22
2.3.1	Quebrada Las Zorras	25
2.3.2	Quebrada Huallalolén	27
2.3.3	Estero Las Hualtatas	32
2.4	Susceptibilidad	38
3	REMOCIONES EN MASA	42
3.1	Catastro	42
3.2	Flujos de barro y/o detritos	48
3.2.1	Diagnóstico	48
3.2.2	Modelación	49
3.2.3	Susceptibilidad	59
3.3	Procesos de Ladera	62
3.3.1	Diagnóstico	62
3.3.2	Susceptibilidad	63
4	SISMICIDAD	66
4.1	Catastro	66
4.2	Diagnóstico	66
5	VOLCANISMO	67
5.1	Catastro	67
5.2	Diagnóstico	70
6	RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES	71
6.1	Zonificación de la susceptibilidad	71
6.2	Definición de las áreas de riesgo	72
6.3	Conclusiones y Recomendaciones Específicas	75
6.3.1	Inundaciones	76
6.3.2	Flujos de barro y/o detritos	77
6.3.3	Procesos de ladera	77
6.3.4	Sismicidad	77
6.3.5	Volcanismo	78
7	BIBLIOGRAFÍA	78
8	APÉNDICES	84
8.1	Definiciones de peligro y riesgo usadas en este estudio	84
8.2	Descripción de los peligros geológicos analizados	87

8.2.1	Procesos internos o endógenos de la Tierra	87
8.2.2	Procesos externos o exógenos de la Tierra.....	97
8.3	Línea de base de geología y geomorfología.....	104
8.3.1	Metodología	104
8.3.2	Marco geodinámico.....	105
8.3.3	Marco geomorfológico.....	106
8.3.4	Marco geológico.....	112
8.3.5	Línea Base de Hidrología.....	117
8.3.6	Línea Base de Sismicidad.....	164
8.4	Modelación numérica.....	172
8.4.1	Modelos de inundación	172
8.4.2	Modelos de flujos de barro y/o detritos	194

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Ubicación del área de estudio	11
Figura 1-2 Metodología general del estudio.....	12
Figura 2-1 Catastro de Inundaciones en el “Área Urbana Sector Valle de Lo Barnechea”.....	20
Figura 2-2 Sectores en que se construyeron modelos hidráulicos	24
Figura 2.3 Resultados modelo hidráulico de la Quebrada Las Zorras.....	26
Figura 2.4 Detalles de zonas de inundación: Sector Industrial/Paradero de Micros (izquierda) y alcantarilla confluencia cauces (derecha)	27
Figura 2.5 Perfil modelación Alcantarilla.....	27
Figura 2.6 Resultados modelo hidráulico de la Quebrada Huallalolén	31
Figura 2.7 Detalle zonas de inundación, descarga quebrada al estero Arrayán (izquierda) y zona de cruce de camino (derecha)	32
Figura 2-8 Resultados Modelo Hualtatas Norte, Sector Curva “S”	33
Figura 2-9 Altura de inundación según los modelos hidráulicos en el Estero Las Hualtatas	34
Figura 2-10 Velocidad de escurrimiento según los modelos hidráulicos en el Estero Las Hualtatas	35
Figura 2-11 Alturas de inundación en el sector de la Fundación CAZ.....	36
Figura 2-12 Alturas de inundación en el sector urbanizado – Modelo Hualtatas Sur	37
Figura 2-13 Alturas de inundación en el sector Parque Mampato	38
Figura 2-14 Mapa de susceptibilidad de inundación por desborde de cauces a escala representativa de 1:40.000	41
Figura 3-1 Catastro de remociones en masa levantado para el área de estudio.....	47
Figura 3-2 Quebradas Huallalolén y del Ñilhue	50
Figura 3-3 Ejemplo de resultado de máxima velocidad para el caso T = 100 años, Cv 40% de la quebrada Huallalolén	52
Figura 3-4 Ejemplo de resultado de máxima altura para el caso T = 100 años, Cv 40% de la quebrada Huallalolén	53
Figura 3-5 Ejemplo mapa de intensidad para la quebrada del Ñilhue en el caso T = 25 años y concentración volumétrica de sedimentos de 40%	55
Figura 3-6 Ejemplo de mapa de intensidad final para la quebrada del Ñilhue en el caso T = 25 años	56
Figura 3-7 Mapa de intensidad final para la quebrada Huallalolén.....	57
Figura 3-8 Mapa de intensidad final para la quebrada del Ñilhue.....	58
Figura 3-9 Mapa de susceptibilidad de flujos de barro y/o detritos a escala representativa de 1:40.000	61
Figura 3-10 Mapa de susceptibilidad de procesos de ladera a escala representativa de 1:40.000.....	65
Figura 5-1 Centros y depósitos volcánicos en contexto regional con el área de estudio.....	68
Figura 6-1 Esquema del daño provocado por eventos de inundación por desborde de cauces con diferente magnitud en zonas que presentan distinto grado de susceptibilidad.....	72

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1-1 Homologación de “áreas de riesgo” según el artículo 2.1.17 del OGUC.	9
Cuadro 1-2 Categorías en el análisis del nivel de amenaza y susceptibilidad comparable	14
Cuadro 2-1 Catastro de inundaciones en el área de estudio	16
Cuadro 2-2 Resultados Modelo HEC-RAS Quebrada Las Zorras	25
Cuadro 2-3 Resultados Modelo HEC-RAS Quebrada Huallalolén	28
Cuadro 3-1 Catastro de remociones en masa de procesos de ladera y eventos de flujos de barro y/o detritos	43
Cuadro 3-2 Resumen datos de entrada software RAMMS de las quebradas de Huallalolén y del Ñilhue	51
Cuadro 3-3 Categorías para intensidad de flujos de detritos	54
Cuadro 5-1 Volcanes activos de la Región Metropolitana	67
Cuadro 5-2 Historia Eruptiva Volcán Tupungatito	69
Cuadro 5-3 Historia Eruptiva Complejo Volcánico San José	69
Cuadro 5-4 Historia Eruptiva Volcán Maipo	69
Cuadro 6-1 Resumen de factores que condicionan y desencadenan cada peligro geológico y criterios de zonificación de la susceptibilidad	71
Cuadro 6-2 Criterios de definición de las áreas de riesgo en el área de estudio (escala 1:1.000) según el artículo 2.1.17 de la OGUC para cada peligro estudiado	74

1 INTRODUCCIÓN

Este documento corresponde al Estudio de Riesgos Naturales, que forma parte del Estudio de Riesgos y Protección Ambiental incluido dentro de los estudios especiales que dan fundamento a las proposiciones de la actualización de un Plan Regulador Comunal. Este estudio tiene por objetivo definir peligros reales o potenciales para el emplazamiento de asentamientos humanos (Artículo 1.1.2. de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, en adelante OGUC).

Los resultados de este trabajo corresponden a la identificación y zonificación de las áreas urbanas susceptibles a ser afectadas por un peligro natural, de acuerdo con las definiciones expuestas en el apéndice 8.1 “Definiciones de peligro y riesgo usadas en este estudio”. La identificación y zonificación de las áreas susceptibles se presentan en mapas de riesgos y cuadros de resumen de acuerdo con la nomenclatura propuesta por OGUC¹, y sirven de base para definir las zonas de riesgo para la formulación de los respectivos instrumentos de planificación territorial (IPT).

1.1 MARCO JURÍDICO

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

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

Por “áreas de riesgo”, se entenderán aquellos territorios en los cuales, *previo estudio fundado, se limite determinado tipo de construcciones por razones de seguridad contra desastres naturales u otros semejantes, que requieran para su utilización la incorporación de obras de ingeniería o de otra índole, suficientes para subsanar o mitigar tales efectos.*

En el marco de este informe, las “áreas de riesgo” son definidas como las zonas susceptibles a 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 8.1 “Definiciones de peligro y riesgo usadas en este estudio”).

En el Cuadro 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 con 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.

El Apartado 2 del artículo 2.1.17 de la OGUC 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 1-1 Homologación de “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		Descripción conceptual	Análisis
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 cauce	Apéndice a)	Capítulo 0
		Anegamiento		
2. Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas	Remociones en masa	Flujos de barro y/o detritos.	Apéndice b)	Capítulo 3
		Procesos de ladera		
3. Zonas con peligro de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas	Sismicidad		Apéndice a)	Capítulo 4
	Volcanismo		Apéndice b)	Capítulo 5

Fuente: Elaboración propia en base a art. 2.1.17 de la OGUC (2021)

1.2 ALCANCE Y LIMITACIONES

En este estudio se precisa la definición de las áreas de riesgos definidas en el Plan Regulador Metropolitano de Santiago (en adelante PRMS), especialmente en lo referido a inundación, según la metodología que se describe en la sección 1.3. De forma simplificada, esta metodología consiste en caracterizar el territorio y el clima de la comuna y construir un catastro de los peligros que han afectado a la comuna, para elaborar un diagnóstico de los peligros presentes a escala comunal. Con esta información se construye un diagnóstico de cada uno de los peligros reconocidos y se zonifican aquellos que sea posible.

Las principales limitaciones que tiene la metodología aplicada son:

1. No se pudo acceder a algunos sectores, principalmente por corresponder a terrenos privados y, en consecuencia, no fue posible reconocer en terreno la totalidad del territorio comunal.
2. Debido a la cantidad de estudios existentes, principalmente en los estudios fundados de riesgo elaborados por privados para desafectar áreas de riesgo, no fue posible incorporar al documento la totalidad de información.
3. No existe un registro sistemático de los peligros que han afectado a la comuna, pese a esto, se intentó construir un catastro lo más completo que la información permitía.

4. La información disponible no permite hacer un análisis riguroso de los períodos de retorno asociados a los diferentes procesos.
5. Se debe considerar que todos los modelos son una aproximación de la realidad, que incorporan supuestos y simplificaciones, y que, en caso de ocurrir el peligro estudiado, pueden ocurrir cosas diferentes a lo predicho.
6. Este estudio se elaboró a escala 1:1.000, lo que implica que no es posible analizar peligros resultantes de los procesos estudiados para sectores aproximados de 1 m o menores.

1.3 OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es elaborar un Estudio de Riesgos de Origen Natural que forme parte del Estudio Fundado de Riesgos, relativo a los peligros de origen natural, que acompañe y entregue criterios para el desarrollo de la actualización del Plan Regulador Comunal de Lo Barnechea. De esta forma, se deben identificar y delimitar áreas de riesgos naturales (geológicos) a escala 1:10.000.

Asociado al objetivo propuesto, es necesario reconocer y delimitar las áreas de riesgos, de acuerdo con los peligros naturales identificados por el artículo 2.1.17 de la OGUC, que han de ser incorporadas y/o adecuadas en el desarrollo del Plan Regulador Comunal de Lo Barnechea. Los peligros naturales identificados por el artículo 2.1.17 de la OGUC son:

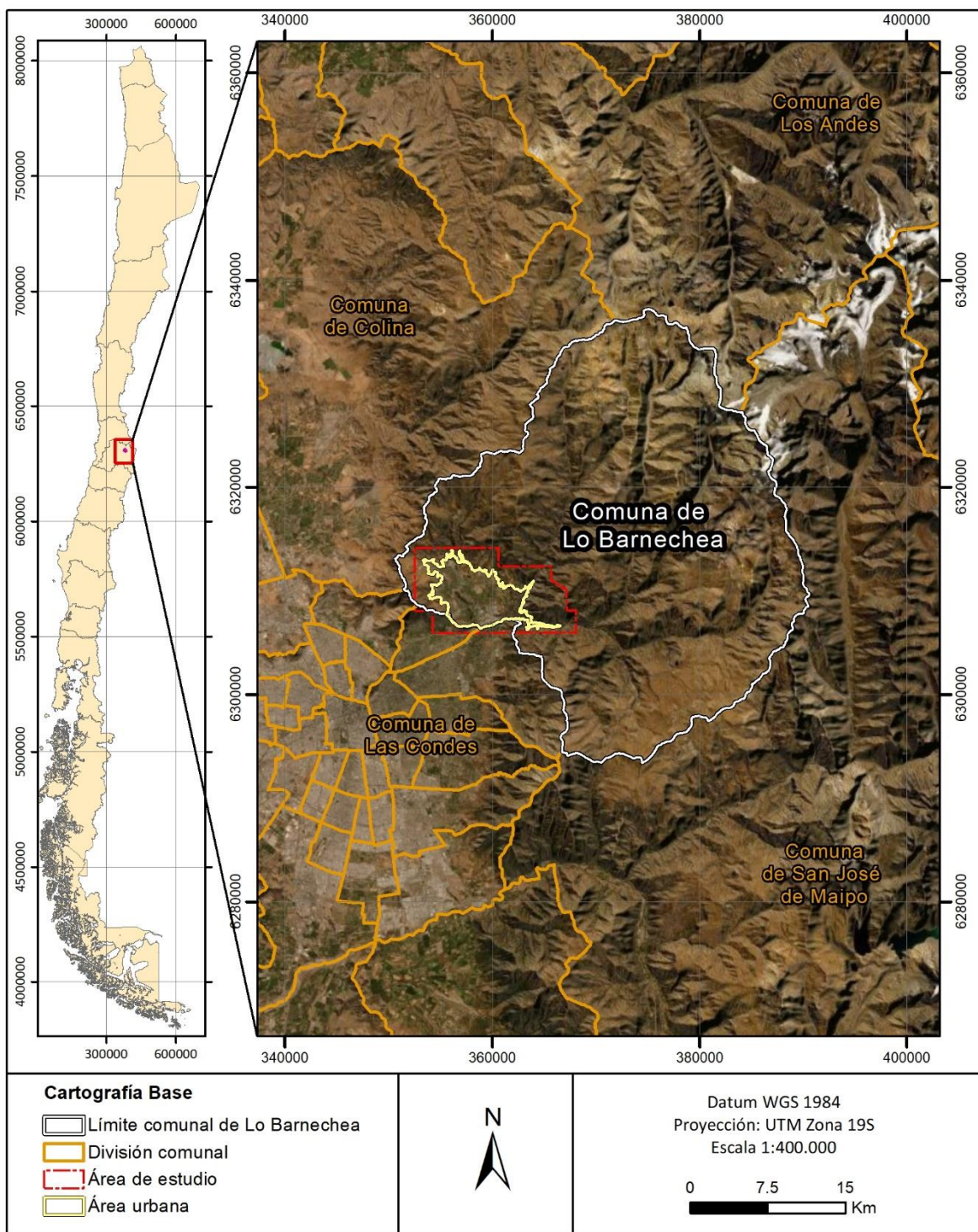
- Zonas inundables o potencialmente inundables, debido entre otras causas a maremotos o tsunamis, a la proximidad de lagos, ríos, esteros, quebradas, cursos de agua no canalizados, napas freáticas o pantanos.
- Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas.
- Zonas con peligro de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas

1.4 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde al área de restitución topográfica, que considera al “Área Urbana Sector Valle de Lo Barnechea” de la comuna de Lo Barnechea, según la definición del PRC vigente y el Plan Regulador Metropolitano de Santiago, además de otros sectores aledaños que se consideraron relevantes como parte de este estudio, ya sea por la Municipalidad de Lo Barnechea o por el Consultor.

La comuna de Lo Barnechea se encuentra en la Región Metropolitana, y limita al noroeste y oeste con la comuna de Colina, al sur con las comunas de Vitacura y Las Condes, al este con la comuna de San José de Maipo y al norte con la comuna de Los Andes, en la Región de Valparaíso (Figura 1-1).

Figura 1-1 Ubicación del área de estudio

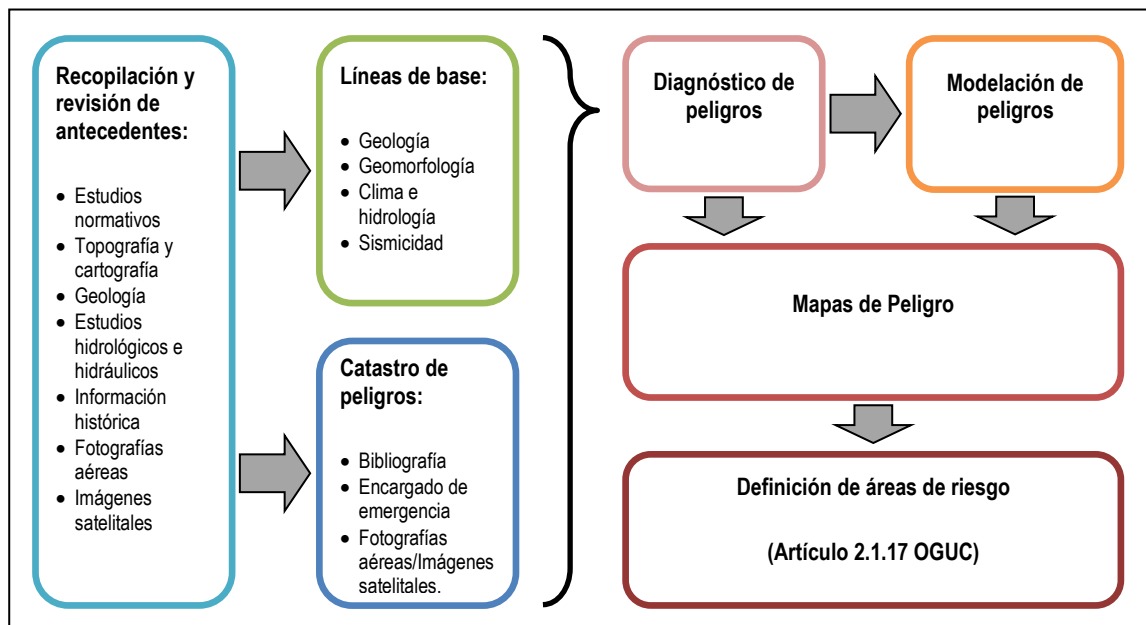


Fuente: Elaboración propia (2021)

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 de origen natural que pudieran afectar a la población y/o infraestructura 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, para definir las áreas de riesgo (Figura 1-2). A continuación, se describe de manera general la metodología de este estudio.

Figura 1-2 Metodología general del estudio



Fuente: Elaboración propia (2021)

1.5.1 Recopilación y revisión de antecedentes

Se recopilaron y revisaron los antecedentes entregados por la municipalidad, que fueron relevantes para la elaboración del estudio de riesgos de la comuna. Adicionalmente, se utilizó información disponible en instituciones públicas y privadas. La información recopilada corresponde a:

- Estudios de peligro con carácter normativo.
- Información topográfica y cartográfica, ya sea levantada para este estudio o en alguno anterior.
- Cartografía geológica de la comuna.
- Estudios hidrológicos e hidráulicos.
- Información histórica y estudios de carácter técnico relativos a peligros que han afectado a la comuna.
- Fotografías aéreas e imágenes satelitales.

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

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, para 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 las 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.
- Sismicidad: Identifica las distintas fuentes sísmicas que pueden afectar al territorio comunal.

1.5.3 Catastro de peligros

Se elaboraron cuadros con los eventos peligrosos que han afectado al área estudiada, que contendrán, en la medida que sea posible, tipo de peligro, fecha de ocurrencia, tipo y magnitud de evento gatillante, daños y fuentes de información utilizados. La información contenida en estos cuadros se utilizará para elaborar los diagnósticos de cada uno de los peligros estudiados y, en los casos que corresponda, para calibrar modelos que se utilicen. Las fuentes de información a utilizar serán:

- Fuentes bibliográficas.
- Reunión con el equipo encargado de emergencia comunal.
- Revisión de fotografías aéreas e imágenes satelitales.
- Visita a terreno.

1.5.4 Diagnóstico de peligros

La información recopilada y generada se sistematizó, para definir las áreas donde existen condiciones para que ese peligro las afecte. El resultado es un análisis de los factores condicionantes, que permiten identificar los sectores que presentan condiciones más favorables para la ocurrencia del peligro y desencadenantes, para así estimar la recurrencia de los eventos del peligro en cuestión, de cada uno de los peligros reconocidos a partir de la información disponible y las características físicas de los peligros estudiados. Además, a partir de este diagnóstico, se diferenciaron los peligros que se pueden zonificar a escala de la comuna de aquellos que no son zonificables.

1.5.5 Modelación de peligros

El diagnóstico permitió definir las áreas en donde se necesita contar con más información para definir las zonas con condiciones favorables para ser afectadas por los peligros. La modelación de peligros delimita las áreas afectadas por eventos de diferentes magnitudes y recurrencias, entendiendo que los eventos de mayor magnitud tienen una recurrencia menor. Los peligros modelados son remociones en masa e inundaciones.

1.5.6 Elaboración de mapas de peligros

A partir de los factores condicionantes reconocidos 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 asignó 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 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 representan gráficamente los diferentes niveles de susceptibilidad.

Cuadro 1-2 Categorías en el análisis del nivel de amenaza y susceptibilidad comparable

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

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

1.5.7 Definición de áreas de riesgo y recomendaciones

Una vez que se tienen los mapas de susceptibilidad, se definen las “áreas de riesgo” de acuerdo a lo establecido en el artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones. Para ello, se asignó esta categoría en función de los mapas de peligros generados anteriormente y de los criterios utilizados para asignar cada categoría. 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 por los resultados de las modelaciones o, en su defecto, mediante los distintos niveles de susceptibilidad.

2 INUNDACIONES TERRESTRES

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

- **Inundaciones por desborde de cauces:** Este tipo de fenómeno ocurre cuando los cauces de ríos, esteros o quebradas desbordan su cauce natural.
- **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.

2.1 CATASTRO

En el Cuadro 2-1 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 1953, 1982, 1986 y 1987 que coinciden con años del Fenómeno del Niño. En estas ocasiones el río Mapocho sufrió grandes inundaciones que provocaron daños a

la infraestructura y a vidas humanas. Los eventos que pudieron ser ubicados geográficamente con mayor precisión se grafican en la Figura 2-1.

Cuadro 2-1 Catastro de inundaciones en el área de estudio

Código	Año	Fecha	Tipo de Evento	Sector	Año ENSO	Descripción	Referencia
DC01	1544	Primavera	Inundación	Río Mapocho	X	Desbordes del río Mapocho	Petit-Breuilh (2004)
DC02	1574	Julio	Inundación	Río Mapocho	X	Desbordes del río Mapocho	Petit-Breuilh (2004) y Urrutia y Lanza (1993)
DC03	1581	Junio	Inundación	Río Mapocho	X	Desbordes del río Mapocho	Petit-Breuilh (2004) y Urrutia y Lanza (1993)
DC04	1597	Invierno	Inundación	Río Mapocho		Desbordes del río Mapocho y en casi todos los ríos de la zona central de Chile	Petit-Breuilh (2004)
DC05	1607	Invierno	Inundación	Río Mapocho	X	Lluvias torrenciales provocaron desbordes en el río Mapocho.	Petit-Breuilh (2004)
DC06	1609	Marzo	Inundación	Río Mapocho		Desborde del río Mapocho	Petit-Breuilh (2004)
DC07	1618	¿?	Inundación	Río Mapocho	X	Desborde del río Mapocho	Petit-Breuilh (2004)
DC08	1620	Junio	Inundación	Río Mapocho		Desborde del río Mapocho. Importantes pérdidas en infraestructura	Petit-Breuilh (2004)
DC09	1650	Junio-Julio	Inundación	Río Mapocho	X	Desborde del río Mapocho. Daños en infraestructura y construcciones	Petit-Breuilh (2004)
DC10	1660	Agosto	Inundación	Río Mapocho		Desbordes del río Mapocho	Urrutia y Lanza (1993)
DC11	1687		Inundación	Río Mapocho	X	Desbordes del río Mapocho	Urrutia y Lanza (1993)
DC12	1688		Inundación	Río Mapocho	X	Desbordes del río Mapocho	Urrutia y Lanza (1993)
DC13	1694	Primavera	Inundación	Río Mapocho	X	Desbordes del río Mapocho	Urrutia y Lanza (1993)
DC14	1722	Invierno	Inundación	Río Mapocho		Desbordes del río Mapocho	Urrutia y Lanza (1993)
DC15	1744	¿?	Inundación y RM	Río Mapocho	X	Inundaciones en el río Mapocho y aluviones por lluvias torrenciales	Petit-Breuilh (2004)
DC16	1748	30 abril	Inundación	Río Mapocho	X	Inundaciones en el río Mapocho por lluvias torrenciales. Destrucción de puentes	Petit-Breuilh (2004) y Urrutia y Lanza (1993)
DC17	1764	7 nov.	Inundación y RM	Río Mapocho		Inundaciones y aluvión por el río Mapocho	Petit-Breuilh (2004)
DC18	1779	Otoño	Inundación y RM	Río Mapocho		Aluviones en el río Mapocho.	Petit-Breuilh (2004)
DC19	1783	16 junio	Inundación y RM	Río Mapocho	X	Rotura en el cauce del río Mapocho. Inundación y derrumbes. Daños en viviendas cercanas al río	Petit-Breuilh (2004)
DC20	1827	Invierno	Inundación	Río Mapocho	X	El río Mapocho se desbordó afectando principalmente a los que vivían en sus riberas y dejando personas fallecidas	Petit-Breuilh (2004)

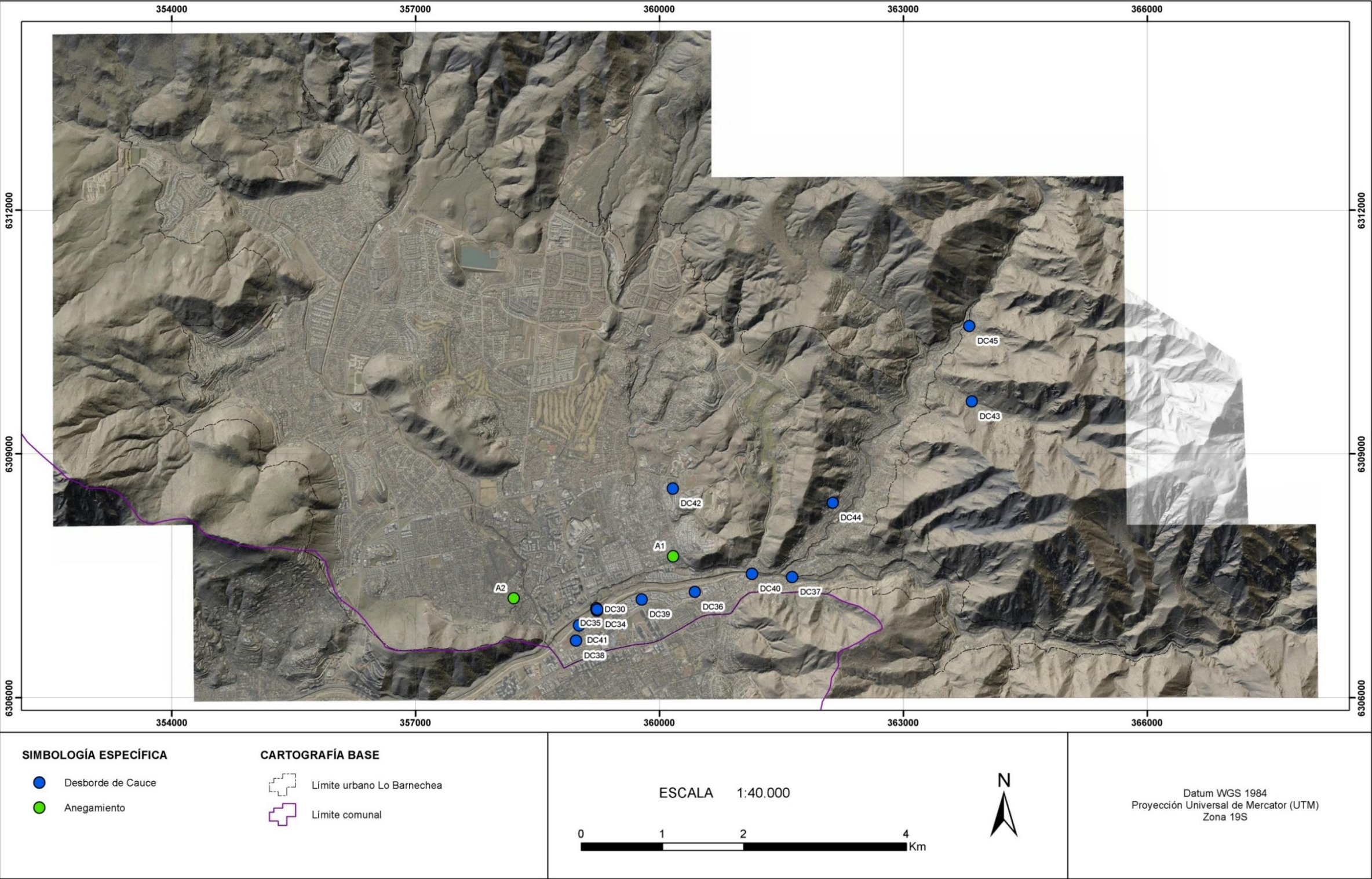
Código	Año	Fecha	Tipo de Evento	Sector	Año ENSO	Descripción	Referencia
DC21	1850	24 junio	Inundación	Río Mapocho	X	Dstrucción de un puente por inundaciones en el río Mapocho deja alrededor de 9 personas fallecidas.	Petit-Breuilh (2004) y Urrutia y Lanza (1993)
DC22	1856	Marzo	Inundación	Río Mapocho		Desbordes del río Mapocho	Urrutia y Lanza (1993)
DC23	1877	17 julio	Inundación	Río Mapocho	X	Desborde del río Mapocho	Urrutia y Lanza (1993)
DC24	1888	Agosto	Inundación	Río Mapocho	X	Desborde del río Mapocho	Urrutia y Lanza (1993)
DC25	1912	Junio	Inundación	Río Mapocho	X	Desborde del río Mapocho	Urrutia y Lanza (1993)
DC26	1934	Mayo-Junio	Inundación	Río Mapocho		Desborde del río Mapocho	Urrutia y Lanza (1993)
DC27	1941	Agosto	Inundación y RM	Camino a Farellones	X	Temporal dejó a esquiadores aislados en Farellones. Desbordes del río Mapocho. En el asentamiento minero Pérez Caldera un rodado mató a 8 personas	Urrutia y Lanza (1993)
DC28	1949	Mayo	Inundación	Río Mapocho		Desborde del río Mapocho	Urrutia y Lanza (1993)
DC29	1953	20 de agosto	Inundación	Río Mapocho	X	Desde el día 19 de Agosto un fuerte temporal afectó la zona central y en menor intensidad al sur de Chile. En Santiago hubo centenares de personas que fueron evacuadas desde poblaciones ribereñas debido a desbordes del río Mapocho, del canal San Carlos, y del Zanjón de la Aguada. Las lluvias comenzaron la madrugada del 19 de Agosto y continuaron los siguientes dos días lo que provocó varios cortes de luz en comunas de la ciudad. En Lo Barnechea el primer día 200 personas fueron llevadas al Estadio Nacional y los días posteriores 14 familias también fueron evacuadas.	Urrutia y Lanza (1993). Diario El Ilustrado (1953)
DC30	1958	Junio	Inundación y RM	Río Mapocho en puente que unía Lo Barnechea con Las Condes	X	Dstrucción del puente que unía Lo Barnechea con Las Condes dejó personas aisladas. Casas sólidas del sector alto se inundaron con las aguas del Mapocho, que rebasó las ventanas y dejó completamente inutilizados los automóviles dentro de las propiedades al ser tapados por agua y barro	Urrutia y Lanza (1993)
DC31	1969	Junio	Inundación	Río Mapocho	X	Desbordes del río Mapocho	Urrutia y Lanza (1993)
DC32	1970	Julio	Inundación	Río Mapocho	X	Desbordes del río Mapocho	Urrutia y Lanza (1993)
DC33	1980	22 de feb.	Inundación	Sector del Arrayán		Vecinos del sector informaron que el río Mapocho experimentó una súbita crecida, que en El Arrayán alcanzó a un metro y medio, arrastrando piedras, árboles y tierra lo que podría dañar modestas viviendas del sector de Lo Barnechea. Hubo cuatro desaparecidos, quedaron aisladas 300 personas, y 8 vehículos fueron arrastrados.	El Mercurio

Código	Año	Fecha	Tipo de Evento	Sector	Año ENSO	Descripción	Referencia
DC34	1982	27 de jun.	Inundación	Puente nuevo, antiguo acceso entre las comunas de Las Condes y Lo Barnechea	X	En la comuna de Las Condes, el Puente nuevo, que sirve de acceso a Lo Barnechea, fue dañado por el río, el cual además cubrió una población de tránsito habitada por más de 200 familias. Según relato de vecina del sector, el río se llevó 8 casas durante la crecida. Se cortaron el camino a Farellones y Ñilhue, y los puentes El Arrayan, La Pirámide, Lo Curro y La Dehesa. El evento fue de 96 horas de precipitaciones y 126,3 mm de agua caída.	El Mercurio https://www.memoriasdelsiglox.cl/601/w3-article-3403.html Catálogo Desinventar (https://www.desinventar.org/es/database)
DC35	1982	29 de jun.	Inundación	Calle Monseñor Escrivá de Balaguer. Puente La Dehesa	X	En el barrio alto, la zona más devastada por las inundaciones fue la comprendida por las calles Lo Arcaya, Monseñor Escrivá de Balaguer, Joaquín Cerda, Manquehue Norte y Espoz. En la comuna de Las Condes se registraron 370 damnificados. El Puente La Dehesa se quebró en dos partes, y tiene parte de su base destruida. Incluso uno de sus accesos está completamente inutilizado.	El Mercurio
DC36	1986	15 al 17 de Jun.	Inundación	Río Mapocho, sector Lo Barnechea.	X	Registro de viviendas destruidas en las riberas del Mapocho.	3w.memoriasdelsiglox.cl (consulta: 2/08/2013)
DC37	1986	17 de jun.	Inundación	Sectores de las poblaciones Las Lomas, San Antonio y Quinchamalí. Puente San Enrique. Calle Monseñor Escrivá de Balaguer. El Arrayán.	X	1050 familias damnificadas a raíz del desborde del río Mapocho. Se registra un muerto al intentar cruzar el puente San Enrique. Las Personas afectadas fueron albergadas en distintos colegios de la comuna de Las Condes. El puente San Enrique fue destruido en la ribera norte. Se derrumbó el terraplén del puente "Pastor Fernández", ubicado en la calle Pastor Fernández con La Puntilla. En el Arrayán, a la altura del puente Ñilhue, un camino secundario resultó cortado.	El Mercurio
DC38	1986	18 de jun.	Inundación	Calle Monseñor Escrivá de Balaguer	X	Los habitantes de las casas ubicadas en la avenida Monseñor Escrivá debieron abandonar sus viviendas debido a la inundación y contratar equipos para bombear el agua que escurrió hacia los subterráneos y primeros pisos de sus hogares.	El Mercurio
DC39	1987	14-18 de julio	Inundación	Riberas del río Mapocho, poblaciones Las Lomas y San Antonio.	X	Desborde del Mapocho que afectó poblaciones ribereñas de Lo Barnechea. Inundaciones en viviendas pertenecientes a las poblaciones Las Lomas Uno y Dos, San Antonio y Quinchamalí. Desalojo de poblaciones ribereñas al Mapocho en Lo Barnechea (problemas en Lo Curro)	El Mercurio
DC40	1989	23 de ago.	Inundación	Puente San Enrique		Debido a desborde del río Mapocho se inundó la población San Antonio afectando el puente San Enrique.	Catálogo Desinventar (https://www.desinventar.org/es/database)
	2003	Jul.	Inundación	Lo Barnechea		Doce viviendas resultaron con daños menores.	ONEMI

Código	Año	Fecha	Tipo de Evento	Sector	Año ENSO	Descripción	Referencia
A1	2005	Ago.	Inundación	Villa Cerro 18 con pasaje Gómez.	X	Calles anegadas por precipitaciones ocurridas entre el 25 y 28 de Agosto del 2005.	ONEMI
	2005	Sept.	Inundación	Lo Barnechea		Se reportaron 207 damnificados y albergados.	ONEMI
DC41	2009	Ago.	Inundación y RM	Río Mapocho, sector campamento Juan Pablo II, Lo Barnechea.	X	Desborde del río Mapocho produjo deslizamiento de tierra que afectó al campamento Juan Pablo II, en sector puente Las Huallatas.	ONEMI
DC42	2009	6 de sept.	Inundación	Quebrada Nido de Águilas, pasajes El tiuque, El chuncho y calle Los zorzales	X	Inundación en los pasajes El tiuque, El Chuncho y calle Los zorzales, producto del afloramiento de aguas pertenecientes a las napas de la quebrada Nido de Águilas.	Entrevista Sr. Gerardo Silva, Departamento de emergencias, municipalidad de Lo Barnechea
DC43	2009	6 de sept. (Síntesis del evento)	Inundación	Quebrada Del Ñilhue, Quebrada Huallalolén, Quebrada Novillo Muerto, Quebrada seca, Quebrada Nido de Águilas.		Desborde de las cuencas asociadas al cerro Pochoco. Desborde de la Quebrada Del Ñilhue, con resultado de 2 viviendas destruidas y 2 personas fallecidas; Desborde de la quebrada Huallalolén, con resultado de 4 viviendas destruidas; Desborde de la quebrada Novillo Muerto, con resultado de 5 viviendas destruidas.	Entrevista Sr. Gerardo Silva, Departamento de emergencias, municipalidad de Lo Barnechea
DC44	2010	6 de jun.	Inundación y RM	Camino El refugio del Arrayán, sector canal La poza.		Se registraron doce casas anegadas, severos daños estructurales en el colegio Anglo American International School. Un muro de sustento del canal, que cruza de oriente a poniente el cerro La Poza, cedió con la presión del agua, arrastrando gran cantidad de lodo y piedras.	3w.La tercera.cl (consulta: 1/08/2013)
DC45	2012	14 de abr.	Inundación	Camino El cajón n° 20.200, Quebrada El arrayán.		Una emergencia se produjo en la noche del viernes en una zona montañosa de Lo Barnechea alto, a causa del desborde de un río que dejó un total de 6 personas atrapadas. No se registraron daños a la propiedad ni heridos.	3w.BioBiochile.cl (consulta: 1/08/2013)

Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura 2-1 Catastro de Inundaciones en el “Área Urbana Sector Valle de Lo Barnechea”



Fuente: Elaboración propia (2021)

2.2 DIAGNÓSTICO

Los antecedentes históricos contenidos en el catastro levantado, las características geológicas y geomorfológicas del área de estudio (8.3), y la hidrología (8.3.5) son indicadores de que los cauces del área corresponden a zonas inundables o potencialmente inundables por eventos de desbordes de cauces, con distinta frecuencia y magnitud. 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 alledañas, y el tipo de depósito que rellena el cauce.

En consideración de lo anterior, los cauces mayores como el río Mapocho y el Estero El Arrayán son aquellos que han sufrido y continuarán siendo afectados por inundaciones, y desbordan sus cauces hacia las terrazas fluviales laterales. Por ello, el sector habitado de El Arrayán es una de las zonas del área de estudio más expuestas a la amenaza de inundaciones. De similar forma, el sector riberano del Mapocho representa una zona altamente expuesta a inundaciones, específicamente las terrazas sobre las que se ubican algunas poblaciones que ya han sido inundadas en los años de eventos extremos. Sin embargo, se hace notar que, con posterioridad a estas inundaciones, se han construido obras de mitigación para parte importante de estas terrazas. Otros cauces, como Las Hualtatas y Huallalolén, también presentan condiciones para que se generen desbordes que afecten a zonas de diferentes extensiones, como resultado de eventos meteorológicos extremos.

Casi la totalidad de los cauces del área urbanizada se encuentran intervenidos, con obras de contención, mejoramiento de las condiciones para el escurrimiento o recubrimiento de tramos de diferente extensión. Además, en muchos de los casos, los lugares por donde escurren los cauces han sido modificados, en algunos casos con pequeños ajustes del trazado y en otros, con modificaciones completas respecto de la condición natural, como son los casos de las quebradas Oscura y Los Guindos. En consecuencia, en caso de falla de las obras de escurrimiento, las zonas inundadas resultarán difíciles de predecir. En caso de que la falla ocurra en una zona recubierta, el más probable lugar de desborde corresponde a la zona donde esta comienza, por lo tanto, estos lugares son los más susceptibles a desbordarse. Esto es particularmente complejo en algunos cauces como la quebrada El Gabino, que intercala canales abiertos con canales cubiertos.

Las características ya descritas corresponden a los factores condicionantes de este tipo de amenaza, donde una morfología que permita el encauce de aguas ya sean ríos, esteros o quebradas, determina los sectores susceptibles a ser afectados por inundaciones por desborde de cauces. Esta aseveración es respaldada por el catastro, las observaciones de terreno y por la opinión de los encargados de seguridad de la comuna. Las terrazas fluviales adyacentes a los cauces también corresponden a zonas susceptibles debido a que se comportan como planicies de inundación, por lo que su identificación y sus características como altura y ubicación respecto al cauce principal, van a determinar su nivel de susceptibilidad.

Por otro lado, no existen datos concretos sobre inundaciones por anegamiento en el área de estudio. La morfología del área de estudio, caracterizada por altas pendientes, elevaciones, y desnivel no reúne las condiciones necesarias para que este peligro sea de relevancia en el área de estudio. Por ello, el peligro de inundaciones por anegamiento no se ha zonificado.

También se identificaron áreas que podrían ser afectadas por inundaciones asociadas a los tranques La Dehesa 1 y 2, La Poza y Embalse Larraín (también conocido como El Rodeo), así como al tranque Los Trapenses, actualmente drenado. En los tranques que se encuentran en operación, las obras cuentan con estudios que respaldan su construcción y operación y consideran los escenarios de eventos de precipitación, se definió como área de inundación la cota máxima que puede alcanzar cada uno de los tranques, definida a partir de la topografía del área.

Se ha considerado que el tranque drenado, asociado a la quebrada El Carrizo, no presentaría condiciones para inundarse, porque en la actualidad existen obras destinadas a encauzar la quebrada siguiendo un trazado similar al cauce original. Estas obras cuentan con estudios fundados que las respaldan, sin embargo, se ha considerado que no es posible descartar que, en algunas de las zonas más bajas ubicadas en el contorno del cauce, puedan ocurrir inundaciones en el caso de una crecida de magnitud extrema.

En el caso del tranque drenado, se consideró que la acumulación de sedimentos durante el período que estuvo operativo afectaría el escurrimiento en la quebrada El Carrizo.

Por último, la desembocadura de quebradas en zonas llanas también representa un área susceptible a inundaciones, lo que ocurre en varios sectores del área urbana en estudio.

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 activo, tal como lo evidencia el catastro. Lo anterior, permite determinar que todos los cauces deben tener algún grado de susceptibilidad de inundaciones, independiente del tamaño o forma de la cuenca aportante.

Por último, el Reglamento de la Ley N° 21.202 (Decreto 15 del Ministerio del Medio Ambiente, 30 de julio de 2020), elaborado por el Ministerio del Medio Ambiente, define como humedal urbano a *“todas aquellas extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina, cuya profundidad en marea baja no exceda los seis metros y que se encuentren total o parcialmente dentro del límite urbano”*. Bajo esta definición, parte importante de las quebradas y todos los tranques que se encuentran en el Área Urbana Sector Valle de Lo Barnechea pueden ser catalogados como humedales urbanos. A la fecha de la elaboración de este informe, se han declarado los siguientes humedales urbanos:

- Humedal Urbano Tranque La Poza (Resolución Exenta N° 1267 del 11/11/2021 del Ministerio del Medio Ambiente)
- Humedal Urbano Embalse Larrain (Resolución Exenta N° 533 del 07/06/2021 del Ministerio del Medio Ambiente)
- Humedal Urbano Tranque La Dehesa 1 y 2 (Resolución Exenta N° 533 del 07/06/2021 del Ministerio del Medio Ambiente)
- Humedal Urbano Tranque Los Trapenses (Resolución Exenta N° 727 del 19/07/2021 del Ministerio del Medio Ambiente).

2.3 MODELACIÓN

En función del diagnóstico, y de acuerdo con la metodología y desarrollo planteado en el Apéndice 8.4.1, se identificaron los sectores donde la información disponible no permite conocer con un grado de certeza adecuado la zona que presenta condiciones más favorables para inundarse, y para las cuales se cuenta con las características topográficas detalladas que permiten establecerlo mediante un modelo hidráulico.

Por otra parte, existen algunas quebradas ampliamente intervenidas, principalmente El Gabino y El Guindo, y en menor medida El Manzano y Las Rosas, en su última sección previo a la desembocadura, que requieren de un análisis específico mediante un levantamiento en terreno de las obras para establecer el grado de conexión entre las obras existentes, y con esto evaluar la posibilidad de desarrollar modelos hidráulicos. En el caso de las obras de entubamiento en las quebradas Las Zorras, Los Chanchos, El Culén y La Carbonera, podrían estar

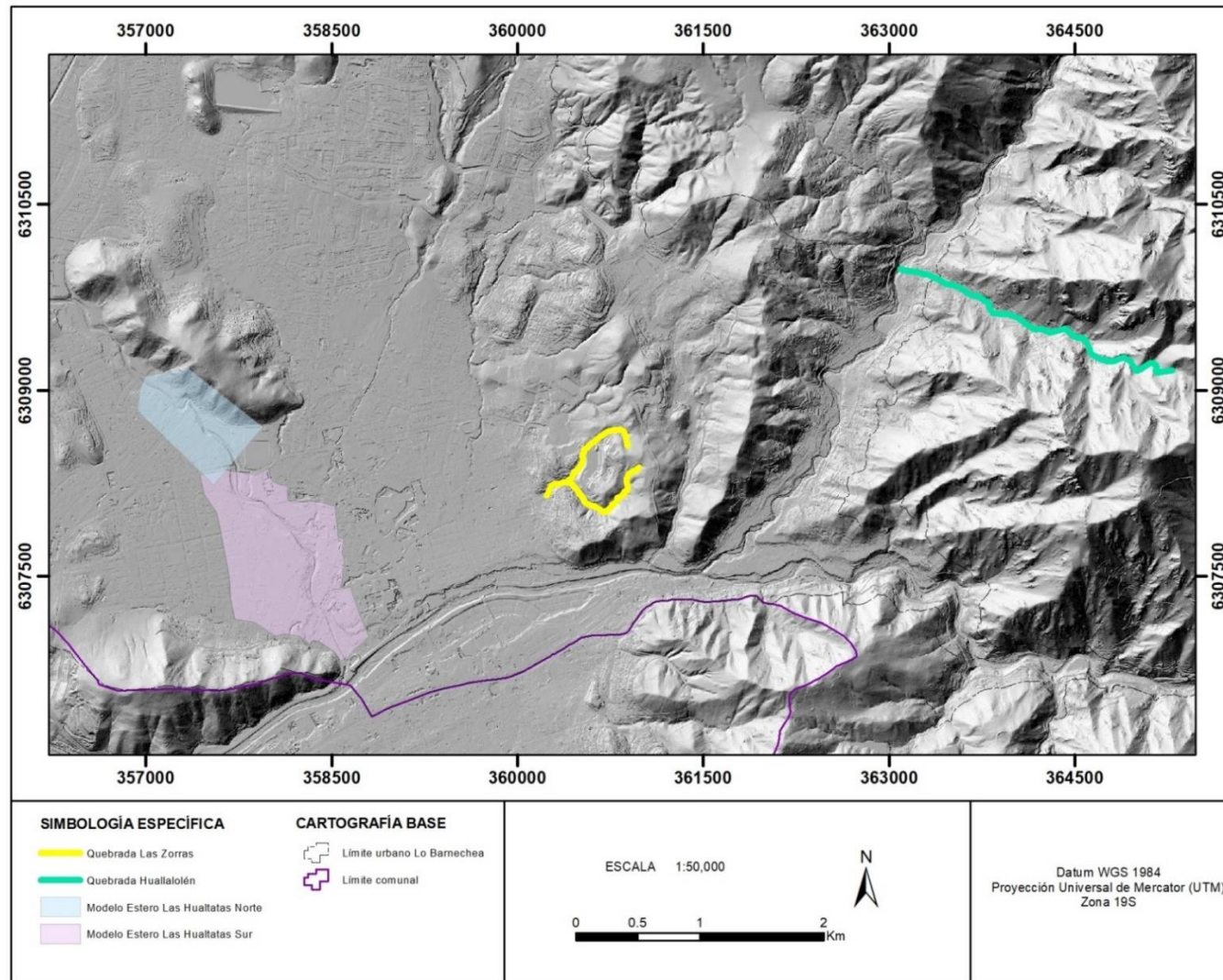
subestimadas bajo las condiciones hidrológicas presentes, por lo que se requiere un análisis actualizado del estado de las obras, a partir de lo cual se podría realizar un análisis de capacidad hidráulica.

Adicionalmente, se recogieron inquietudes específicas de la contraparte técnica del estudio a partir de las cuales, se determinaron los sectores en donde se necesita ejecutar modelos numéricos:

- Quebrada Las Zorras: Esta quebrada se encuentra normada por el PRMS, con una franja de 50 m hacia cada lado del eje del cauce, que es una metodología adecuada a escala intercomunal, pero no a escala comunal. En esta zona, la división predial es más pequeña y la población más vulnerable, y por lo mismo, no existen estudios fundados para precisar la zona que se puede inundar.
- Quebrada Huallalolén: Esta quebrada es la que de manera más recurrente presenta problemas de inundaciones, debido a la morfología del cauce y a la proximidad de las viviendas. Además, esta quebrada presenta una gran cantidad de viviendas ubicadas sobre la cota 1.000 m.s.n.m.
- Estero Las Hualtatas Alto: El estero Las Hualtatas, en el tramo ubicado entre las calles La Manada (ribera derecha) y Camino de la Fragua (ribera izquierda) presenta una curva que puede tener condiciones muy favorables para que el agua se salga del cauce.
- Estero Las Hualtatas Bajo: Personal de la municipalidad de Lo Barnechea ha señalado que desconocen la forma en que escurre el agua en el sitio correspondiente a la Fundación Caz. Por esto, han solicitado estudios específicos.

Para resolver los problemas anteriores, en los primeros dos sectores se ejecutaron modelos hidráulicos 1D, en régimen permanente para períodos de retorno de 2, 10 y 100 años con el software HEC-RAS, mientras que los otros dos sectores asociados al Estero Las Hualtatas, se modelaron mediante el software Iber 2D para caudales asociados a un período de retorno de 100 años (Figura 2-2). La memoria de cálculo de los modelos se presenta en el Apéndice 8.4.1.

Figura 2-2 Sectores en que se construyeron modelos hidráulicos



Fuente: Elaboración propia (2021)

2.3.1 Quebrada Las Zorras

En el Cuadro 2-2 se presentan los principales resultados obtenidos desde el modelo de la Quebrada Las Zorras, para periodos de retorno de 10 y 100 años. Estos resultados incluyen rangos de alturas máximas, velocidades promedio y anchos superficiales por perfil. El régimen de escurrimiento corresponde mayoritariamente a torrente, exceptuando las zonas influenciadas por la existencia de alcantarillas, con alturas máximas que se encuentran en torno a los 3 m, valores que se observan al interior de las quebradas, velocidades máximas cercanas a 3 m/s y ancho superficial en torno a los 20 metros. Cabe destacar que el modelo entrega como resultado la velocidad media por perfil (acotada al sector de escurrimiento), y por ende este valor no representa necesariamente el valor máximo de velocidad en algún punto específico del perfil. En el Apéndice 8.4.1 se incluyen los resultados de estas variables por perfil, así como los perfiles longitudinales y transversales que entrega el modelo.

Cuadro 2-2 Resultados Modelo HEC-RAS Quebrada Las Zorras

Modelo	Altura Máxima (m)	Velocidad Media (m/s)	Ancho superficial (m)
T = 10 años	0,2 – 2,7	0,2 – 2,3	2,7 – 17,7
T= 100 Años	0,3 – 2,7	0,3 – 2,7	3,1 – 19,4

Fuente: Elaboración propia (2021)

En la Figura 2.3 se presentan los resultados del modelo para el periodo de retorno de 100 años, y la interpretación realizada, tomando en cuenta que la distancia entre los perfiles del modelo no permite una correcta representación de todas las singularidades del cauce, y por ende se requiere una interpretación que incorpore mayor detalle. Se destaca un mayor ancho de inundación en el cauce norte, producto de un menor grado de definición de la quebrada. Adicionalmente, la capacidad de la alcantarilla ubicada aguas abajo de la confluencia de los cauces norte y sur, se ve superada para un periodo de retorno de 100 años, provocando flujo por sobre la calle y un posible anegamiento en la zona de la confluencia de ambos cauces.

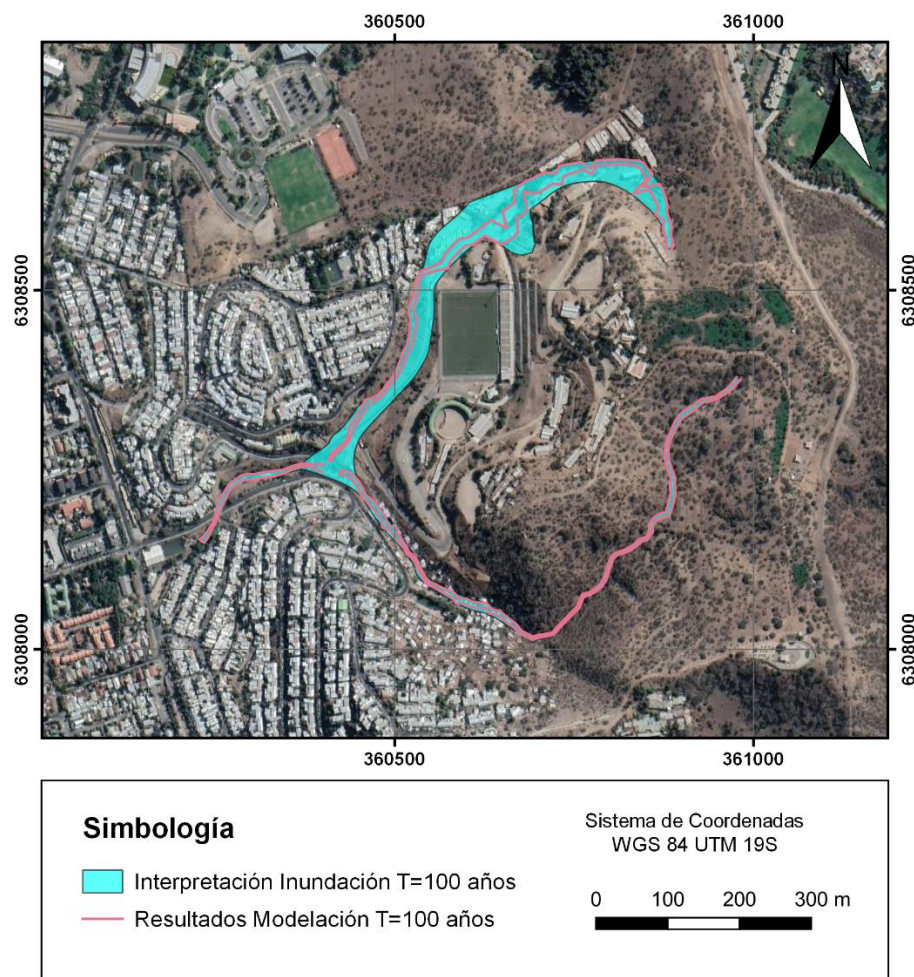
A partir de los resultados interpretados, se estima que en el cauce norte los anchos de inundación varíen entre los 20 y los 60 metros, mientras que en el cauce sur no superan los 15 metros, para el periodo de retorno de 100 años.

Si bien este modelo no muestra problemas de inundaciones en casas, si se observa una mayor susceptibilidad en el sector norte (Sector Comercial/Industrial o Terminal de Micros), de acuerdo con el detalle de la Figura 2.4 (izquierda) y una capacidad insuficiente en la alcantarilla ubicada aguas abajo de la confluencia de ambos brazos, de acuerdo con el detalle de la Figura 2.4 (derecha). En la

Figura 2.5 se presenta un perfil del modelo que representa la sección de la alcantarilla, en dónde se evidencia la falta de capacidad. Se destaca además que el modelo no representa correctamente la inundación en la zona del inicio del entubamiento (final del modelo).

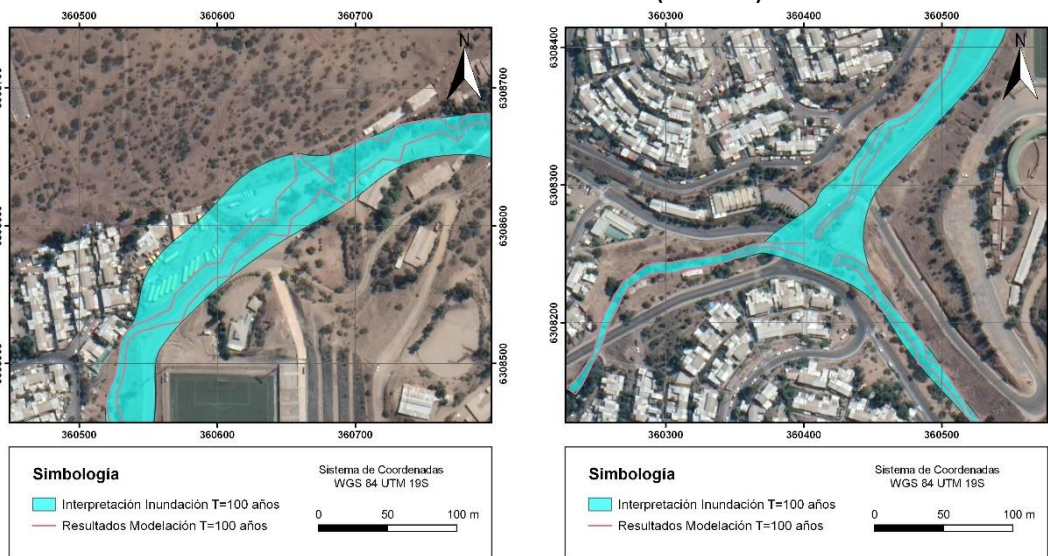
Para definir un área susceptible a inundación asociada a la zona de desborde de la Quebrada Las Zorras, se consideró que la inundación generada por la quebrada no arroja un caudal significativo. Debido a la diferencia de rugosidad que existe entre las zonas con construcciones (casas, edificios, etc.) y las calles, el agua escurriría lentamente en las primeras y más rápido en las segundas. De esta forma, se asumió que el agua genera inundación en las construcciones ubicadas aguas abajo del cauce, pero una vez que el agua alcanza una calle, se encauza y escurre rápidamente, por lo que no genera inundación.

Figura 2.3 Resultados modelo hidráulico de la Quebrada Las Zorras



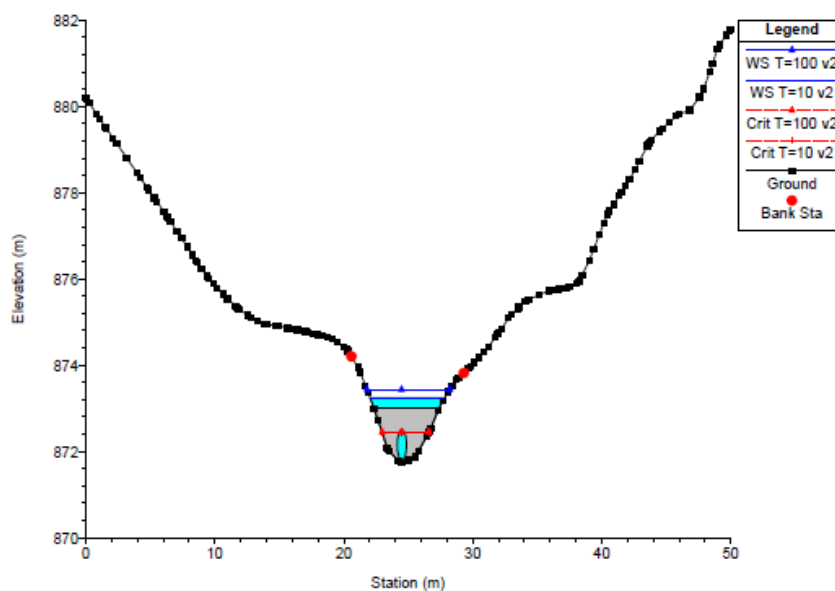
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura 2.4 Detalles de zonas de inundación: Sector Industrial/Paradero de Micros (izquierda) y alcantarilla confluencia cauces (derecha)



Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura 2.5 Perfil modelación Alcantarilla



Fuente: Elaboración propia (2021)

2.3.2 Quebrada Huallalolén

En el Cuadro 2-3 se presentan los principales resultados obtenidos desde el modelo de la Quebrada Huallalolén para periodos de retorno de 10 y 100 años, destacando que el comportamiento del flujo es del tipo torrente para toda la extensión. Estos resultados incluyen rangos de alturas máximas, velocidades promedio y anchos superficiales por perfil. De esta forma es posible ver que las alturas máximas se encuentran en torno a los 2 metros, velocidades máximas cercanas a 8-9 m/s y ancho superficial en torno a los 25 metros. Cabe destacar que el modelo entrega como resultado la velocidad media por perfil (acotada al sector de escurrimiento), y por ende este valor no representa necesariamente el valor máximo de velocidad en algún punto específico del perfil.

En el Apéndice 8.4.1 se incluyen los resultados de estas variables por perfil, así como los perfiles longitudinales y transversales que entrega el modelo.

Cuadro 2-3 Resultados Modelo HEC-RAS Quebrada Huallalolén

Modelo	Altura Máxima (m)	Velocidad Media (m/s)	Ancho superficial (m)
T = 10 años	0,4 – 1,1	1,9 – 7,4	3,0 – 23,4
T= 100 Años	0,6 – 1,6	2,4 – 9,3	3,7 – 23,4

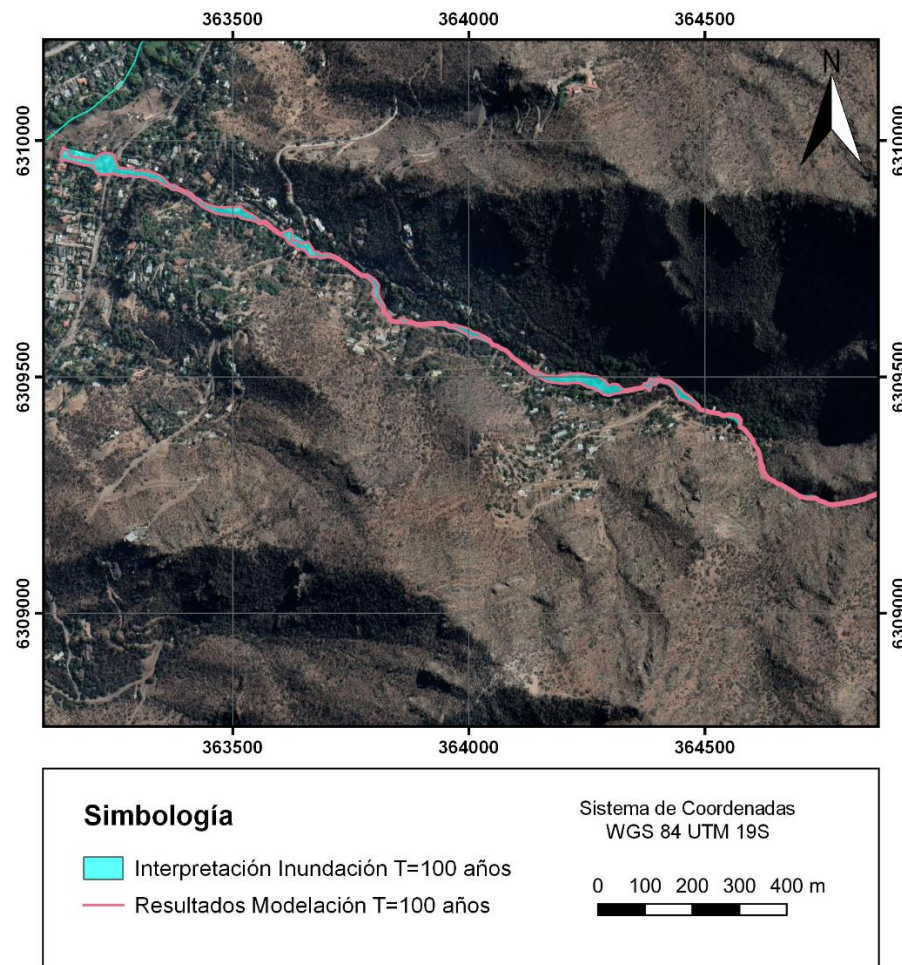
Fuente: Elaboración propia (2021)

En la Figura 2.6 se presentan los resultados del modelo para el periodo de retorno de 100 años y la interpretación realizada. Tomando en cuenta que la distancia entre los perfiles del modelo no permite una correcta representación de todas las singularidades del cauce, se requiere una interpretación que incorpore mayor detalle. A partir de los resultados interpretados se estima que los anchos de inundación varían entre 10 y 40 metros, estos últimos en las zonas de cruces de caminos, de acuerdo a lo presentado en la

Figura 2.7 (derecha) o en la confluencia con el Estero El Arrayán (

Figura 2.7, izquierda), que no quedan bien representadas, debido a la falta de antecedentes topográficos (obras de atraveso o entubamiento en la parte más baja del cauce). Bajo estas condiciones, no ha sido posible delimitar con el nivel de certeza adecuado las áreas con problemas de inundación.

Figura 2.6 Resultados modelo hidráulico de la Quebrada Huallalolén



Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura 2.7 Detalle zonas de inundación, descarga quebrada al estero Arrayán (izquierda) y zona de cruce de camino (derecha)



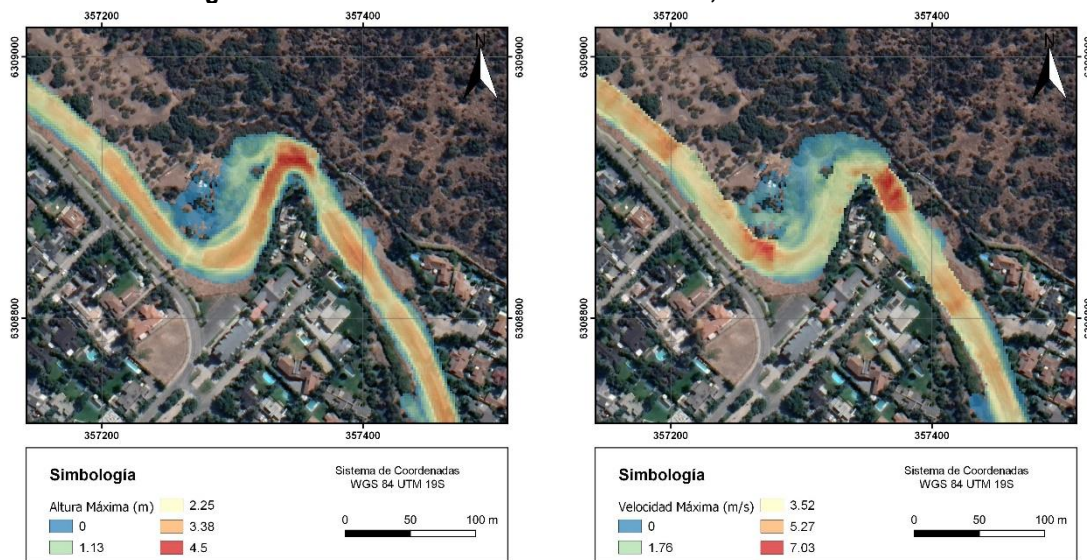
Fuente: Elaboración propia (2021)

2.3.3 Estero Las Hualtatas

El modelo hidráulico Iber entrega como resultados valores de alturas y velocidad, entre otros, para cada paso de tiempo, de acuerdo con la discretización espacial y temporal definida. A partir de dicha información, genera archivos de tipo ráster que contienen la información de velocidad y alturas máximas. Dichos resultados, permiten identificar diversas zonas susceptibles de inundarse con alturas de inundación de hasta 1 m fuera del cauce principal. Los resultados completos de ambos modelos se presentan en la Figura 2-9 (alturas máximas) y Figura 2-10 (velocidades máximas). Se presentan a continuación los principales resultados obtenidos por zonas, mientras que mayores antecedentes respecto a los puntos de desborde se influyen en el Apéndice 8.4.1. Los resultados en formato ráster se incluyen en el Apéndice 8.4.1.

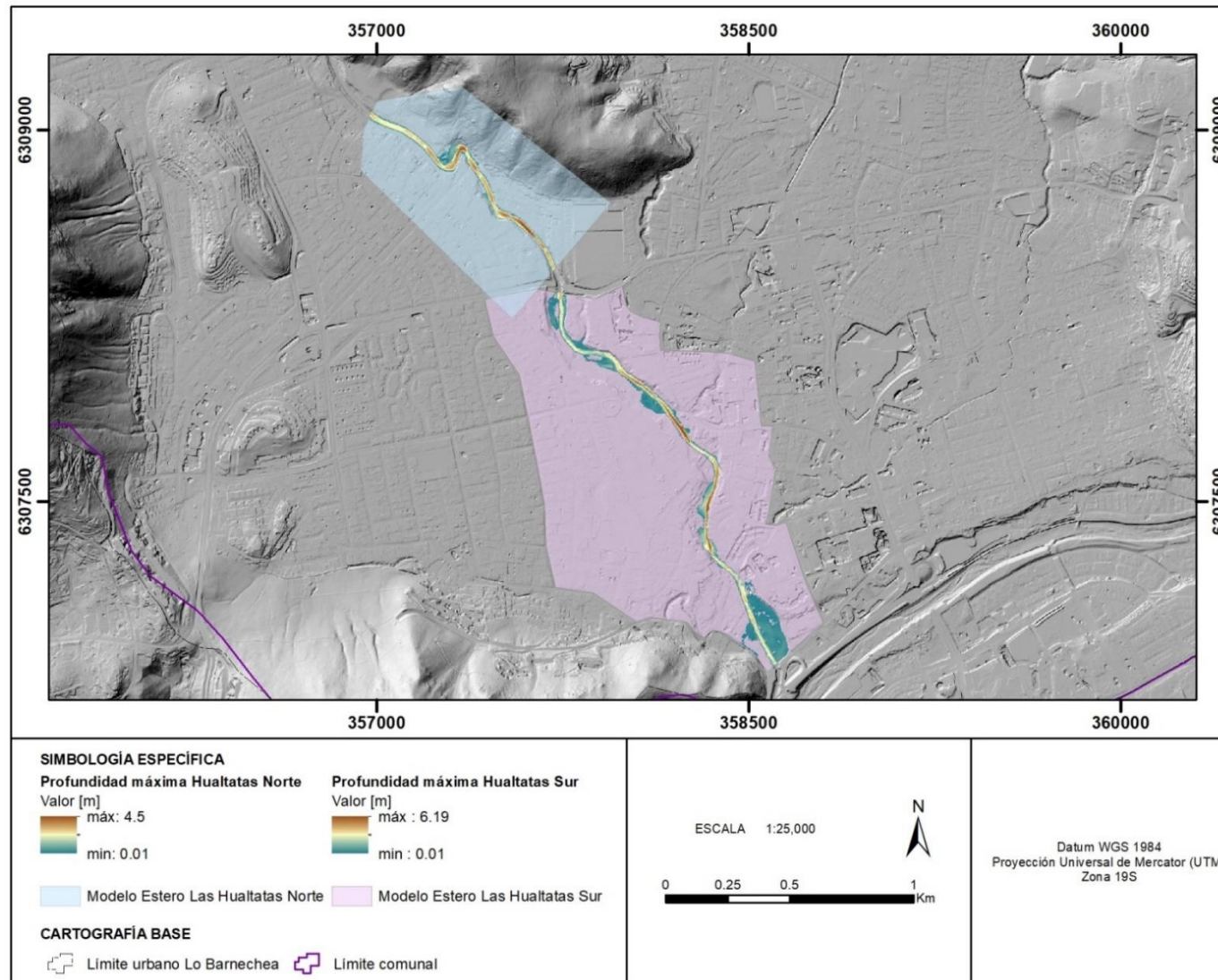
Los principales resultados del modelo Hualtatas Norte corresponden a:

- Las alturas máximas alcanzan 4,5 metros en el cauce principal, mientras que fuera de él no superan 1 metro.
- Las velocidades máximas alcanzan los 7,0 m/s en el cauce principal, mientras que fuera de él no superan los 2 m/s
- Se identifica una única zona en la cual se produce inundación fuera del cauce principal, que corresponde al sector aguas arriba de la curva en "S" (ver Figura 2-8) que presenta el estero. En dicha zona las alturas no superan 1 metro y las velocidades son bajas.

Figura 2-8 Resultados Modelo Hualtatas Norte, Sector Curva "S"


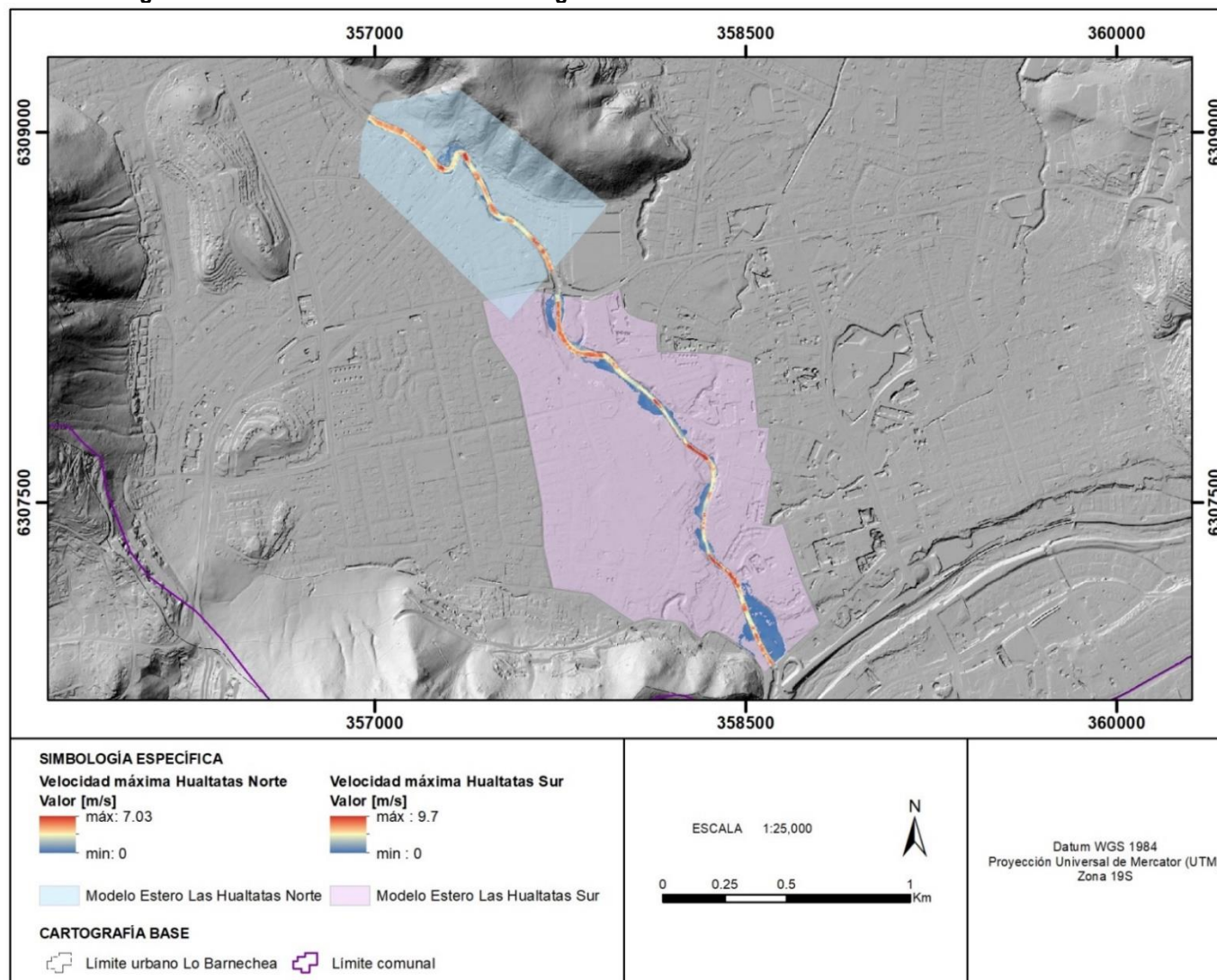
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura 2-9 Altura de inundación según los modelos hidráulicos en el Estero Las Hualtatas



Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura 2-10 Velocidad de escurrimiento según los modelos hidráulicos en el Estero Las Hualtatas

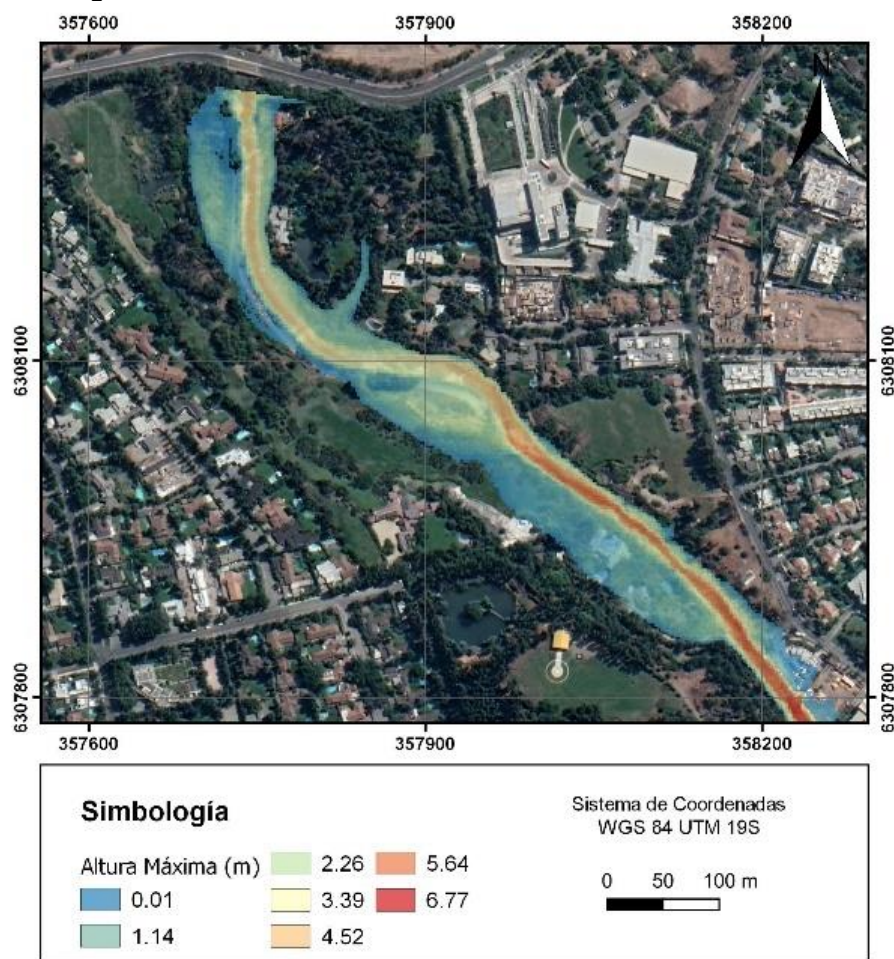


Fuente: Elaboración propia (2021)

El Modelo Hualtatas Sur se ejecutó con condiciones de rugosidad actuales, que consideran en algunos tramos vegetación abundante en el cauce o sus cercanías. Los principales resultados de este modelo bajo la condición actual se presentan a continuación:

Las alturas máximas superan los 6 metros en el sector del cauce principal, mientras que fuera del cauce superan los 2 metros en zonas no urbanizadas, y son menores a un metro en zonas más densas. Las velocidades máximas en el cauce principal superan los 5 m/s en el cauce principal, mientras que fuera de él son en general menores a 1 m/s. Se presentan zonas inundadas en el sector de la Fundación CAZ, en áreas que no presentan urbanización (Figura 2-11).

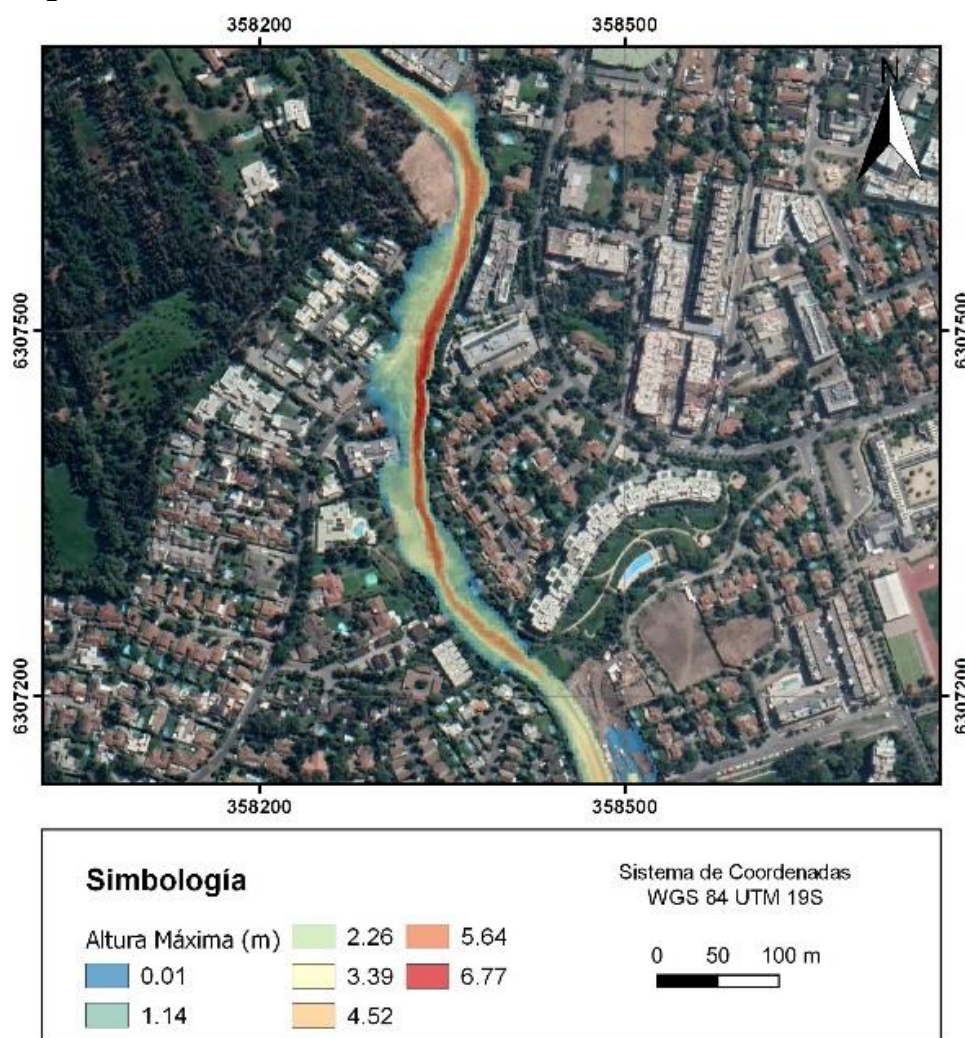
Figura 2-11 Alturas de inundación en el sector de la Fundación CAZ



Fuente: Elaboración propia (2021)

Al sur de la Fundación CAZ, en la zona de mayor densidad urbana, las inundaciones fuera del cauce se producen en general hacia áreas de parques o calles, con alturas que no superan 1m (ver Figura 2-12). La inundación alcanza el borde de las urbanizaciones en la intersección de la calle Av. El Tranque con Av. El Rodeo, y en la calle Camino de La Villa altura aproximada del N°1.107, donde los valores pueden superar 1m bajo las condiciones de cobertura actual. Se destaca que el modelo fue construido en base a un Modelo de Elevación de Terreno que no considera árboles ni construcciones, por ende, no deben considerarse los valores de alturas observados sobre las construcciones.

Figura 2-12 Alturas de inundación en el sector urbanizado – Modelo Hualtatas Sur

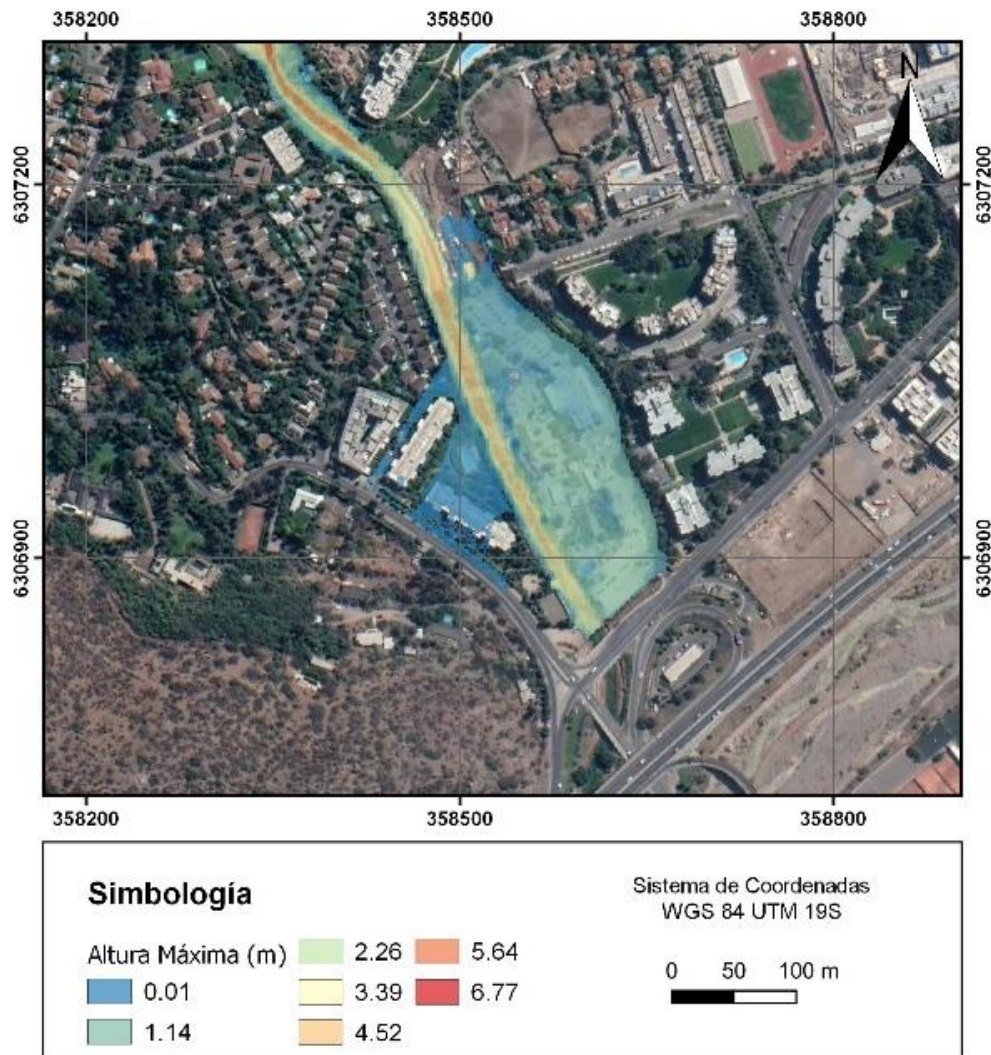


Fuente: Elaboración propia (2021)

Finalmente, en el sector previo a la desembocadura del Estero Las Hualtatas al río Mapocho (ver Figura 2 13) se observa una inundación hacia el sector del Parque Mampato, con alturas en torno a 1 m y por la calle Camino Turístico y construcciones aledañas, con alturas menores a 0,3m. Se destaca que la modelación no considera influencia de las obras de la Autopista Costanera Norte ni la posible influencia del río Mapocho.

En general, las condiciones de escurrimiento se pueden mejorar si es que se reduce la vegetación en los cauces. Esto se traduciría en menores alturas de inundación y zonas inundadas menos extensas.

Figura 2-13 Alturas de inundación en el sector Parque Mampato



Fuente: Elaboración propia (2021)

2.4 SUSCEPTIBILIDAD

La zonificación de la susceptibilidad de inundaciones por desborde de cauces considera los cauces activos e inactivos del área de estudio, además incorpora las características geomorfológicas obtenidas a partir del mapeo geológico del área, el catastro de eventos históricos y los resultados de los modelos construidos en este estudio. La metodología que se describe a continuación entrega resultados sobre áreas de referencia que se encuentran susceptibles a ser inundadas como respuesta a factores desencadenantes. Las áreas susceptibles graficadas en los mapas elaborados no consideran periodo de retorno, sin embargo, esta variable temporal es considerada dentro de la elaboración del modelo hidrológico de la sección anterior.

Se utilizaron cinco fuentes de información para definir los diferentes grados de susceptibilidad: (1) levantamiento topográfico utilizado para este estudio, (2) declaración de zonas inundables mediante ordinarios, (3) geología y geomorfología de la zona estudiada, (4) modelaciones numéricas de cauces, y (5) información de embalses artificiales.

Estos antecedentes se utilizaron para desarrollar la metodología empleada para asignar diferentes grados de susceptibilidad, siguiendo los siguientes pasos:

1. Se definió una zona inundable de susceptibilidad Alta a partir de los cauces delimitados como parte del levantamiento topográfico que se realizó en el contexto de la elaboración del plan regulador comunal. El ancho (en metros) de esta zona se definió en función de antecedentes históricos recopilados y depende del tamaño de la cuenca aportante y del orden de Strahler, según los criterios que se sintetizan en la siguiente tabla:

		Orden de Strahler			
		1	2	3	4
Superficie de la cuenca aportante (ha.)	0 – 2	0 m	7 m	15 m	20 m
	2 – 20	7 m	7 m	15 m	20 m
	20 – 80	15 m	15 m	15 m	20 m
	> 80	20 m	20 m	20 m	20 m

2. Se consideraron las declaraciones de zonas inundables mediante Ordinarios de la Dirección General de Aguas a través de documentos emitidos por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) y la Dirección General de Aguas (DGA), además de la SEREMI Ministerio de Vivienda y Urbanismo de la Región Metropolitana. Estos documentos definieron fajas en 40 cauces diferentes. A dichas fajas se les asignó una susceptibilidad Muy Alta.
3. En las zonas asociadas a los cauces activos del río Mapocho y de los esteros Las Hualtatas y El Arrayán se asignó una susceptibilidad Muy Alta. Esta área se definió a partir de las unidades geológicas y formas relacionadas con cauces de ríos.
4. Adicionalmente, en el río Mapocho se definieron zonas de susceptibilidad Alta y Moderada a partir de la morfología de las zonas aledañas a los cauces.
5. Complementariamente, se elaboraron modelos numéricos de inundación en las quebradas Las Zorras y Huallalolén y en el estero Las Hualtatas. Estos resultados se utilizaron para ajustar las zonas de inundación en zonas específicas.
6. Varios de los cauces cuentan con tramos que se encuentran entubados. En el caso de estos tramos, se asignó un grado de susceptibilidad Moderada.
7. Por último, a los tranques artificiales ubicados en el Área Urbana Sector Valle de Lo Barnechea se les asignó una susceptibilidad Muy Alta correspondiente a la zona inundada en la imagen satelital, y susceptibilidad Alta en la zona que se delimita en función de la topografía.

Finalmente, se consideraron 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, en conjunto con los antecedentes históricos recopilados en el catastro, se establecieron los siguientes criterios de susceptibilidad de inundaciones por desborde de cauces:

Susceptibilidad Muy Alta: corresponden a los cauces activos, y por tanto, geológicamente a los depósitos fluviales actuales del río Mapocho, Estero El Arrayán, y Estero Las Hualtatas, y a los depósitos fluvio-aluviales activos de la quebrada Huallalolén y quebrada Ñilhue (y los afluentes a sus cuencas). En la quebrada Huallalolén, la zona inundada se ajustó mediante el modelo numérico. También se incluyó en esta categoría aquellos cauces que han sido normados por la autoridad competente. Por último, en los tranques artificiales, corresponde a la zona inundada según las imágenes aéreas disponibles.

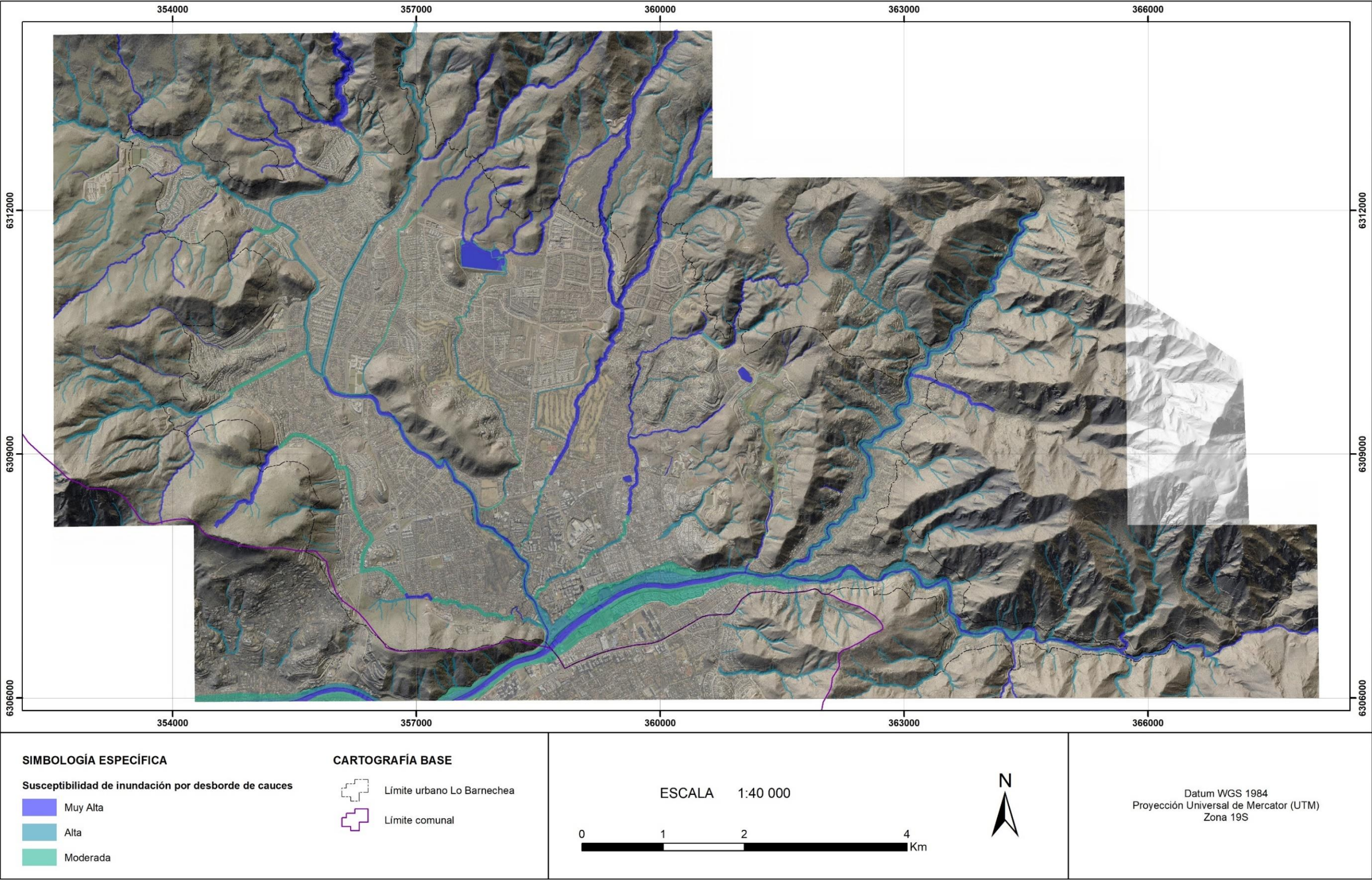
Susceptibilidad Alta: corresponden a cauces, tanto naturales como intervenidos que han sido canalizados y su cauce se encuentra abierto. El área asociada a estas se definió en función de fajas alrededor del eje de los cauces. En esta categoría, también se incluyen el primer nivel de terrazas fluviales de la ribera norte del río

Mapocho y el muro de contención de la ribera sur, el primer nivel terrazas del estero El Arrayán y parte de Las Hualtatas, cuyas áreas se definieron en función de fajas alrededor del eje de los cauces. En los tranques artificiales, esta cota está definida por la topografía en el entorno de los tranques, que define la cota máxima que podría alcanzar el agua.

Susceptibilidad Moderada: está constituido por depósitos aterrazados de origen fluvial ubicados a mayor altura que las áreas de susceptibilidad alta, la primera terraza de la ribera sur y parte más alta de la terraza de la ribera norte del río Mapocho y las terrazas más altas del estero El Arrayán y Las Hualtatas. También se incluye en esta categoría la extensión de las quebradas ubicadas en las laderas de los cerros que rodean al territorio estudiado, el resultado del modelo hidráulico de la quebrada Las Zorras para 100 años de período de retorno, el antiguo cauce de la quebrada Oscura, y los antiguos cauces en las zonas donde estos actualmente se encuentran abovedados.

La escala de trabajo para el mapeo de susceptibilidad de inundación por desborde de cauces fue de 1:1.000. En este informe se añaden figuras a una escala de representación gráfica de 1:40.000 (Figura 2-14).

Figura 2-14 Mapa de susceptibilidad de inundación por desborde de cauces a escala representativa de 1:40.000



Fuente: Elaboración propia (2021)

3 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-GCA, 2007). Para los fines de este informe, las remociones en masa se han separado en dos tipos principales: “Procesos de ladera” y “Flujos de barro y/o detritos”.

- **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, 2002).

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 eventos de procesos de ladera y flujos de barro y/o detritos que han afectado el área de estudio, las cuales se ilustran en la Figura 3-1. Cabe mencionar que en los archivos de prensa, sobre todo 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. Por otra parte, debido a esta imprecisión, se ha elaborado un único catastro para los diferentes tipos de remociones en masa.

En los eventos aluvionales catastrados el río Mapocho y las zonas cercanas a la quebrada El Arrayán sufrieron grandes inundaciones por flujos de barro y detritos que provocaron daños a la infraestructura y a vidas humanas.

Cuadro 3-1 Catastro de remociones en masa de procesos de ladera y eventos de flujos de barro y/o detritos

Código	Año	Fecha	Tipo de Evento	Sector	Año ENSO	Descripción	Referencia
	1536		RM	Rio Mapocho		Después de algunos años de sequía se produjo un copioso aluvión por el cauce del río Mapocho.	Petit-Breuilh (2004)
	1723	25 junio	RM	Rio Mapocho	X	Inundaciones en el río Mapocho y aluviones por lluvias torrenciales.	Petit-Breuilh (2004)
	1744	¿?	RM e Inundación	Rio Mapocho	X	Inundaciones y aluvión por el río Mapocho.	Petit-Breuilh (2004)
	1764	7 noviembre	RM e Inundación	Rio Mapocho		Aluviones en el río Mapocho.	Petit-Breuilh (2004)
	1779	Otoño	RM e Inundación	Rio Mapocho		Rotura en el cauce del río Mapocho. Inundación y derrumbes. Daños en viviendas cercanas al río	Petit-Breuilh (2004)
	1783	16 junio	RM e Inundación	Rio Mapocho	X	Temporal dejó a esquiadores aislados en Farellones. Desbordes del río Mapocho. En el asentamiento minero Pérez Caldera un rodado mató a 8 personas.	Urrutia y Lanza (1993)
	1941	Agosto	RM e Inundación	Camino a Farellones	X	Dstrucción del puente que unía Lo Barnechea con Las Condes dejó personas aisladas. Casas sólidas del sector alto se inundaron con las aguas del Mapocho, que rebasó las ventanas y dejó completamente inutilizados los automóviles dentro de las propiedades al ser tapados por agua y barro.	Urrutia y Lanza (1993)
F08	1958	Junio	RM e Inundación	Río Mapocho en puente que unía Lo Barnechea con Las Condes	X	Tres precarias viviendas se cayeron al río. Sus habitantes ya habían sido evacuados.	Urrutia y Lanza (1993)
	1980	20 al 23 de Feb.	RM	Quebrada El arrayán.		Debido a lluvias se generaron deslizamientos en Farellones, cayeron 42.4 cm de nieve.	Catalogo Desinventar.org
	1992	30 de agosto	RM	Farellones		Se registra un deslizamiento en el kilómetro 3 de la ruta G-21.	Sr. Gerardo Silva, Departamento de emergencias, municipalidad de Lo Barnechea
PL01	1997	SE	RM	Kilómetro 3, ruta G.21, camino a Farellones	X	Se produce un deslizamiento en el kilómetro 2 de la ruta G-21.	Sr. Gerardo Silva, Departamento de emergencias, municipalidad de Lo Barnechea
PL02	2000	SE	RM	Kilómetro 2 de la ruta G-21		Un deslizamiento de 3 toneladas de tierra y piedras afectaron el camino El Cerro en el sector del Arrayán, el material fue removido por las lluvias.	Catalogo Desinventar.org
PL03	2004	14 de noviembre	RM	Camino El Cerro, El Arrayán.		En Lo Barnechea, el caudal del Mapocho socavó la orilla sur del curso de agua, lo que no acontece comúnmente, y afectó un campamento donde vivían cerca de 15 familias.	www.emol.cl (consulta: 1/08/2013)

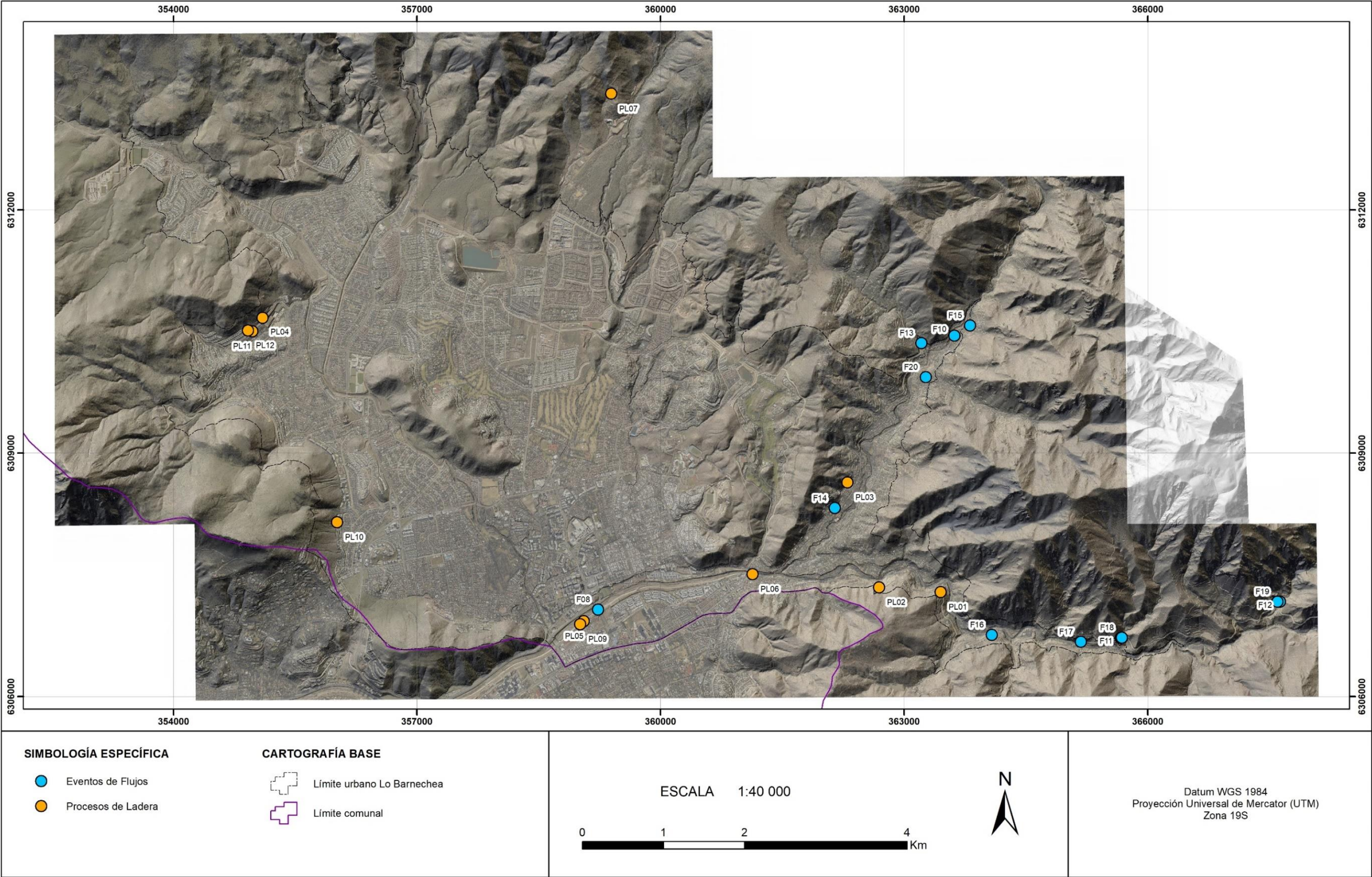
Código	Año	Fecha	Tipo de Evento	Sector	Año ENSO	Descripción	Referencia
PL04	2005	18 de ago.	RM	Ribera sur del río Mapocho, Lo Barnechea.		Se produce un deslizamiento en la calle Punta de Águila, a la altura del colegio Everest, el cual implicó la rotura del camino.	Sr. Gerardo Silva, Departamento de emergencias, municipalidad de Lo Barnechea
PL05	2005	26 y 27 de agosto	RM	Ribera izquierda del río Mapocho, entre los puentes La Dehesa y San Francisco		Se socavó la base del relleno artificial sobre el cual está emplazado el campamento Juan Pablo II. A lo largo de aproximadamente 50 m, se produjeron colapsos parciales originando el retroceso del escarpe de 8 m de alto y Casi vertical, destruyendo algunas viviendas de material ligero.	
PL06	2005	26 y 27 de agosto	RM	Aguas arriba del puente San Enrique		La sección del caudal del río Mapocho se elevó hasta un máximo de 2 m en segmentos encajonados y hasta 1,5 m en segmentos más abiertos. Aguas arriba del puente San Enrique (La Querencia), el caudal fluvial transportó troncos de eucaliptos de hasta 20 m de largo y produjo un socavamiento de la base del corte vertical en gravas de relleno del lado izquierdo (sur). Como consecuencia de ello colapsaron algunas edificaciones de madera del sector.	Naranjo & Hauser (2005)
F10	2007	10 de ago.	RM	Camino El refugio del Arrayán, sector canal La poza, calle Las Higueras.		Agua, nieve, árboles y rocas arrasaron con todo lo que encontraron a su paso, cuenta Flavia Valentino, la principal damnificada del alud que la madrugada de ayer afectó a cuatro casas en la calle Las Higueras, en Lo Barnechea. Pasadas las 4:30 horas, un kilómetro más arriba, la caída de un árbol de 6 metros de altura rompía una de las paredes del canal La Poza, originando una avalancha.	www.EMOL.cl (consulta: 1/08/2013)
PL07	2007	agos.	RM	Club Ecuestre Internacional		Deslizamiento rotacional, cárcavas y grietas relleno de camino.	Arenas (2007).
	2007	SE	RM	Cerro Blanco	—	Se produjeron deslizamientos menores.	Sr. Gerardo Silva, Departamento de emergencias, municipalidad de Lo Barnechea
	2009	23 de julio	RM	El Colorado		Un alud se generó por malas condiciones climáticas afectado la zona del El Colorado.	Catalogo Desinventar.org
F11	2009	6 de sept.	RM	Kilómetros 6 (quebrada Nihue), 9 y 11 de la ruta G-21, camino a Farellones.	X	El desplazamiento del kilómetro seis habría arrastrado a varios vehículos y afectado a unas cinco casas del sector. Al momento de la edición de la noticia se registra 1 muerto y 3 desaparecidos. El alud tendría un ancho de 80 metros y se habría desplazado por la ladera de los cerros unos 150 metros abajo.	www.Elrancahuaso.cl (consulta: 1/08/2013)

Código	Año	Fecha	Tipo de Evento	Sector	Año ENSO	Descripción	Referencia
F12	2009	6 de sept.	RM	Quebrada seca, altura del kilómetro 7	X	Un alud produjo el colapso de obras de arte.	Sr. Gerardo Silva, Departamento de emergencias, municipalidad de Lo Barnechea
F13	2009	6 de sept.	RM	Quebrada Novillo muerto, Quebrada Huallalolén.	X	En la quebrada Novillo Muerto, el alud arrasó cuatro viviendas de cuidadores de parcela, donde hubo pérdida material y drama humanitario.	http://jdvelarrayan.blogspot.com/search?updated-max=2009-12-28T19:11:00-03:00&max-results=14&start=14&by-date=false (consulta: 1/09/2019)
PL09	2009	Ago.	RM e Inundación	Río Mapocho, sector campamento Juan Pablo II, Lo Barnechea.	X	Desborde del río Mapocho produjo deslizamiento de tierra que afectó al campamento Juan Pablo II, en sector puente Las Hualtatas.	ONEMI
PL10	2010	27 Feb	RM	Calle Aguas Claras, ladera oriental cerro Manquehue		Caída de rocas gatillada por el terremoto que afectó a la zona centro sur del país. Se estima un peso aproximado de 3 toneladas para el bloque caído, el cual generó daños en un muro de contención y sobre la calzada de la calle interior del loteo Manquehue Oriente.	Fernández (2010)
F14	2010	6 de jun.	RM e Inundación	Camino El refugio del Arrayán, sector canal La poza.		Se registraron doce casas anegadas, severos daños estructurales en el colegio Anglo American International School. Un muro de sustento del canal, que cruza de oriente a poniente el cerro La Poza, cedió con la presión del agua, arrastrando gran cantidad de lodo y piedras.	www.la-tercera.cl (consulta: 1/08/2013)
PL11	2010	19 de jun.	RM	Camino Punta de Águilas, ladera oriental cerro Manquehue		Se produjo caída de rocas luego de las intensas precipitaciones del día anterior (al menos 30 mm de agua acumulada), afectando a viviendas ubicadas en la ladera que no contaban con ningún tipo de protección. Los bloques cayeron desde el sector alto, rebotaron en la calle y golpearon la parte alta de la pared que separa las viviendas de la calle Camino Punta del Águila, cayendo al jardín de las mismas y a la piscina de una de ellas.	Fernández (2010)
F16	2012	17 de jun.	RM	Kilómetro 4,5 de la ruta G-21, camino a Farellones.		Cinco viviendas dañadas y 27 personas aisladas. Un camión quedó atrapado en la ruta. ONEMI decretó alerta amarilla para las comunas de Lo Barnechea y San José de Maipo por inestabilidad potencial en laderas de cerros y quebradas.	https://www.emol.com/noticias/nacional/2012/06/17/546036/alud-en-farellones.html

Código	Año	Fecha	Tipo de Evento	Sector	Año ENSO	Descripción	Referencia
PL12	2013	Mayo	RM	Calle punta de Águila, a la altura del colegio Everest.	—	Se observaron deslizamientos de hasta 4 metros de la calzada de camino Punta de Águila, a aprox. 200 m de los afloramientos de agua ocurridos en los años 2004 y 2005.	Sr. Gerardo Silva, Departamento de emergencias, municipalidad de Lo Barnechea
F17	2016	17 de abr.	RM	Kilómetro 5-6 de la Ruta G-21 camino a Farellones		Se registró un deslizamiento de barro que cortó el camino y dejó a 60 personas aisladas. En el sector también se suspendió el servicio de agua potable, lo que afecta a más de 800 personas.	https://www.emol.com/noticias/Nacional/2016/04/17/798387/Lluvias-en-zona-centro-dejan-deslizamientos-de-tierra-cortes-de-caminos-y-provoca-aumento-de-caudales-en-rios.html https://www.t13.cl/noticia/nacional/ltimo-balance-de-la-Onemi-Lluvias-dejan-284-personas-damnificadas-y-83-viviendas-condano-mayor
F18 F19 F20	2021	30 y 31 de enero	RM	Rutas G21 y G-245 y El Arrayán		Lluvia de verano en las comunas de Lo Barnechea y San José de Maipo provocó aluviones en las quebradas Ñilhue, Seca, La Ermita, La China, Huallalolén y otras quebradas menores, además del estero Manzanito (sector Puente Corral Quemado).	https://biblioteca.sernageomin.cl/opac/datafiles/15993.pdf

Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura 3-1 Catastro de remociones en masa levantado para el área de estudio



Fuente: Elaboración propia (2021)

3.2 FLUJOS DE BARRO Y/O DETRITOS

Las remociones de tipo flujo son procesos gravitacionales controlados usualmente por condiciones meteorológicas anómalas en zonas susceptibles a la generación de procesos de ladera, como por ejemplo deslizamientos de suelo y/o roca que se pueden fluidizar canalizando el material hacia zonas urbanas a través del cauce de una quebrada.

Estos procesos son altamente peligrosos dadas las altas velocidades que pueden alcanzar y las largas distancias que pueden recorrer, generando uno de los riesgos más dañinos para la población circundante a quebradas con potencial de generación de este tipo de fenómenos.

3.2.1 Diagnóstico

Los eventos de tipo flujo se asocian a fenómenos meteorológicos intensos en zonas susceptibles a deslizamientos superficiales de suelo que puedan alcanzar cauces o donde existen depósitos de material que pueden fluidizarse como consecuencia de estas precipitaciones. También se asocian a cauces de alta pendiente, donde el material puede alcanzar gran energía y con ello desplazarse grandes volúmenes de material y/o distancias. Entre los factores geológicos/geomorfológicos que condicionan la ocurrencia de flujos de detritos y/o barro se consideran el tamaño de la cuenca aportante, la pendiente de las laderas adyacentes a cauces de quebradas y la disponibilidad de material para ser transportado, tanto como laderas con posibilidad de generación de deslizamientos superficiales o depósitos de remociones en masa no consolidados. Adicionalmente, la intensidad de los flujos de barro y/o detritos también se relaciona con la pendiente de los cauces por donde circulan, ya que esta determina la energía disponible para transportar materiales y, por lo tanto, la velocidad y facilidad con la que podría transportar el material disponible en los cauces y/o laderas.

De esta forma, para determinar las zonas que pueden ser afectadas por este peligro, se han tomado en consideración los resultados de las líneas de base de geología y geomorfología (8.3) y de hidrología (8.3.5), y el catastro de remociones en masa, obtenido a partir de antecedentes bibliográficos, reuniones con el equipo encargado de emergencia comunal y observaciones realizadas en terreno.

Las zonas favorables para la generación de este peligro se asocian a pendientes altas, al oeste, norte y este del área estudiada. En la zona de estudio existen dos tendencias generales:

- En la zona nor-occidental las quebradas tienen cuencas aportantes de pequeñas dimensiones, con pendientes bajas asociadas a la existencia de remociones en masa antiguas en el sector y en el catastro no se cuenta con eventos de flujos. Estas quebradas, en caso de generar flujos, tenderían a depositar la mayor proporción de material detrítico en la misma cuenca y, en casos más desfavorables, el flujo puede continuar por el cauce en las zonas próximas al ápice del abanico aluvial.
- En la zona nor-oriental, las quebradas asociadas al cordón montañoso ubicado entre el río Mapocho y el estero de El Arrayán, poseen cuencas aportantes de grandes dimensiones, superiores a 1 km², con pendientes promedio superiores a 20° y suficiente material para ser removido en condiciones desencadenantes favorables, asimismo, se han registrado eventos aluvionales que afectaron a la población aledaña. Se debe considerar que los abanicos aluviales a los pies de una quebrada, en la zona central, usualmente son un buen indicador de lo activa o inactiva que es un área específica en relación a este tipo de fenómenos. Este parámetro no es indicativo en las quebradas más activas de la zona de estudio, puesto que la mayor parte de las quebradas que han sido afectadas por flujos de detritos confluyen directamente a esteros y/o ríos principales, por lo que la generación de abanicos aluviales es mínima, y el material acarreado por las quebradas se fluidiza y sigue desplazándose a través de estos cursos de agua.

Un fenómeno adicional a tener en cuenta, es que un cauce pueda ser bloqueado por procesos de ladera (deslizamiento o caída de bloques). Este bloqueo natural puede represar temporalmente el cauce aguas arriba, y luego, al colapsar la represa, desencadenar en un flujo de mayores dimensiones aguas abajo.

En Chile, el principal factor desencadenante para los flujos de barro y/o detritos son eventos meteorológicos anómalos de alta intensidad, ya sea en forma de precipitaciones muy copiosas en un tiempo muy corto o precipitaciones moderadas a intensas en un tiempo muy largo, que afectan localmente a las quebradas y modifican las condiciones de saturación de las laderas, desestabilizando el material detrítico disponible en ellas, transportándolo aguas abajo.

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. Recientemente (durante las últimas décadas) se han instalados pluviógrafos que miden la intensidad instantánea u horaria de precipitaciones (mm por hora); de momento, solo se dispone de registros más sostenidos en el tiempo de precipitaciones diarias (mm en 24 horas). Esto dificulta los análisis que ponen en relación estas variables, ya que a veces basta una lluvia extremadamente intensa de corta duración, para generar un flujo de detritos de proporciones considerables, y alto poder destructivo.

Otro factor desencadenante corresponde a la altura de la línea de nieve, ya que condiciona la superficie que captará precipitaciones líquidas, aumentando la susceptibilidad de generación de procesos de laderas en la cuenca aportante. Este factor es particularmente importante en los meses de verano, cuando caen precipitaciones con altas temperaturas. En el actual escenario de cambio climático, las precipitaciones asociadas al fenómeno conocido como “invierno altiplánico” cada vez pueden llegar con mayor frecuencia hasta más al sur, y por lo tanto, cada vez debieran ser más recurrentes las precipitaciones de verano en la comuna.

Es importante mencionar que los flujos de detritos y/o barro son fenómenos complejos, que dependen en gran medida de las condiciones de las cuencas aportantes al momento que éstos ocurren, y según distintos escenarios, las quebradas se pueden comportar de diferentes maneras. Los fenómenos tipo flujo pueden variar en la concentración de sólidos que transportan, el tipo de material (barro y/o detritos) y la magnitud del evento, dependiendo de los distintos escenarios posibles en la zona de estudio.

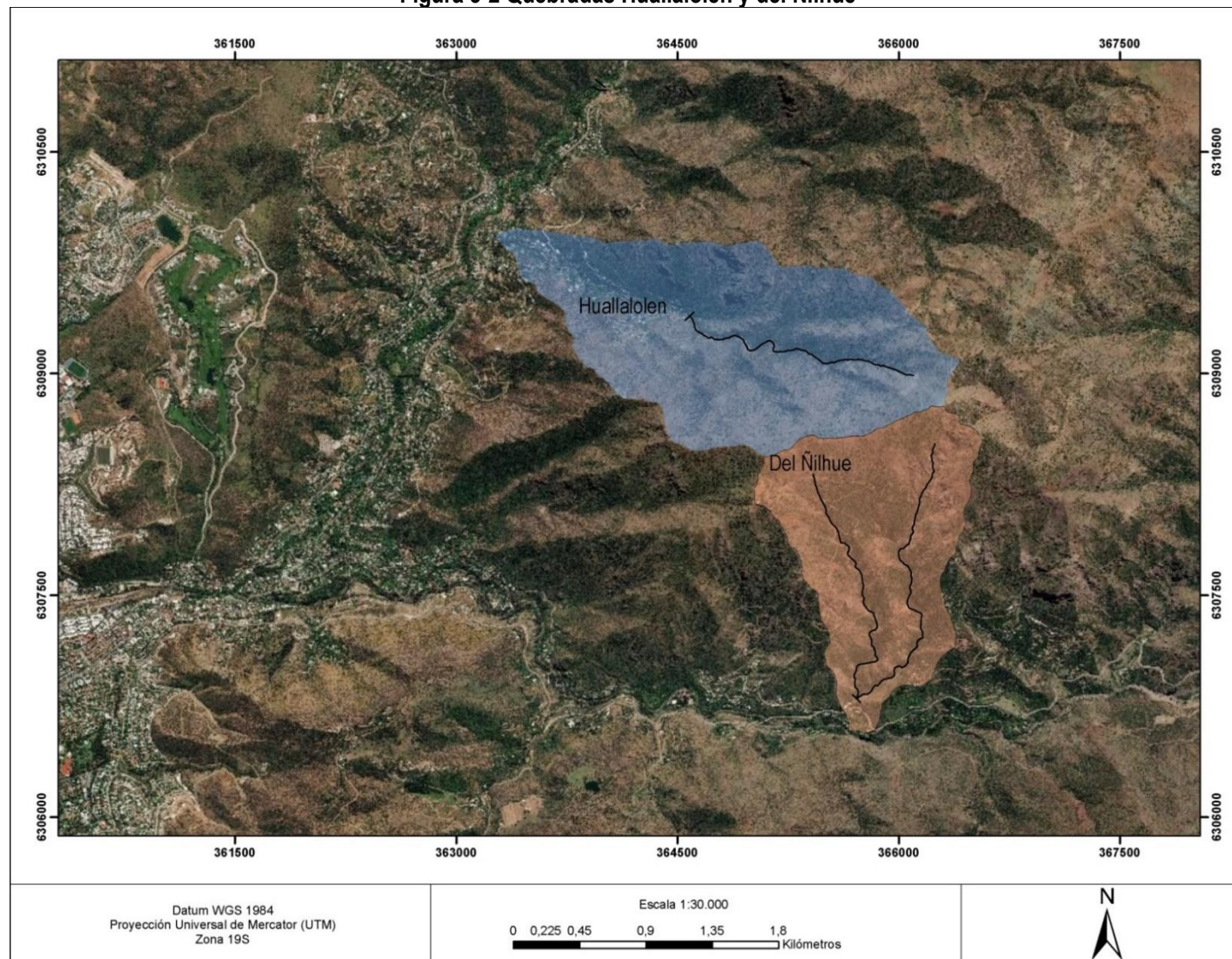
3.2.2 Modelación

Para la modelación de flujos de detritos se eligieron aquellas quebradas que poseen eventos catastrados tanto de eventos aluvionales como de inundaciones, dado que son las únicas que registran actividad reciente. En este caso las quebradas corresponden a Huallalolén y Ñilhue (Figura 3-2), con pendientes promedio de sus cauces de más de 20° y cuencas hidrográficas con una superficie superior a 1,5 km².

En el Cuadro 3-2 se presenta una tabla resumen de los datos ingresados al programa en cada uno de los escenarios simulados en el software RAMMS. Las características del modelo, los supuestos y parámetros utilizados, así como los resultados que se obtuvieron se encuentran en el Apéndice 8.4.2.

Los resultados de las simulaciones generadas por el Software RAMMS entregan información sobre la altura máxima y velocidad máxima alcanzada por el flujo en cada punto. En la Figura 3-3 se presenta un ejemplo de los resultados de velocidad y en la Figura 3-4 para los resultados de alturas máximas generados por el programa en la quebrada de Huallalolén para un periodo de retorno de 100 años y una concentración volumétrica de sedimentos de 40%.

Figura 3-2 Quebradas Huallalolén y del Ñilhue



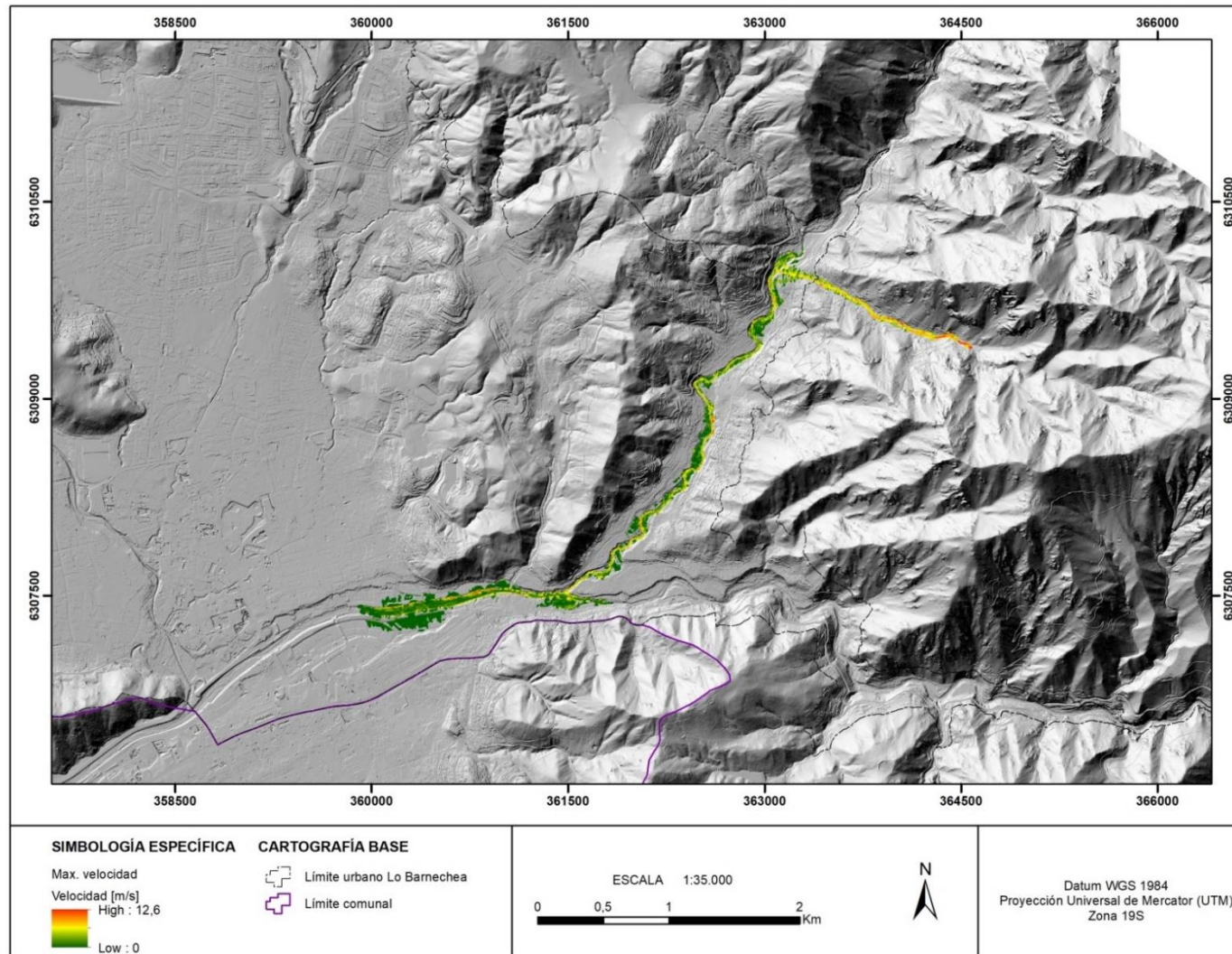
Fuente: Elaboración propia (2021)

Cuadro 3-2 Resumen datos de entrada software RAMMS de las quebradas de Huallalolén y del Ñilhue

Quebrada	T [años]	Caudal Líquido Máximo (Q_w) [m^3/s]	Concentración volumétrica (C_v) [%]	Caudal Máximo Total (Q_p) [m^3/s]	Volumen (V) [m^3]	Velocidad (v) [m/s]	Densidad (ρ) [kg/m^3]	Coefficiente de fricción de Coulomb (μ)
Huallalolén	100	22,2	50	96,2	251.754,9	12,6	1.801,7	0,15
			40	57,7	139.005,6	12,6	1.644,7	0,05
			30	41,2	94.007,2	12,6	1487,7	0,01
			20	36,1	70.194,0	12,6	1330,7	0,001
	25	17,9	50	77,5	195.848,5	12,6	1.801,7	0,15
			40	46,5	108.143,5	12,6	1.644,7	0,05
			30	33,2	73.138,5	12,6	1487,7	0,01
			20	25,8	54.613,1	12,6	1330,7	0,001
Del Ñilhue	100	17,0	50	73,7	184.686,5	12,1	1.801,7	0,15
			40	44,2	101.981,5	12,1	1.644,7	0,05
			30	31,6	68.971,7	12,1	1487,7	0,01
			20	24,6	51.502,1	12,1	1330,7	0,001
	25	12,5	50	54,2	129.175,5	12,1	1.801,7	0,15
			40	32,5	71.335,0	12,1	1.644,7	0,05
			30	23,2	48.247,6	12,1	1487,7	0,01
			20	18,1	36.028,6	12,1	1330,7	0,001

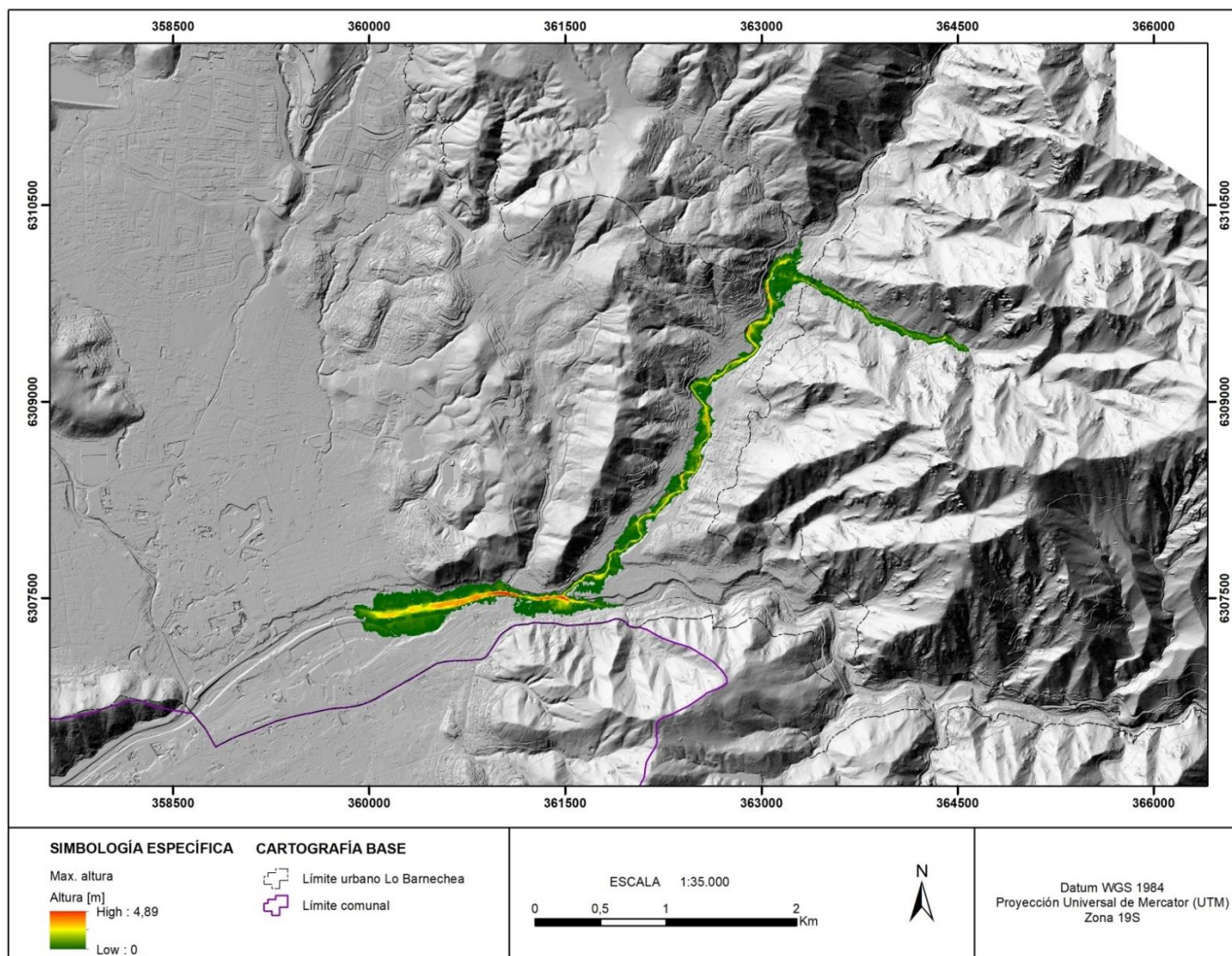
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura 3-3 Ejemplo de resultado de máxima velocidad para el caso T = 100 años, Cv 40% de la quebrada Huallalolón



Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura 3-4 Ejemplo de resultado de máxima altura para el caso T = 100 años, Cv 40% de la quebrada Huallalolén



Fuente: Elaboración propia (2021)

Para definir la intensidad de los flujos, se modificó la pauta entregada por Rickenmann (2005), aumentando la categoría de intensidad en un grado, desde baja a alta, a la graduación desde moderada a muy alta, tal como se presenta en el Cuadro 3-3.

Cuadro 3-3 Categorías para intensidad de flujos de detritos

Intensidad	Altura [m]	y	Velocidad [m/s]
Muy Alta	$\geq 1,0$	y	$\geq 1,5$
Alta	$0,4 \leq h < 1,0$	y/o	$0,4 \leq v < 1,5$
Moderada	$< 0,4$	y	$< 0,4$

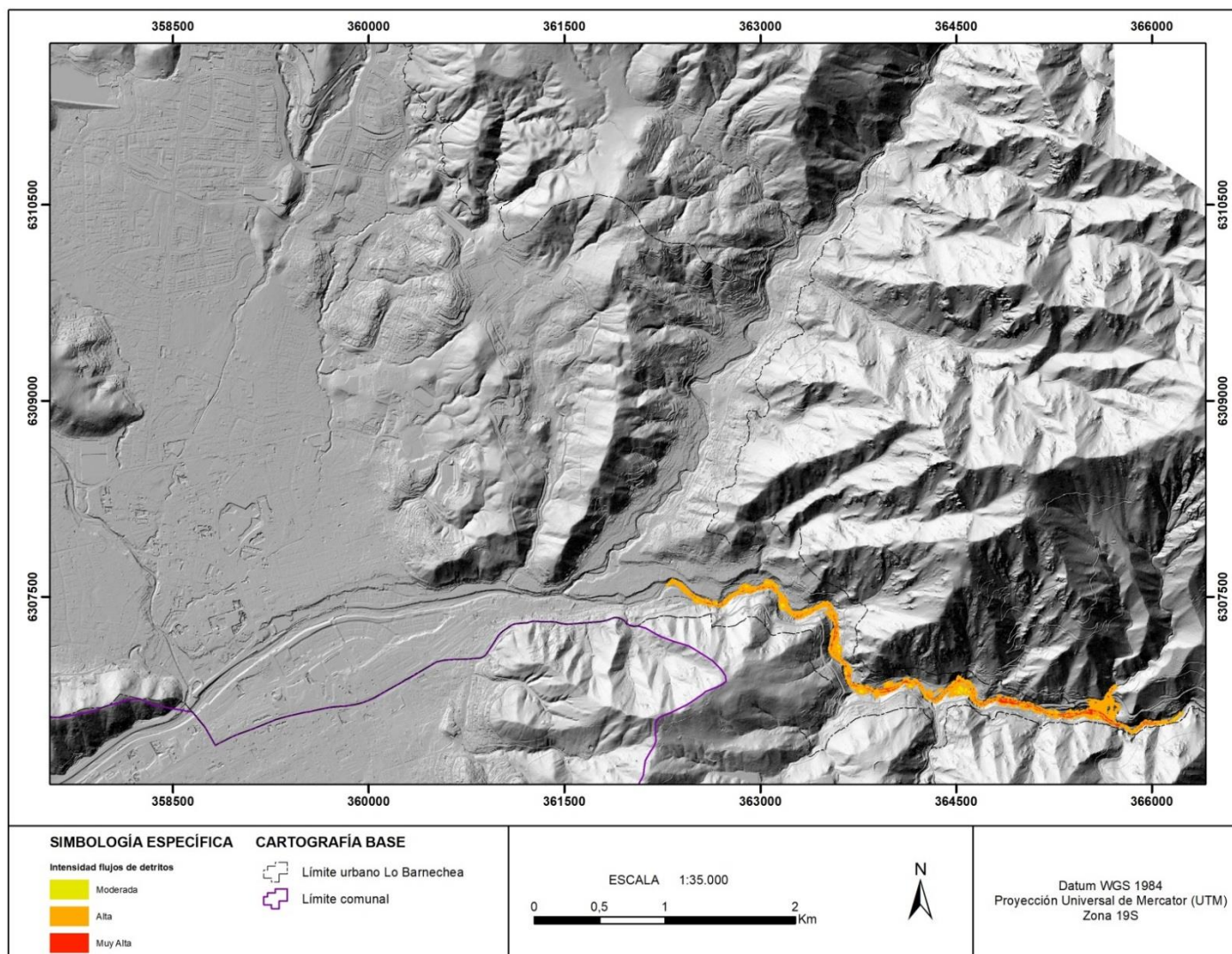
Fuente: Modificado de Rickenmann (2005)

Para generar las zonas con los distintos grados de intensidad se compararon los ráster generados por el programa de la altura y velocidad máxima alcanzada, de manera que cada condición fuera revisada para cada pixel y se gradúe de manera correcta la intensidad del flujo en cada punto de simulación. Este paso se repitió en cada una de las quebradas en los distintos escenarios asociados a los periodos de retorno de 25 y 100 años y sus respectivas concentraciones volumétricas de sólidos. Un ejemplo del resultado obtenido para la quebrada del Ñilhue en el periodo de retorno 25 años con una concentración volumétrica del 40% se presenta a continuación en la Figura 3-5. Los mapas de intensidad para cada escenario de simulación se presentan con mayor detalle en el Apéndice 8.4.2, letra 0.

Dado que las concentraciones volumétricas de sólidos más probables corresponden a los valores entre 30% y 40%, se compararon los mapas de intensidad para cada quebrada en cada periodo de retorno con aquellas concentraciones, manteniendo siempre los grados de mayor intensidad para obtener un mapa de intensidad representativo de cada periodo de retorno, para poder integrar flujos con mayor y menor contenido de agua en relación con los sedimentos disponibles. En la Figura 3-6 se puede observar para la quebrada del Ñilhue el mapa de intensidad final para un periodo de retorno de 25 años. Los mapas de intensidad de flujos de detritos finales para cada periodo de retorno se presentan en el Apéndice 8.4.2, letra 0.

Finalmente, se utilizaron los mapas de intensidad para los periodos de retorno de 25 y 100 años para delimitar de mejor manera la susceptibilidad de flujos de detritos en las quebradas de Huallalolén y del Ñilhue. Se presentan los mapas de intensidad final para cada quebrada en la Figura 3-7 y la Figura 3-8, respectivamente. Se complementa así la información de susceptibilidad obtenida desde la geomorfología y, por lo tanto, de la historia de los procesos geológicos y geomorfológicos ocurridos en la zona de estudio con la información obtenida mediante modelos numéricos en distintos escenarios para las cuencas hidrográficas seleccionadas.

Figura 3-5 Ejemplo mapa de intensidad para la quebrada del Ñilhue en el caso T = 25 años y concentración volumétrica de sedimentos de 40%



Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura 3-6 Ejemplo de mapa de intensidad final para la quebrada del Ñilhue en el caso T = 25 años

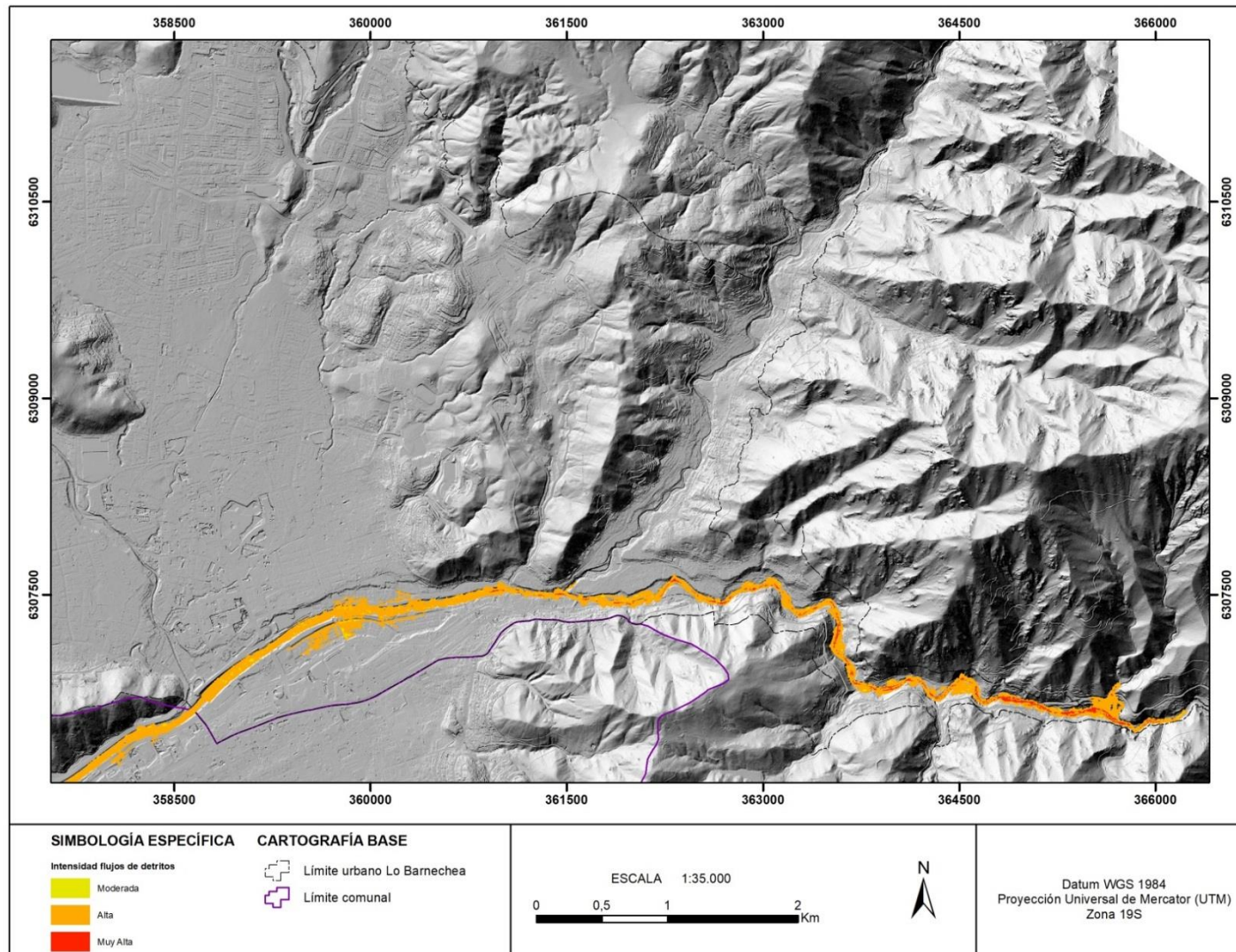
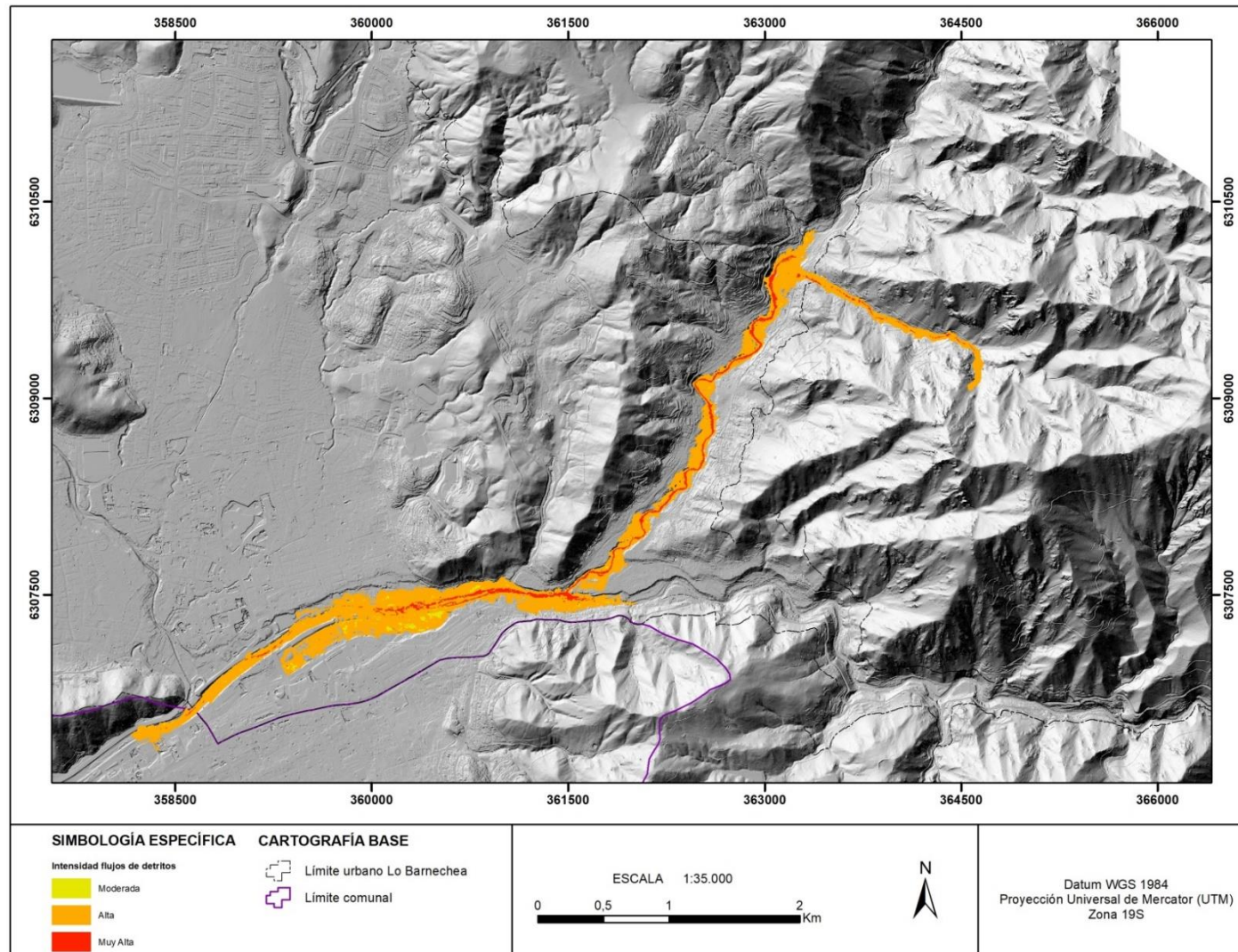
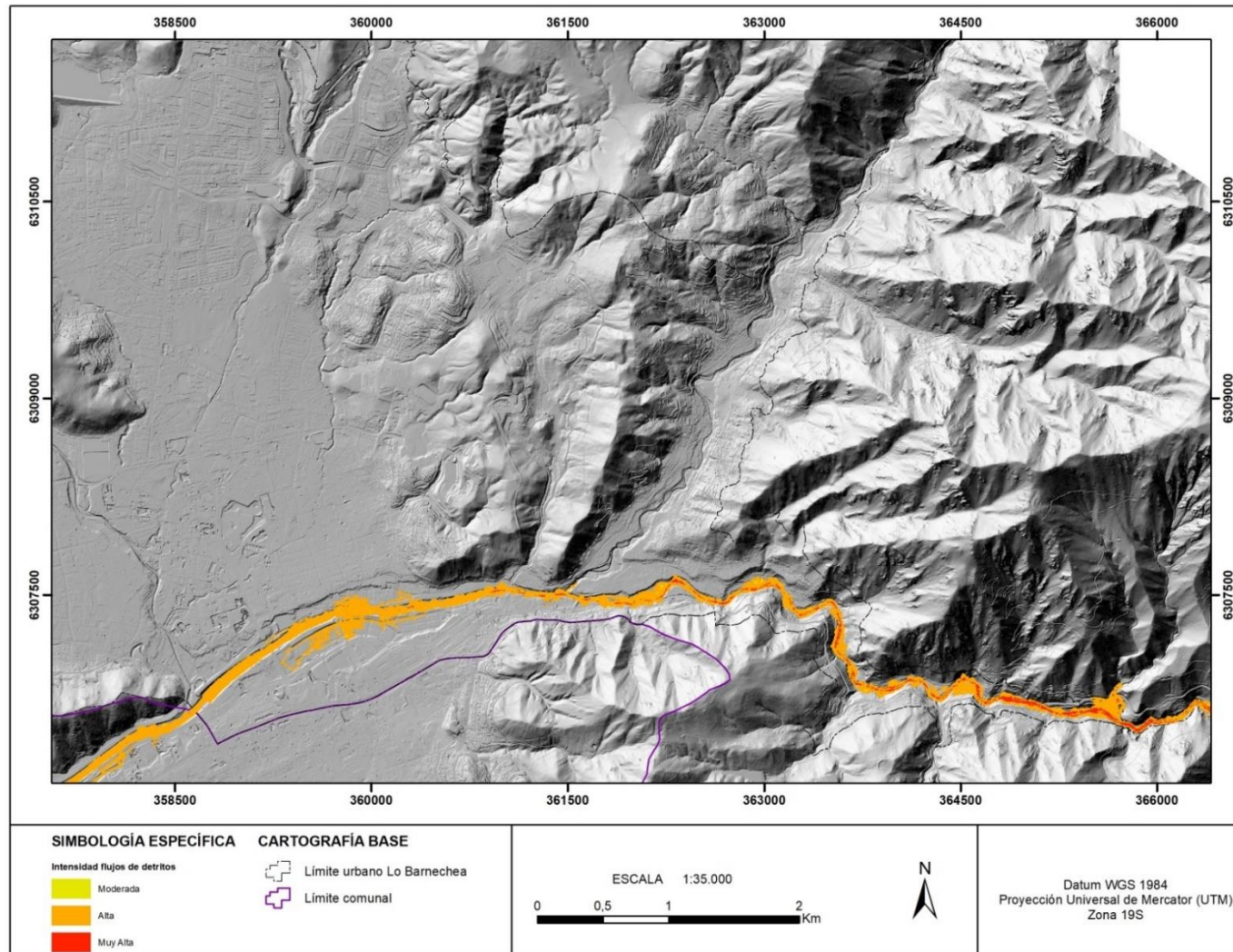


Figura 3-7 Mapa de intensidad final para la quebrada Huallalolén



Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura 3-8 Mapa de intensidad final para la quebrada del Ñilhue



Fuente: Elaboración propia (2021)

3.2.3 Susceptibilidad

Los factores que ejercen mayor impacto sobre la generación de flujos de barro y/o detritos, y que al mismo tiempo pueden ser aplicados de manera adecuada a la escala de análisis de este estudio, corresponden a las pendientes, tanto de laderas como de los canales de las quebradas, el nivel de incisión de los cauces y el tamaño de las cuencas hidrográficas, además de la existencia de eventos catastrados en el área. Por ello, la base para la zonificación de estos procesos corresponde a dichos elementos condicionantes. Para el análisis de susceptibilidad de flujos de barro y/o detritos se consideró la siguiente metodología y criterios de zonificación:

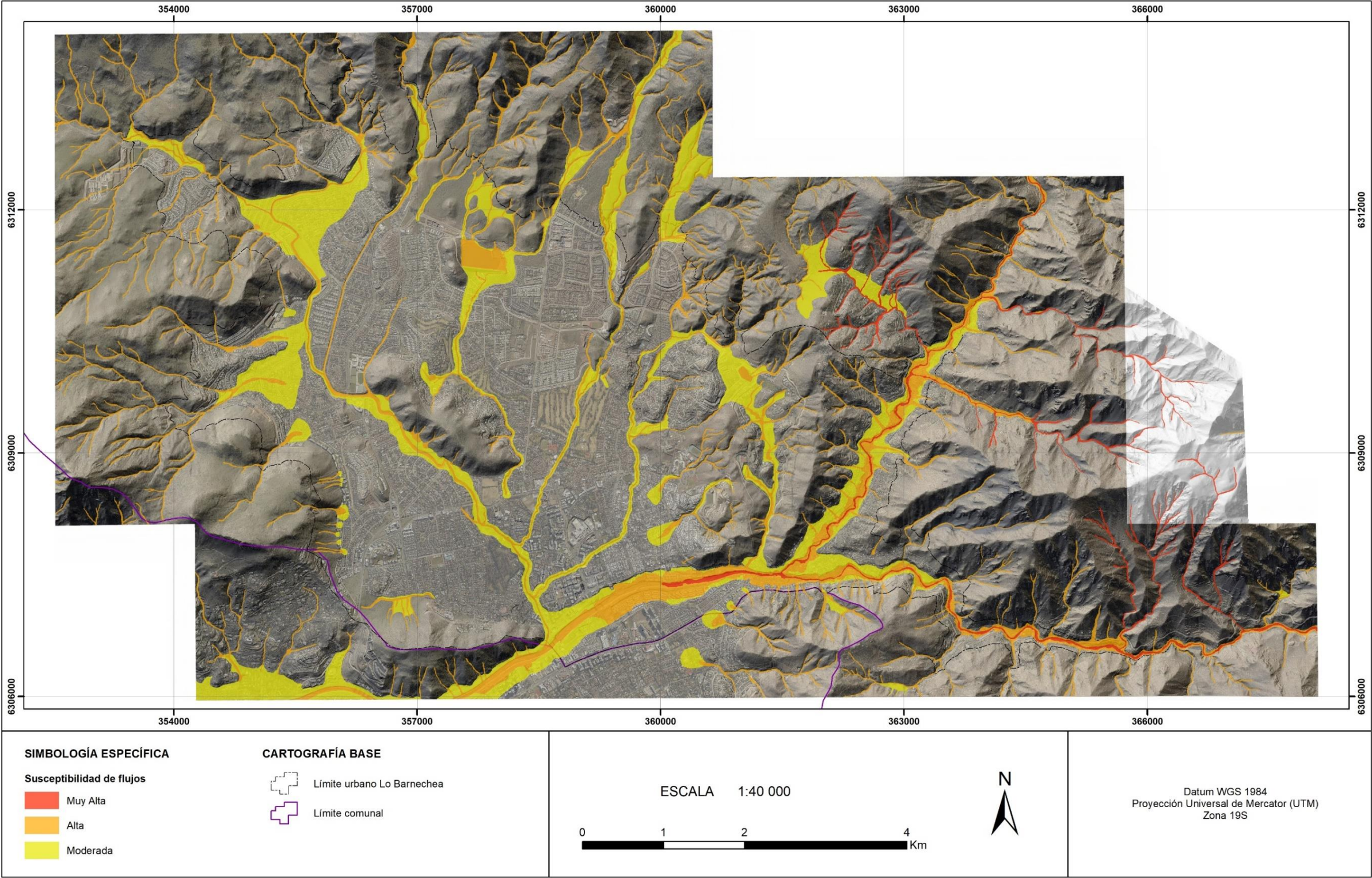
1. Se determinaron las áreas de generación a partir del geoprocesamiento del modelo de elevación digital en donde se delimitan las cuencas hidrográficas y se calculan las superficies de quebradas de la zona de estudio.
2. A los cauces principales, esteros y cauces de quebradas se atributan, preliminarmente, con un grado de susceptibilidad alta, asumiendo que todos los canales son susceptibles a transportar un flujo de detritos.
3. Abanicos aluviales y terrazas fluviales adyacentes se atributan con grados de susceptibilidad moderada.
4. Para quebradas que presenten catastro de eventos aluvionales y/o que posean cuencas hidrográficas de grandes dimensiones (superiores a 1,5 km²) y pendientes superiores a 20° desde su nacimiento al ápice de su abanico aluvial, se aumentó su nivel de susceptibilidad en un grado, asimismo los abanicos y terrazas fluviales adyacentes a ellas.
5. Para las quebradas que poseen una muy alta susceptibilidad y poseen eventos catastrados se realizan simulaciones numéricas con el software RAMMS con el fin de generar mapas de intensidad de los flujos de barro y/o detritos para los periodos de retorno de 25 y 100 años.
6. Se utilizaron los mapas de intensidad para delimitar de con mayor detalle la susceptibilidad de flujos de detritos en las quebradas de Huallalolén y del Ñilhue junto con sus efectos en la quebrada El Arrayán y el Río Mapocho. Para ello, se consideró la intensidad de flujo más desfavorable que se obtuvo en cada pixel, considerando las modelaciones a 25 y 100 años. Complementando así la información de susceptibilidad obtenida desde un análisis geomorfológico y, por lo tanto, de la historia de los procesos geológicos ocurridos en la zona de estudio con la información obtenida mediante un modelo numérico en distintos escenarios posibles para las cuencas hidrográficas seleccionadas.
7. En zonas en las cuales un cauce con susceptibilidad alta de flujos se ubica en zonas urbanas y no posee una terraza de inundación, pero la profundidad del canal es menor a 2 - 3 m, se añade un *buffer* de 10 a 20 m de susceptibilidad moderada de flujos, debido a que estas zonas pueden ser inundadas por un flujo en un eventual desborde del canal.

Los procesos anteriores dan como resultado un producto vectorial que representa los diferentes grados de susceptibilidad muy alta, alta y moderada dando origen a las siguientes categorías de susceptibilidad:

8. **Susceptibilidad Muy Alta de flujos de barro y/o detritos:** corresponde a cauces de quebradas con pendientes promedio de más de 20°, cuencas hidrográficas de grandes dimensiones (más de 1,5 m²) y/o eventos catastrados.
9. **Susceptibilidad Alta de flujos de barro y/o detritos:** corresponde a cauces de quebradas con potencial de generación de flujos, pero pendientes en su cauce entre 10° a 20° y sin eventos registrados en la zona, así como abanicos aluviales y terrazas fluviales adyacentes a cauces con susceptibilidad muy alta de generación de flujos de barro y/o detritos.
10. **Susceptibilidad Moderada de flujos de barro y/o detritos:** corresponde a cauces en zonas con pendientes menores a 10° con baja potencialidad de generación de flujos, pero que pueden transportar eventos aluvionales. Además de terrazas fluviales y abanicos aluviales adyacentes a zonas con susceptibilidad alta de flujos de detritos.

El mapa de susceptibilidad de flujos de barro y/o detritos a escala 1:1.000 se presenta a modo referencial dentro del informe, a escala 1:40.000, en la Figura 3-9.

Figura 3-9 Mapa de susceptibilidad de flujos de barro y/o detritos a escala representativa de 1:40.000



Fuente: Elaboración propia (2021)

3.3 PROCESOS DE LADERA

3.3.1 Diagnóstico

La caída de bloques se asocia a la existencia de discontinuidades en la roca, con condiciones de inestabilidad favorables para que los fragmentos caigan a través de un talud. Entre los factores condicionantes se diferencian aquellos que determinan la probabilidad de ocurrencia de los que controlan el nivel de daño generado. Entre los primeros; se cuenta la existencia de afloramientos de rocas, la orientación y la frecuencia de discontinuidades, y la pendiente del talud formado por afloramientos de roca fresca en superficie. Dado que la escala de trabajo no permite realizar una caracterización geotécnica exhaustiva de las unidades geológicas que conforman el territorio comunal, los factores que pueden considerarse como determinantes para la ocurrencia de este peligro son la existencia de afloramientos y la pendiente. Entre los factores que controlan el nivel de daño se encuentra el tamaño de los bloques que caen y la distancia vertical recorrida por estos. En general, a mayores pendientes y relieve, las laderas presentan una mayor tendencia a la inestabilidad (y por lo tanto, a la generación de caída de bloques) y los bloques desprendidos a alcanzar mayores distancias en sentido horizontal (mayor alcance).

Los deslizamientos pueden ocurrir de varias formas, dependiendo de las propiedades del material y las características geológicas y geomorfológicas del entorno, sin embargo, uno de los principales controles de este peligro corresponde a la pendiente del territorio. En el área de estudio, el alcance de los deslizamientos se encuentra fuertemente controlado por el relieve entre el punto de generación y el cauce al fondo de las cuencas: a mayor desnivel, mayor será la posibilidad de alcanzar mayores distancias.

Los colosales depósitos de megadeslizamientos reconocidos en el área de estudio dan cuenta de la acción erosiva a largo plazo de estos procesos, y que estos afectan las rocas de la Formación Abanico en diversos sectores distribuidos de manera relativamente homogénea en el área de estudio. Si bien la escala de trabajo no permite realizar una caracterización geotécnica exhaustiva de las unidades geológicas que conforman las zonas montañosas, es esperable que sean estos depósitos de megadeslizamientos los que presenten un comportamiento geotécnico más favorable para la ocurrencia de nuevos deslizamientos, de manera que puedan ser más susceptibles a reactivarse.

La caída de bloques y los deslizamientos pueden ser abordados de una manera conjunta, mediante el concepto de “proceso de laderas”, porque ambos peligros comparten en gran parte los factores condicionantes. Estos procesos dan cuenta de la dinámica propia de las laderas montañosas a escala de tiempo geológico, en el sentido de que la exposición continua a los agentes de meteorización propicia la erosión de los materiales superficiales (ya sea mediante la forma de caída de rocas o deslizamiento). En este sentido, la susceptibilidad asociada a procesos de ladera busca dar cuenta de todos los lugares que podrían verse afectados por la evolución dinámica natural de las laderas, y que al mismo tiempo sean representables a la escala de este estudio, según distintos grados o categorías. Por último, tal como se describió en las secciones anteriores, los procesos de ladera están determinados principalmente por las características geológicas del terreno, las pendientes y el relieve de las laderas.

En cuanto a los factores desencadenantes para los procesos de ladera, se identifican dos principales: los grandes sismos; y los eventos meteorológicos extremos, que disminuyen la cohesión de los materiales geológicos. En ambos casos, los sectores susceptibles ven acrecentados los factores que los hacen inestables, de tal manera que los materiales que componen las laderas pueden llegar a caer pendiente abajo.

En consecuencia, para determinar las zonas que pueden ser afectadas por este peligro, se tomaron en consideración los resultados de las líneas de base de geología y geomorfología (8.3) y de hidrología (8.3.5), el catastro de remociones en masa.

3.3.2 Susceptibilidad

Como se explicó anteriormente, los factores que ejercen mayor injerencia sobre la ocurrencia de los procesos de ladera, y que al mismo tiempo pueden ser aplicados de manera adecuada a la escala de análisis de este estudio, corresponden al tipo de unidad litológica, las pendientes y el relieve de las laderas. Por ello, la base para la zonificación de estos procesos corresponde a dichos elementos condicionantes.

Para el análisis de susceptibilidad de procesos de ladera, la metodología considera los siguientes pasos y criterios de zonificación:

1. Determinación de las áreas de generación a partir del geoprocesamiento digital del *raster* de pendientes derivado de la topografía levantada para este estudio. Este análisis contempló la clasificación de las pendientes considerando los intervalos propuestos por Esaki et al. (2005). Así, los intervalos de categorización de pendientes utilizados fueron: 0°-15°, 15°-25°, 25°-35° y >35°, a los que se denominaron como 1, 2, 3 y 4, respectivamente. Posteriormente, a partir de una serie de algoritmos de geoprocesamiento se procedió a la suavización automatizada de las categorías de pendientes 1, 2, 3 y 4, a modo de disminuir el ruido propio de un *raster* de este tipo dada la resolución del modelo de elevación digital del cual se deriva.
2. A modo de incluir, en cierto modo, las variables geotécnicas y geométricas dadas por el tipo de unidad geológica y el relieve topográfico en el cual se exponen, se procedió con la ponderación en 1 de las categorías 1, 2, 3, si estas áreas yacían sobre las unidades geológicas de la Formación Abanico (OIMa) o de depósitos de remoción en masa (PIHrm), ambas unidades expuestas en paisajes montañosos con relieve topográfico importante y presentando, generalmente, calidad geotécnica regular (ver 8.3).
3. Para permitir una correcta aplicabilidad en planificación de la cobertura de susceptibilidad obtenida hasta este punto, se procedió a una edición final de carácter manual de aquellas zonas que, aun habiendo ejecutado los pasos anteriores, todavía presentaban ruido innecesario o anchos reducidos menores a 100 m (zonas con pequeños y persistentes polígonos aislados, bordes de polígonos irregulares o con embahiamientos estrechos, etc.).
4. Se consideró que los taludes artificiales destinados a obras viales constituyen un caso particular, porque cuentan con estudios y obras destinadas a mitigar las amenazas. Así, en aquellos taludes que de acuerdo con su pendiente correspondiera un grado de susceptibilidad alta o muy alta, se les asignó la susceptibilidad de la ladera de cerro ubicada sobre los taludes, considerando que, pese a las obras, es posible que se generen procesos de ladera de gran magnitud en ellas. En ningún caso a estos taludes se les asignó una susceptibilidad menor que moderada.
5. En el caso particular del Cerro 18, la topografía tiene una forma escalonada, lo que dificulta la asignación de un grado de susceptibilidad. En este caso, se utilizó el modelo digital de elevación SRTM, pese a ser más grueso, porque permite asignar en función de la pendiente media del cerro, que es relevante para la generación de grandes deslizamientos. Se hace notar que un DEM más grueso tiende a subestimar la pendiente, lo que podría llevar a subestimar la susceptibilidad.

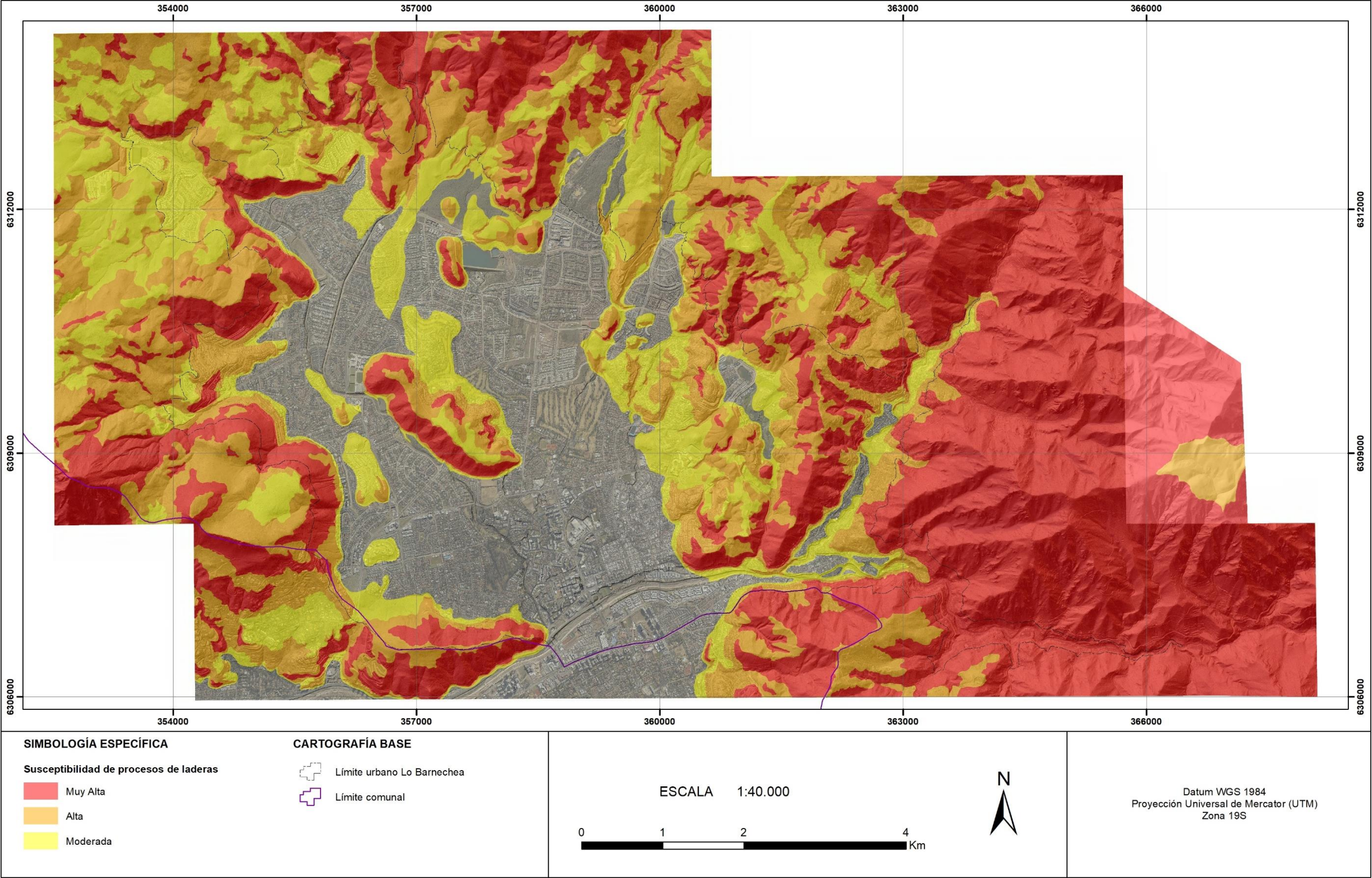
La consecución de los procesos anteriores da como resultado un producto vectorial que representa los diferentes grados de susceptibilidad muy alta, alta y moderada dando origen a las siguientes categorías de susceptibilidad:

- **Susceptibilidad Muy Alta de procesos de ladera:** corresponde a zonas con laderas naturales o taludes con pendientes por encima de 35°. También incluye las laderas naturales o taludes con pendientes entre 25° y 35°, que se desarrollen sobre la Formación Abanico o los depósitos de megadeslizamientos.
- **Susceptibilidad Alta de procesos de ladera:** corresponde a zonas con laderas naturales o taludes cuyas pendientes en el intervalo entre 25° y 35°. También incluye las laderas naturales o taludes con pendientes entre 15°-25°, que se desarrollen sobre la Formación Abanico o los depósitos de megadeslizamientos.

- **Susceptibilidad Moderada de procesos de ladera:** corresponde a zonas con laderas naturales o taludes con pendientes en el intervalo entre 15° y 25°. También incluye las laderas naturales o taludes con pendientes inferiores a 15° que se desarrollen sobre la Formación Abanico o los depósitos de megadeslizamientos.

El mapa de susceptibilidad de procesos de ladera a escala 1:1.000 se presenta a modo referencial dentro del informe, a escala 1:40.000, en Figura 3-10.

Figura 3-10 Mapa de susceptibilidad de procesos de ladera a escala representativa de 1:40.000



Fuente: Elaboración propia (2021)

4 SISMICIDAD

4.1 CATASTRO

En la línea de base de la sismicidad (8.3.5) 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. De esta forma, la amenaza sísmica en la comuna de Lo Barnechea se asocia a tres tipos de sismos:

- Sismos de interplaca, ocurridos en el contacto entre las placas Sudamericana y Nazca, con altas intensidades como consecuencia de un terremoto de gran magnitud a una escala regional, donde destacan los terremotos que afectaron a la zona en 1730, 1906, 1985 y 2010.
- Sismos intraplaca de profundidad intermedia, con epicentro en la plaza de Nazca bajo la depresión intermedia, cuyos efectos pueden ser muy destructivos, como los ocurridos en 1965 y 1971.
- Sismos corticales, asociados a actividad que ocurre en el interior de la Placa Sudamericana, como resultado del movimiento a través de estructuras como fallas activas. De ellas, no se cuenta con registro histórico, pero sí registro instrumental.

4.2 DIAGNÓSTICO

Las fuentes sismogénicas descritas anteriormente 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 intraplaca no se tiene suficiente información debido a que no han ocurrido muchos en el país. En este mismo sentido, la amenaza asociada a este tipo de sismos no se puede zonificar en el marco de este estudio.

Por último, se tienen los sismos corticales o generados por fallas activas, entre estas estructuras cordilleranas destaca la Falla San Ramón, cuya traza ha sido identificada y delimitada de forma detallada entre los ríos Mapocho y Maipo, por ende, no se ha reconocido en la comuna de Lo Barnechea.

Debe tenerse en consideración que la traza de la estructura solo se asocia al peligro de ruptura en superficie de la falla, pero áreas cercanas podrían verse afectadas por aceleraciones de gravedad que produzcan daños en infraestructura en casos de eventos de gran magnitud generados por la falla, lo que sí podría ocurrir dentro del área de estudio.

Finalmente, a pesar de que la Falla San Ramón no ha sido reconocida directamente dentro del área de estudio, existen investigaciones en curso que indicarían la existencia de estructuras tectónicamente similares, que podrían responder como esta estructura. De esta manera, se deben considerar que en estudios se ha reconocido la existencia de sismicidad activa asociada al plano de falla en profundidad de la Falla San Ramón, lo que indica que la falla es sísmicamente activa (Pérez et al., 2013).

En conclusión, el área de estudio se encuentra expuesta a la amenaza sísmica de tres fuentes sismogénicas. Sin embargo, en el caso de dos de las fuentes, 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 la tercera, si bien podría zonificarse la amenaza a una escala adecuada, no existe información suficiente para hacerlo, y se requieren estudios específicos al respecto.

5 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 1400 km del margen andino, desde los 33,3°S (Volcán Tupungatito) hasta los 45,9°S (Volcán Hudson).

5.1 CATASTRO

El área de estudio abarca parte del sector cordillerano de la Región Metropolitana, por lo 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 5-1.

Cuadro 5-1 Volcanes activos de la Región Metropolitana

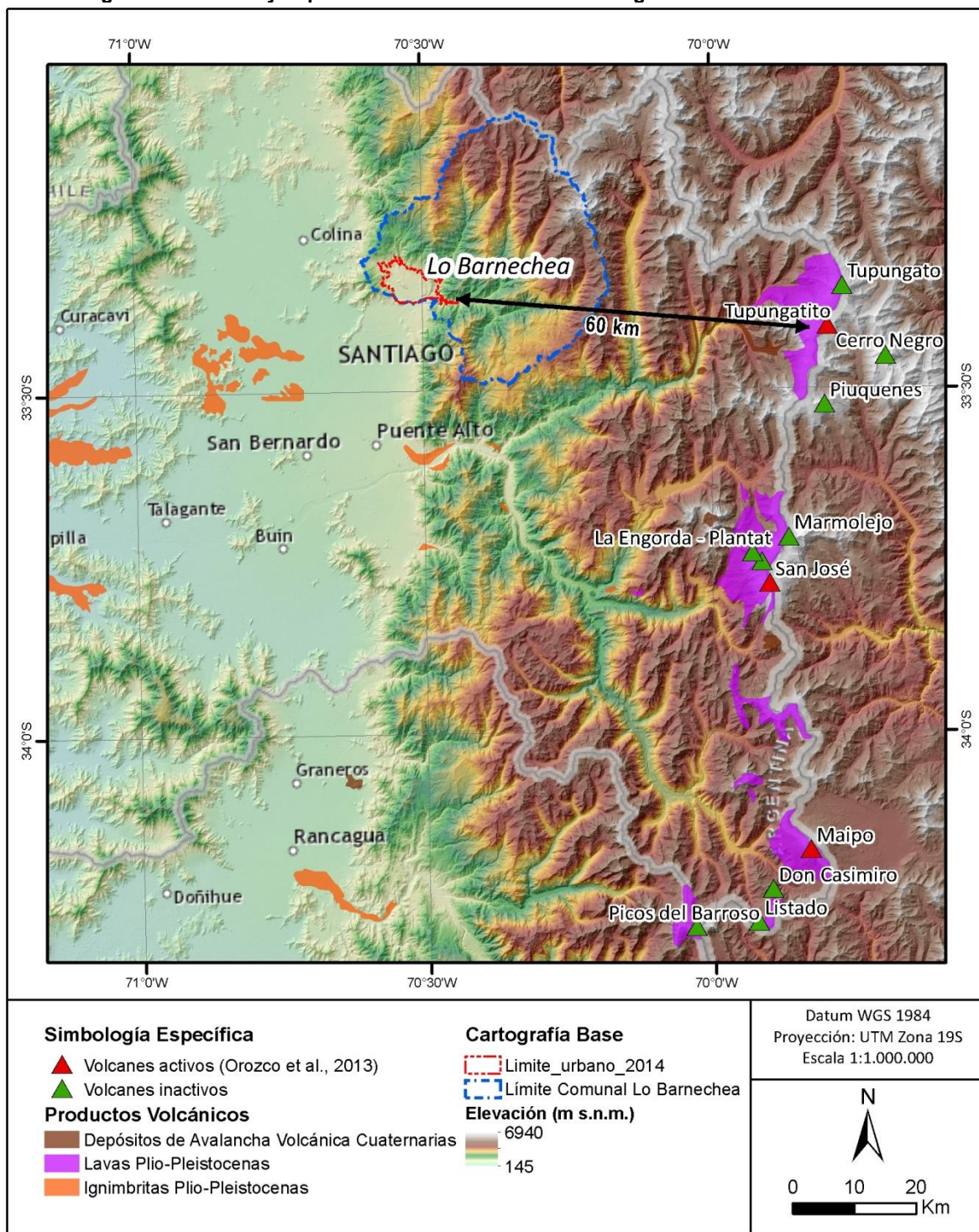
Volcán	Tipo de Volcán	Coordenadas		Ranking de Peligrosidad ¹	Distancia área de estudio
		Longitud	Latitud		
Tupungatito	Estratovolcán	-69.802	-33.401	22	60 Km
San José	Estratovolcán	-69.894	-33.790	21	68 Km
Maipo	Estratovolcán	-69.828	-34.166	47	106 Km

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 5 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 5-2, el Cuadro 5-3 y el Cuadro 5-4, respectivamente.

¹ 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 5-1 Centros y depósitos volcánicos en contexto regional con el área de estudio



Fuente: Elaboración propia (2021)

Cuadro 5-2 Historia Eruptiva 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 Smithsoniano, Global Volcanism Program

Cuadro 5-3 Historia Eruptiva 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 Smithsoniano, Global Volcanism Program

Cuadro 5-4 Historia Eruptiva 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 Smithsoniano, Global Volcanism Program

5.2 DIAGNÓSTICO

La ausencia de material de origen volcánico que se aprecia en el mapa geológico y la Figura 5 1, y que se constató durante la visita a terreno, indican que el área de estudio 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 caiga tefra sobre la comuna de Lo Barnechea, 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.

No es necesario construir mapas de zonificación para este peligro.

6 RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

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

6.1 ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD

Para definir los criterios que permitan incorporar los peligros naturales dentro de la zonificación urbana, es necesario tener claros los criterios utilizados en la definición de las diferentes categorías de susceptibilidad y la zonificación resultante. En este sentido, en el Cuadro 6-1 se resumen los factores que condicionan y desencadenan cada peligro geológico y los elementos metodológicos con los que se asignó la distribución espacial de la susceptibilidad, los que son descritos en detalle en los capítulos 0, 3, 4 y 5.

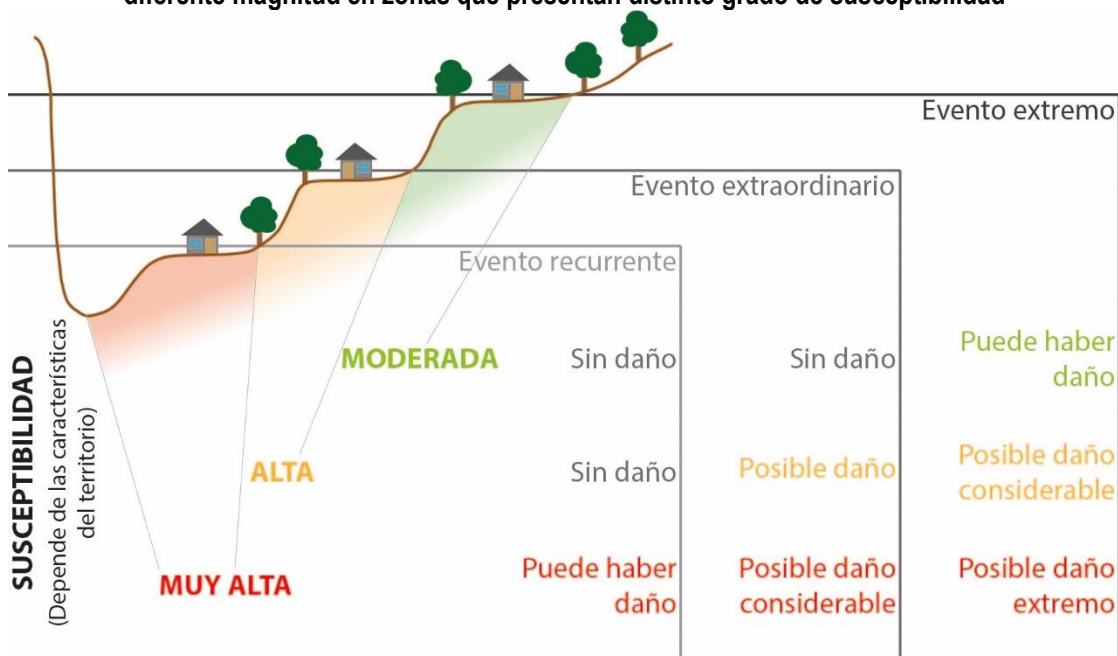
Cuadro 6-1 Resumen de factores que condicionan y desencadenan cada peligro geológico y criterios de zonificación de la susceptibilidad

Peligro	Factores condicionantes	Factores desencadenantes	Elementos de zonificación
Inundaciones por desborde de cauce	<ul style="list-style-type: none"> - Características morfológicas de la red de drenaje - Obras para mitigar el peligro 	<ul style="list-style-type: none"> - Lluvias intensas 	<ul style="list-style-type: none"> - Catastro de eventos de inundación - Unidades geológicas - Red de drenaje - Modelos hidráulicos - Observaciones de terreno
Flujos de barro y/o detritos	<ul style="list-style-type: none"> - Morfología de las quebradas y sus zonas de descarga. - Características de la cuenca aportante (tamaño, pendiente, altura, materiales). 	<ul style="list-style-type: none"> - Lluvias intensas 	<ul style="list-style-type: none"> - Observaciones de terreno - Catastro - Características morfológicas de la red de drenaje (pendiente, forma de los cauces) - Modelos de flujo
Procesos de ladera	<ul style="list-style-type: none"> - Pendientes - Material que compone la ladera (geología) 	<ul style="list-style-type: none"> - Sismos - Lluvias intensas - Viento 	<ul style="list-style-type: none"> - Pendiente del terreno - Catastro de remociones en masa - Unidades geológicas asociadas a procesos de ladera
Sismicidad	<ul style="list-style-type: none"> - Existencia de fallas activas - Características de los depósitos (efecto de sitio) 	<ul style="list-style-type: none"> - Sismos 	<ul style="list-style-type: none"> - No se zonificó a escala de comuna
Volcanismo (caída de ceniza)	<ul style="list-style-type: none"> - Distancia a los centros eruptivos - Morfología de la red hidrográfica - Dirección del viento 	<ul style="list-style-type: none"> - Erupciones 	<ul style="list-style-type: none"> - No se zonifica a escala de comuna

Fuente: Elaboración propia (2021)

Es muy relevante comprender que la categorización de susceptibilidad se relaciona con la posibilidad de ocurrencia de un fenómeno dado en un área determinada, pero corresponde a una categorización cualitativa, de carácter relativo, y no cuantitativa. Pese a que el concepto de susceptibilidad no contempla la cuantificación de períodos de retorno, ni probabilidades de ocurrencia, sí estipula niveles que indican de manera relativa la frecuencia con que ocurre un cierto fenómeno. En este sentido, las zonas de ‘muy alta’ susceptibilidad son aquellas que muy probablemente serán afectadas en caso de ocurrir cualquier evento del peligro analizado, las zonas de ‘alta’ susceptibilidad serán aquellas afectadas por eventos extremos (en muchos casos son los más grandes de los que se tengan registros históricos) y las de ‘moderada’ susceptibilidad se asocian a eventos excepcionales, de los que muchas veces no existen registros históricos, pero sí otro tipo de evidencias, como evidencias geológicas o morfológicas. Por otra parte, mientras la magnitud de un evento sea más intensa, se producirán daños mayores, y al mismo tiempo, los daños serán más importantes en la medida que mayor sea la susceptibilidad del territorio, de la forma que se ejemplifica en la Figura 6-1 para el caso de las inundaciones por desborde de cauce. En consecuencia, se recomienda que, mientras mayor sea la susceptibilidad de un área específica, mayores sean las restricciones y/o condicionantes para su utilización.

Figura 6-1 Esquema del daño provocado por eventos de inundación por desborde de cauces con diferente magnitud en zonas que presentan distinto grado de susceptibilidad



Fuente: Elaboración propia (2021)

6.2 DEFINICIÓN DE LAS ÁREAS DE RIESGO

Para los peligros que es posible zonificar a escala del Plan Regulador Comunal de Lo Barnechea, desde la perspectiva de la relación entre la magnitud de un evento, su recurrencia y el daño generado, y con el fin de homologar las categorías de susceptibilidad al lenguaje de la OGUC, se propone aplicar el concepto de área de riesgo establecido en el artículo 2.1.17 a las zonas de ‘muy alta’ y ‘alta’ susceptibilidad de cada uno de los peligros, pero no a las zonas de susceptibilidad ‘moderada’ (Cuadro 6-2). Pese a esto, no se debe considerar que las zonas de susceptibilidad moderada no puedan ser afectadas por los peligros analizados.

En cuanto a la sismicidad, aunque se le ha asignado una susceptibilidad ‘alta’ de manera homogénea, las normas chilenas NCh 433 (“Diseño sísmico de edificios”) y la NCh 2369 (“Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales”) definen las exigencias de diseño que deben cumplir diferentes tipos de edificaciones

debido al peligro sísmico, con herramientas más eficientes que las que ofrece la OGUC. Por lo tanto, no se ha aplicado la definición de área de riesgo para este peligro.

Finalmente, se asignó susceptibilidad moderada de forma homogénea a los peligros relacionados con el volcanismo, por lo que, aplicando el mismo criterio que en el caso de los peligros que se pueden zonificar, no se aplicó la definición de área de riesgo.

Según los criterios anteriores, en el Plano N° ARDU-01 (fuera de texto, Láminas N° 01 a 04) se han definido las siguientes áreas de riesgo:

- AR1: Área de riesgo de inundación por desborde de cauces.
- AR2: Área de riesgo de remoción en masa por procesos de ladera o rodados.
- AR3: Área de riesgo de remoción en masa por flujos de barro y/o detritos.

Cuadro 6-2 Criterios de definición de las áreas de riesgo en el área de estudio (escala 1:1.000) según el artículo 2.1.17 de la OGUC para cada peligro estudiado

PELIGRO GEOLÓGICO ESTUDIADO EN ESTE TRABAJO	SUSCEPTIBILIDAD	DESCRIPCIÓN	“Áreas de riesgo” según el artículo 2.1.17 de la OGUC
Inundaciones por desborde de cauces	MUY ALTA	Cauces activos, y por tanto, geológicamente a los depósitos fluviales actuales del río Mapocho, Estero El Arrayán, y Estero Las Hualtatas, y a los depósitos fluvio-aluviales activos de la quebrada Huallalolén y quebrada Ñilhue (y los afluentes a sus cuencas). En la quebrada Huallalolén, la zona inundada se ajustó mediante el modelo numérico. También se incluyó en esta categoría aquellos cauces que han sido normados por la autoridad competente. Por último, en los tranques artificiales, corresponde a la zona inundada según las imágenes aéreas disponibles.	X
	ALTA	Cauces, tanto naturales como intervenidos que han sido canalizados y su cauce se encuentra abierto. El área asociada a estas se definió en función de fajas alrededor del eje de los cauces. En esta categoría, también se incluyen el primer nivel de terrazas fluviales de la ribera norte del río Mapocho y el muro de contención de la ribera sur, el primer nivel terrazas del estero El Arrayán y parte de Las Hualtatas, cuyas áreas se definieron en función de fajas alrededor del eje de los cauces. En los tranques artificiales, esta cota está definida por la topografía en el entorno de los tranques, que define la cota máxima que podría alcanzar el agua.	X
	MODERADA	Depósitos aterrazados de origen fluvial de ubicados a mayor altura que las áreas de susceptibilidad alta, la primera terraza de la ribera sur y parte más alta de la terraza de la ribera norte del río Mapocho y las terrazas más altas del estero El Arrayán y Las Hualtatas. También se incluye en esta categoría la extensión de las quebradas ubicadas en las laderas de los cerros que rodean al territorio estudiado, el resultado del modelo hidráulico de la quebrada Las Zorras para 100 años de período de retorno, el antiguo cauce de la quebrada Oscura, y los antiguos cauces, en las zonas donde estos actualmente se encuentran abovedados.	
Flujos de barro y/o detritos	MUY ALTA	Cauces de quebradas con pendientes promedio de más de 20°, cuencas hidrográficas de grandes dimensiones (más de 1,5 m2) y/o eventos catastrados.	X
	ALTA	Cauces de quebradas con potencial de generación de flujos, pero pendientes en su cauce entre 10° a 20° y sin eventos registrados en la zona, así como abanicos aluviales y terrazas fluviales adedañas a cauces con susceptibilidad muy alta de generación de flujos de barro y/o detritos.	X
	MODERADA	Cauces en zonas con pendientes menores a 10° con baja potencialidad de generación de flujos, pero que pueden transportar eventos aluvionales. Además de terrazas fluviales y abanicos aluviales adyacentes a zonas con susceptibilidad alta de flujos de detritos.	

PELIGRO GEOLÓGICO ESTUDIADO EN ESTE TRABAJO	SUSCEPTIBILIDAD	DESCRIPCIÓN	“Áreas de riesgo” según el artículo 2.1.17 de la OGUC
Procesos de ladera	MUY ALTA	Zonas con laderas naturales o taludes con pendientes por encima de 35° y sus alcances modelados para un ángulo de fricción de 35°. También incluye las laderas naturales o taludes con pendientes entre 25° y 35° y sus alcances modelados para un ángulo de fricción de 32,5°, que se desarrollen sobre la Formación Abanico o los depósitos de megadeslizamientos.	X
	ALTA	Zonas con laderas naturales o taludes cuyas pendientes en el intervalo entre 25° y 35° y sus alcances modelados para un ángulo de fricción de 32,5°. También incluye las laderas naturales o taludes con pendientes entre 15°-25° y sus alcances modelados para un ángulo de fricción de 30°, que se desarrollen sobre la Formación Abanico o los depósitos de megadeslizamientos.	X
	MODERADA	Zonas con laderas naturales o taludes con pendientes en el intervalo entre 15° y 25° y sus alcances modelados para un ángulo de fricción de 30°. También incluye las laderas naturales o taludes con pendientes inferiores a 15° que se desarrollen sobre la Formación Abanico o los depósitos de megadeslizamientos.	
Sismicidad	ALTA	De acuerdo con el nivel de conocimiento actual, el territorio de la comuna se encuentra expuesto de manera homogénea a este peligro.	
Volcanismo	MODERADA	La susceptibilidad asociada a este proceso es moderada en toda el área estudiada.	

Fuente: Elaboración propia (2021)

6.3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ESPECÍFICAS

La comuna de Lo Barnechea, por el hecho de estar ubicada en el borde de una zona montañosa, se encuentra expuesta a la ocurrencia de muchos peligros en prácticamente la totalidad de su territorio. Por esta razón, la extensión del territorio urbano debe ocurrir de manera controlada, para evitar que estos peligros afecten a la población.

En este escenario, el Plan Regulador Comunal considera tres medidas destinadas a gestionar el riesgo en el área normada:

- a. **Restricción al desarrollo urbano:** corresponden a aquellas áreas en que se restringe la urbanización y/o construcción en el territorio. Las disposiciones normativas del Plan pueden consolidar áreas verdes o usos complementarios al área verde.
- b. **Desarrollo urbano controlado:** corresponden a acciones destinadas a controlar, mediante las disposiciones normativas del Plan relativas a la intensidad de uso y construcción del territorio, sin perjuicio de las acciones complementarias de mitigación que deban desarrollar los particulares.
- c. **Habilitación condicionada:** se orienta a los sectores que permiten su habilitación, condicionada solamente a la ejecución de obras de mitigación por parte de los particulares – urbanizadores, en cumplimiento con lo establecido en el artículo 2.1.17 de la OGUC.

Aunque en este estudio no se hace una verificación al respecto, se hace notar que para que las obras de mitigación funcionen adecuadamente se necesita que cuenten con las mantenciones que ellas requieren.

En un escenario de cambio climático, el análisis de los peligros que pueden afectar a la comuna se hace en condiciones de incertidumbre. Aunque en este trabajo no se hace un análisis detallado al respecto, algunos factores que pueden afectar el análisis son la incertidumbre respecto a la cantidad de precipitaciones, la ubicación del límite entre la zona de precipitaciones líquidas y sólidas, y el estado de conservación de la vegetación.

6.3.1 Inundaciones

En el Área Urbana Sector Valle de Lo Barnechea hay una gran cantidad de cauces de origen natural, pero de ellos, el Plan Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS) define áreas de riesgo para 15 cauces, incluido el río Mapocho y el Estero El Arrayán. Los cauces ubicados en el área urbana en estudio, tanto los que se encuentran normados por el PRMS como los que no, mayoritariamente, han sido intervenidos, ya sea para modificar sus trazados, entubarlos o construir obras destinadas a contenerlos durante las crecidas. Estas obras modifican, mediante Documentos Ordinarios, la delimitación de las áreas de restricción y autorizan las construcciones en un área específica, que puede relacionarse con proyectos grandes (como un loteo o edificio) o con un único Rol. En el primer caso, las medidas de mitigación se han incluido en este estudio, mientras que los estudios relacionados a un único Rol no se han podido incluir, debido a que esta información se encuentra repartida en una cantidad muy grande de estudios.

Las modificaciones de las áreas de restricción se han generado de manera fraccionada en la comuna, y por ende no constituyen necesariamente una franja continua. Adicionalmente, existen dificultades en la interpretación de la franja, que en algunos casos corresponde a una distancia desde el centro del cauce y en otros desde el límite de obras que no se conoce su ubicación georreferenciada.

En este estudio, más que incorporar esta información directamente en la delimitación de susceptibilidad, se han analizado aquellos cauces en los cuales la delimitación de susceptibilidad por inundación se traslapa con propiedades con las autorizaciones. Lo anterior se observa preliminarmente para las quebradas El Gabino, La Carbonera, El Manzano y Las Rosas, y para el Estero El Arrayán. De esta forma se recomienda tomar en cuenta la información del catastro realizado por el Departamento de Documentación Técnica y Catastro, de la Municipalidad de Lo Barnechea, base de datos de las modificaciones de franjas de protección realizadas, asociadas a los distintos cauces, incluyendo el Rol de las propiedades, y los Ordinarios con las modificaciones respectivas, para la delimitación o clasificación de áreas del instrumento de planificación en los sectores correspondientes.

En los cauces normados por el PRMS, existe un interés de los particulares por mejorar la definición del área de riesgo, mientras que, en los cauces no normados, los particulares no tienen incentivos para hacer estudios relativos a este tema. Así, mientras los cauces incluidos en el PRMS cuentan con medidas de mitigación que hacen que poca infraestructura se encuentre en zonas inundables, los cauces no incluidos en la normativa, por lo general, no cuentan con estudios fundados para mitigar el riesgo.

Como la mayor parte de la red de drenaje ha sido modificada, ya sea mediante obras de contención en el mismo lugar o por modificaciones del trazado, en caso de que la cantidad de agua supere la capacidad de los cauces, el excedente no necesariamente seguirá los cauces y existirá un nivel de incertidumbre importante respecto de las zonas por donde escurriría el agua.

En este estudio se elaboró un modelo numérico de inundación en la quebrada Las Zorras, que en su entorno está habitada por parte de la población más vulnerable de la comuna, lo que impide que la población pueda hacer estudios específicos para acotar las áreas de riesgo.

Las pendientes relativamente altas que se encuentran en la mayor parte del territorio favorecen el escurrimiento a través de la superficie e impiden que se formen zonas de acumulación de agua.

Este estudio sólo incorpora las obras terminadas a la fecha en que se realizó. En particular, las obras de contención relacionadas con la extensión de la Costanera Norte hacia el oriente (hasta la Av. Padre Alfredo Arteaga Barros) no se han incorporado.

6.3.2 Flujos de barro y/o detritos

Los flujos o aluviones son procesos diferentes de las inundaciones, y ambos peligros no se comportan de igual manera. En este sentido, aunque las obras de mitigación reducen el riesgo asociado a este peligro, no han sido diseñadas para esto, y, en caso de ocurrir un flujo, podrían ser superadas. Según los modelos numéricos, esto podría ocurrir en algunos sectores, ubicados en las terrazas del río Mapocho, donde los flujos pueden superar las medidas de contención diseñadas para inundaciones. Una consecuencia de esta situación es que las medidas de mitigación podrían generar una falsa sensación de seguridad respecto de los peligros.

En los sectores en donde se han modificado los cauces, en caso de ocurrir un flujo, el escurrimiento tendería a buscar las zonas más deprimidas, donde originalmente se encontraban los cauces. Los casos donde esto ocurre de manera más evidente son las quebradas Oscura y Los Guindos.

En este estudio se modelaron dos quebradas: Huallalolén y Ñilhue. Se eligieron estas quebradas por ser las que han presentado más problemas de flujos en el último tiempo. Sin embargo, también merecen especial atención la quebrada Novillo Muerto y varias que se encuentran en la zona montañosa ubicada entre el estero El Arrayán y el río Mapocho. Posiblemente, en el futuro se debieran desarrollar nuevos modelos para ellas.

Pese a lo anterior, debe tenerse en consideración que los modelos buscan representar los fenómenos, considerando simplificaciones y supuestos, de manera que sólo son una aproximación del peligro modelado. En una situación real, pueden ocurrir cosas diferentes, no predichas por los modelos.

6.3.3 Procesos de ladera

Los factores considerados para definir la susceptibilidad asociada a este peligro fueron la pendiente del terreno, la presencia de afloramientos de roca y la existencia de unidades geológicas de mala calidad geotécnica (Formación Abanico) o asociadas a grandes remociones en masa (megadeslizamientos) ocurridas en el pasado.

Las zonas susceptibles a estos peligros se concentran mayoritariamente en las laderas de las zonas montañosas y de los cerros isla, aunque también se pueden encontrar en algunos cauces.

En general, el territorio estudiado se encuentra más expuesto a caídas de rocas que a deslizamientos.

6.3.4 Sismicidad

En el área de estudio, existen tres mecanismos sísmicos:

- Sismos interplaca. A ellos se orienta la normativa sísmica.
- Sismos interplaca de profundidad intermedia.
- Sismos corticales. En la comuna se han reconocido sismos corticales que se asocian a las estructuras del frente cordillerano occidental como, por ejemplo, la falla de San Ramón. A partir de los insumos y de los antecedentes disponibles no ha sido posible delimitar la traza de las fallas corticales en el área de la comuna con una precisión adecuadas para establecer restricciones en el marco del PRC, por lo tanto, se recomienda hacer estudios específicos para delimitar su traza con mayor precisión o incorporar restricciones intercomunales que puedan emitirse en el marco de una modificación del PRMS

6.3.5 Volcanismo

No existe conexión hidráulica entre el territorio estudiado y algún volcán, de manera que el peligro volcánico no es relevante para el territorio comunal.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre, L. (1960). *Geología de los Andes de Chile Central*. Santiago: Instituto de Investigaciones Geológicas.
- 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. (2002). *Peligro de Remociones en Masa e Inundaciones en la Cuenca de Santiago*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Ambiental, No. 2, 1 mapa escala 1:100.000.
- Arenas, M. (2007). *Peligro de remociones en masa asociado a un relleno no autorizado en un sector del Club Ecuestre Internacional comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana de Santiago*. Santiago: SERNAGEOMIN.
- Armanini, A., & Gregoretti, C. (2000). Triggering of debris-flow by overland flow: A comparison between theoretical and experimental results. *Debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction and assessment*, 117-124.
- 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).
- Bovis, M. J., & Jakob, M. (1999). The role of debris supply conditions in predicting debris flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(11), 1039–1054.
- CADE Consultores en Ingeniería. (2001). *Plan maestro de evacuación y drenaje de aguas lluvias del Gran Santiago*. Santiago: DOH-MOP.
- Cahill, T., & Isacks, B. (1992). Seismicity and shape of the subducted Nazca Plate. *Journal of Geophysical Research*, <https://doi.org/10.1029/92JB00493>.

- Celis, C. (2018). Susceptibilidad de remociones en masa y peligro de flujos en el frente cordillerano de Santiago, Región Metropolitana. *Tesis para optar al Grado de Magister en Ciencias Mención Geología. Memoria para optar al Título de Geólogo. Departamento de Geología, Universidad de Chile.*
- Centeno, J., Fraile, M., Otero, M., & Pividal, A. (1994). *Geomorfología Práctica. Ejercicios de fotointerpretación y planificación geoambiental*. Madrid: Ed. Rueda.
- Cisternas, M. (2012). El terremoto de 1647 de Chile central como un evento intraplaca: ¿otra amenaza para Chile metropolitano? *Revista de Geografía del Norte Grande*, 53, 23-33.
- 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). Effects of recent revisions of the geomagnetic reversal time scale on estimates on current plate motion. *Geophysical Research Letters*, 21(20), pp.2191-2194.
- Deubelbeiss, Y., & Graf, C. (2013). Two different starting conditions in numerical debris flow models—Case study at Dorfbach, Randa (Valais, Switzerland). *Mattertal—ein Tal in Bewegung. Publikation zur Jahrestagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft*, 29, 125–138.
- DGA-MOP. (1991). *Precipitaciones máximas en 1, 2 y 3 días*. Santiago.
- 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.
- 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.
- Fernández, J. (2010). *Caída de Rocas, Comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana*. Santiago: SERNAGEOMIN.
- 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*.
- Hungr, O., & Evans, S. (1996). Rock avalanche runout prediction using a dynamic model. *Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway*, 11, 233–238.
- Hussin, H., Luna, B. Q., van Westen, C. J., Christen, M., Malet, J. P., & van Asch, T. (2012). Parameterization of a numerical 2-D debris flow model with entrainment : a case study of the Faucon catchment , Southern French Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 3075–3090.
- INFRACON. (2014). *Estudio de Riesgo y Protección Ambiental Plan Regulador Comunal de Lo Barnechea*. Santiago.
- ISRM. (1981). Rock characterization, testing and monitorin. En E. Brown, *ISRM suggested method* (págs. pp. 75-105). Oxford, OK: Pergamon Press.
- Jitousono, T., Shimokawa, E., & Tsuchiya, S. (1996). Debris flow following the 1994 eruption with pyroclastic flows in Merapi volcano, Indonesia. *J. Jap. Soc. Erosion Control Engng.*, 48, 109–116.
- 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 cuased 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.
- Manea, V., Pérez-Gussinye, M., & Manea, M. (2012). Chilean flat slab subduction controlled by overriding plate thickness and trench rollback. *Geology*, V.40(N° 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-based data mining approach. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, v. 13, p. 53-64.
- MINVU. (1996). *Técnica Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos. Guía de Diseño*. Santiago.
- Mizuyama, T., Kobachi, S., & Ou, G. (1992). Prediction of debris flow peak discharge. *Proc. Int. Symp. Interpraevent, Bern, Switzerland, Bd. 4*, 99–108.
- MOP. (2018). *Manual de Carreteras*. Santiago.
- Mpodosis, 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. A., & 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*. Subdirección Nacional de Geología. Santiago, Chile: SERNAGEOMIN.
- 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.
- 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*. Braunschweig.
- Pérez et al. (2013). Improving seismotectonics and seismic hazard assessment along the San Ramón Fault at the eastern border of Santiago city, Chile. *Natural Hazards*, V.69, Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11069-013-0908-3/f>.
- 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-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.
- PWRI. (1988). Technical standard for measures against debris flow (draft). *Technical Memorandum of PWRI, No. 2632, Ministry of Construction, Japan*.

- 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.
- Rickenmann, D. (1999). Empirical relationships for debris flows. *Natural Hazards*, 19(1), 47–77.
- Salm, B. (1993). Flow, flow transition and runout distances of flowing avalanches. *Ann. Glaciol.*(18), p.221-226.
- Salm, B., Burkard, A., & Gubler, H. (1990). Berechnung von Fliesslawinen, eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen. *Mitteilungen des Eidgenössischen Institutes für Schnee und Lawinenforschung*, No. 47.
- Sancho, C. (1997). Los mapas de riesgos. En J. Peña (Ed.), *Cartografía geomorfológica básica y aplicada* (págs. 181-200). Zaragoza: Geomorfa.
- Scheuner, T., Schwab, S., & McArdell, B. W. (2011). Application of a two-dimensional numerical model in risk and hazard assessment in Switzerland. *GEOTEST AG, Zollikofen, Switzerland. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, Birmensdorf, Switzerland*.
- Schneider, D., Huggel, C., Cochachin, A., Guillén, S., & García, J. (2014). Mapping hazards from glacier lake outburst floods based on modelling of process cascades at Lake 513, Carhuaz, Peru. *Advances in Geosciences*, 35, 145–155.
- Scholz, C. (1990). *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge: Cambridge University Press, 439 pág.
- Schraml, K., Thomschitz, B., Mcardell, B. W., Graf, C., & Kaitna, R. (2015). Modeling debris-flow runout patterns on two alpine fans with different dynamic simulation models. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(7), 1483-1492.
- Sepúlveda, S. (1998). Metodología para evaluar el peligro de flujos de detritos en ambientes montañosos: Aplicación en la Quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana. *Memoria para optar al Título de Geólogo. Departamento de Geología, Universidad de Chile*.
- 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.
- SERNAGEOMIN. (2003). *Mapa Geológico de Chile: Versión Digital. Publicación Geológica Digital, N°4*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería.

- 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. W., & Ruff, L. J. (1993). *Depth of seismic coupling along subduction zones*, *Jour. Geoph. Res.*, 98, pp. 2017-2037.
- 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.
- 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.
- Voellmy, A. (1955). *On the destructive force of avalanches*. Davos, Suiza: SLF.
- Wall, R., Sellés, D., & Gana, P. (1999). *Hoja Tiltil-Santiago, Región Metropolitana. Escala 1:100.000*. Santiago: SERNAGEOMIN.
- WSL. (2017). Rapid mass movements simulation (RAMMS): User Manual v1.7 Debris Flow. *Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Swiss Federal Institutes of Technology*.
- 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 APÉNDICES

8.1 DEFINICIONES DE PELIGRO Y RIESGO USADAS EN ESTE ESTUDIO

Los procesos geodinámicos producen modificaciones de diversas magnitudes en la superficie terrestre que constituyen peligros geológicos que afectan de forma directa o indirecta las actividades humanas. Se entiende como **Peligro Natural** a cualquier fenómeno de origen natural que puede tener efectos negativos en el territorio (personas, infraestructura, medio ambiente, etc.). Los peligros naturales pueden subdividirse en distintas categorías: geológicos, hidrológicos, climáticos, incendios, etc.

Asociados a los peligros naturales se reconocen cuatro conceptos principales: **susceptibilidad**, **vulnerabilidad**, **amenaza** o peligrosidad (hazard) y **riesgo** (risk).

La **susceptibilidad** corresponde a una estimación cualitativa o cuantitativa de la distribución espacial de un fenómeno dado que existe o que potencialmente podría ocurrir en un área. Aunque se espera que un cierto fenómeno peligroso ocurra con mayor frecuencia en las áreas de mayor susceptibilidad, debe tenerse en cuenta que el análisis de susceptibilidad no considera el período de retorno de los eventos, es decir, el factor tiempo (JTC-1, 2008). La susceptibilidad depende directamente de los factores que controlan o condicionan la ocurrencia de los procesos, como la geomorfología o factores intrínsecos de los materiales geológicos, y de factores externos que pueden actuar como desencadenantes (por ejemplo, precipitaciones intensas, sismos, etc.). Para la construcción de mapas de susceptibilidad se utilizan los mapas de 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** o **peligrosidad** (hazard*) corresponde a la probabilidad de ocurrencia de un proceso, con una magnitud determinada dentro de cierto período de tiempo y en un área específica (Varnes, 1984). La estimación de la amenaza o peligrosidad implica necesariamente una consideración de la variable temporal, es decir, el período de recurrencia de un evento (período de retorno). Por otro lado, la amenaza para períodos de retorno infinitos tiende a ser similar que la susceptibilidad. Por lo anterior, cuando no se cuenta con datos suficientes para estimar períodos de retorno, resultan útiles los mapas de susceptibilidad, que consideran solo las variables intrínsecas del material para la zonificación de peligros geológicos.

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).

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

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

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 amenaza 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 N° 8.1—1 muestra la relación entre el conocimiento y la estimación de la susceptibilidad, amenaza y riesgo.

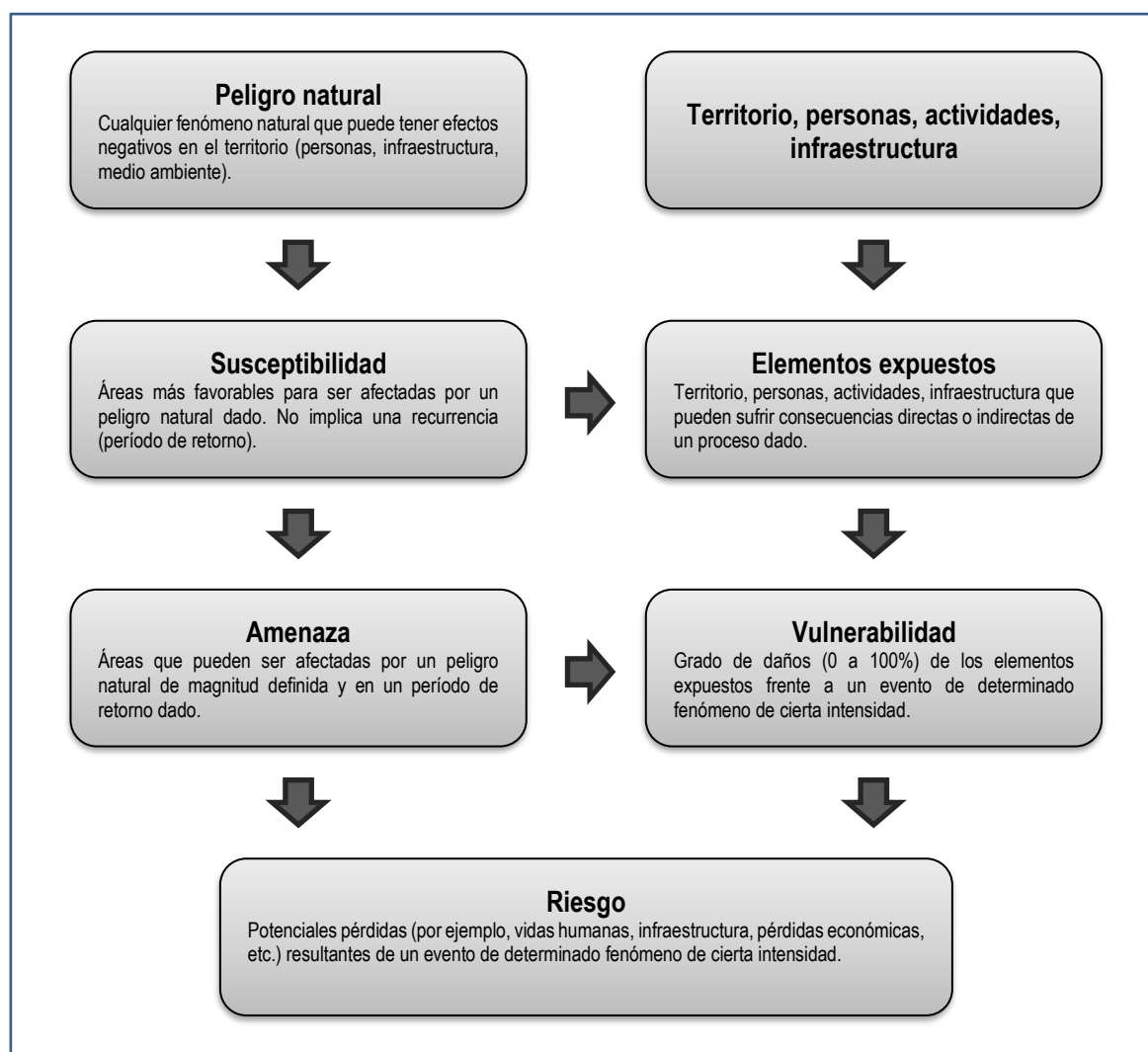
La definición de riesgo, o áreas de riesgo, utilizadas internacionalmente difieren a la nomenclatura propuesta por la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción en su artículo 2.1.17. En la OGUC, el concepto utilizado de riesgo corresponde a la definición de “Peligro Natural” definida internacionalmente.

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

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

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

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

Figura N° 8.1—1: Etapas de evaluación de un evento geológico peligroso.

Fuente: Elaboración propia basado en Varnes (1984).

8.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PELIGROS GEOLÓGICOS ANALIZADOS

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

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

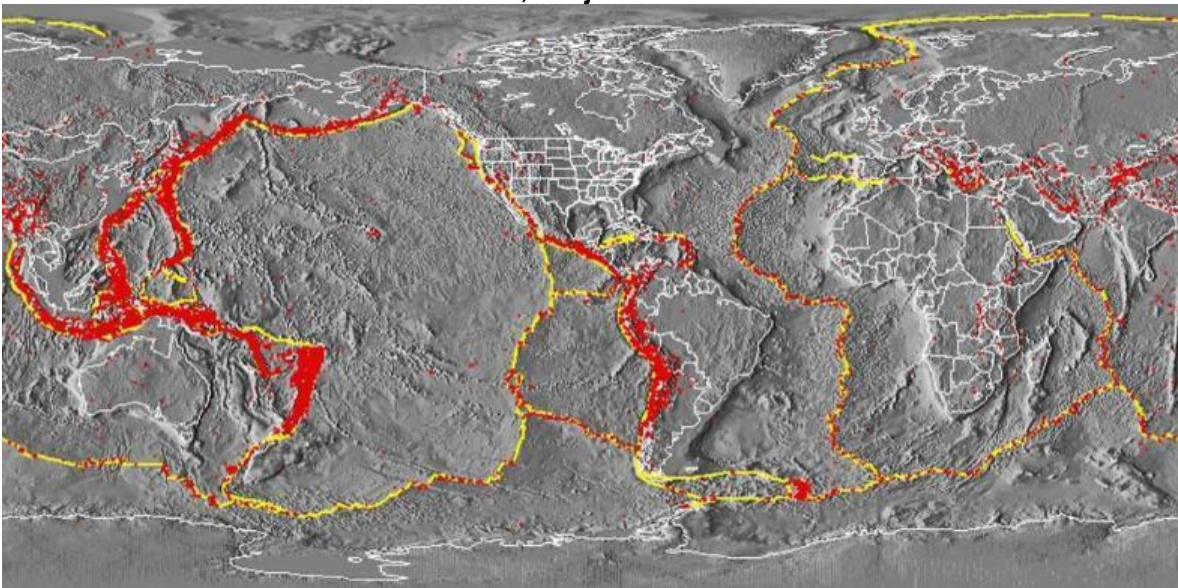
8.2.1 Procesos internos o endógenos de la Tierra

a) Sísmicidad

i) 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 sísmicidad debido a su convergencia con la placa de Nazca. En planta se aprecia una banda sísmica activa muy angosta (100-150 km) y de profundidad variable (~5-200 km) entre el cordón montañoso de los Andes y la fosa Perú-Chile. La Figura N° 8.2—1 ilustra la sísmicidad mundial que resalta los márgenes de las placas tectónicas y muestra, además, cómo Chile se encuentra en un ambiente de gran producción sísmica.

Figura N° 8.2—1: Sísmicidad mundial entre los años 1980 y 1990, se representan en puntos rojos los epicentros con magnitud mayor que 5. Nótese cómo la sísmicidad “ilumina” los límites de las placas tectónicas, dibujados en amarillo

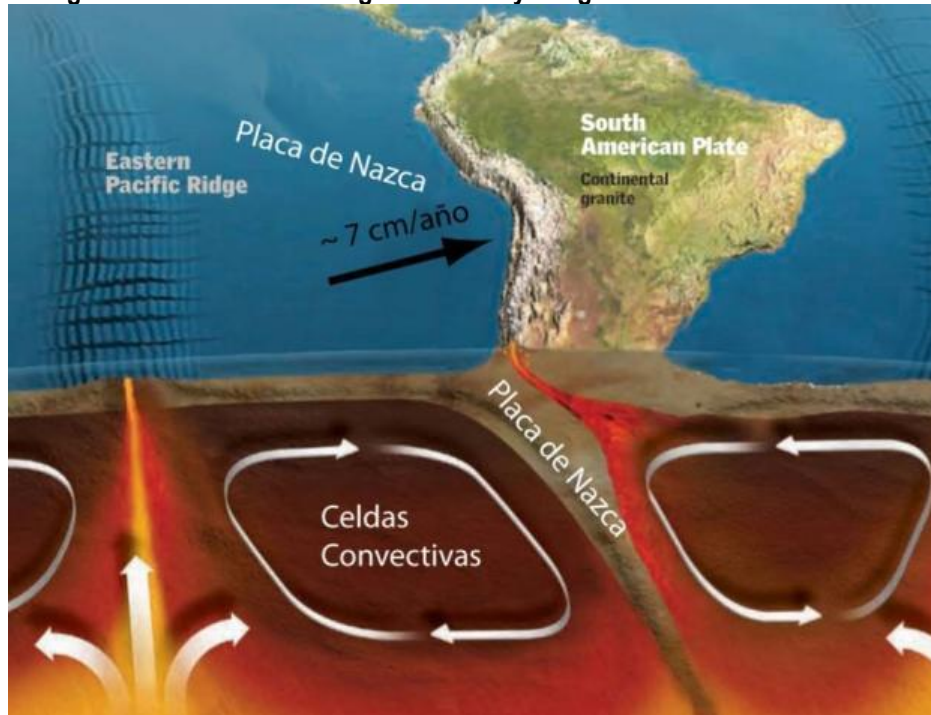


Fuente: Western Washington University(2011).

El margen de subducción donde se ubica Chile está caracterizado por una convergencia del orden de 8 cm/año (DeMets, Gordon, Argus, & Stein, Effects of recent revisions of the geomagnetic reversal time scale on estimates on current plate motion, 1994). Una serie de fuerzas actúan sobre la Placa de Nazca, como por ejemplo el flujo convectivo de material del manto, que “mueve” a la placa en dirección al este generando la convergencia, o el mismo peso de la placa oceánica que “tira hacia abajo” esta placa, favoreciendo la subducción (Figura N° 8.2—2). Debido a sus distintas composiciones, la placa oceánica que es comparativamente más densa (de composición basáltica) tiende a introducirse bajo la corteza continental

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

Figura N° 8.2—2: Contexto geodinámico y margen de subducción de Chile.



Fuente: Modificado de Enciclopedia Britannica (2008).

El sistema de subducción, además de acumular energía que se libera por sismos de interplaca, genera campos de esfuerzos en la placa continental, en la oceánica y en la zona de acople entre ambas. El método para descargar la energía acumulada es a través de diferentes tipos de sismos, ejemplificados en la Figura N° 8.2—3, que corresponde a:

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

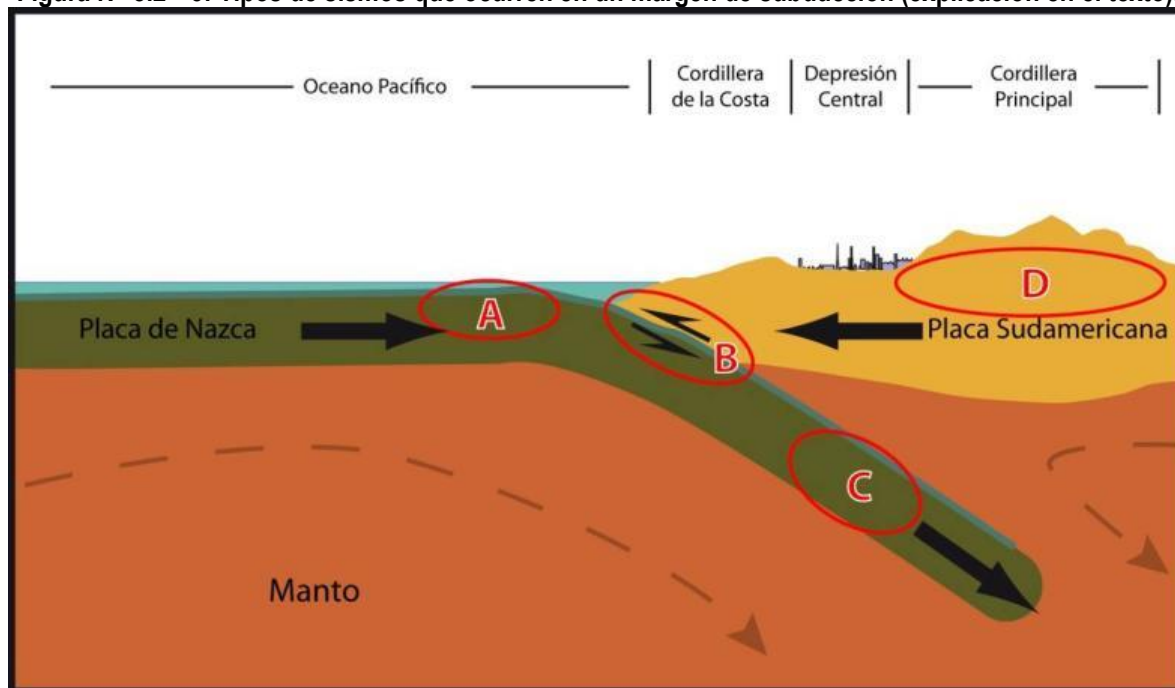
Zona B: Sismos asociados al contacto interplaca, como los ocurridos en Antofagasta 1995, Chile Central 1985, Mejillones 2005 y Constitución-Concepción en el 2010. Estos son producto de la liberación de energía acumulada por la convergencia de placas.

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

Zona D: Sismos superficiales intraplaca, como los sismos de Las Melosas en 1958, Aroma en 2001, Curicó en 2004 y Aysén, 2007. Son producto del esfuerzo intraplaca inducido por la subducción, que a la vez contribuye a la generación de relieve. En general, los sismos superficiales intraplaca se encuentran asociados a fallas

superficiales que pueden tener movimientos normales, inversos y de rumbo, que responden a campos de esfuerzos compresivos o extensivos.

Figura N° 8.2—3: Tipos de sismos que ocurren en un margen de subducción (explicación en el texto).



Fuente: Elaboración propia (2021)

ii) Mecanismos de daños asociados a los sismos

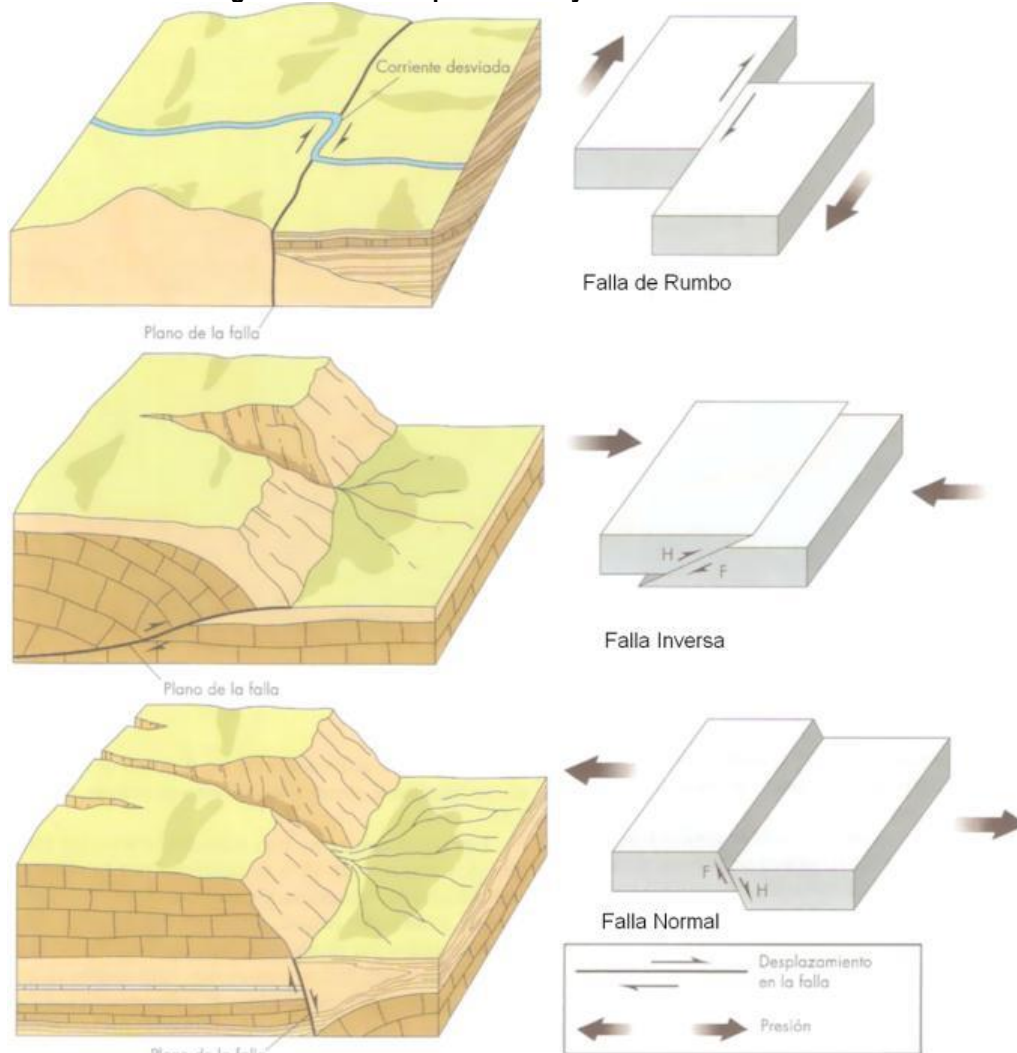
Independientemente de la ubicación particular de uno u otro sismo, todos ellos corresponden a un desplazamiento violento paralelo al plano de falla que libera la energía acumulada en la interfaz. La energía que se acumula producto de la convergencia de placas, tanto en el contacto interplaca como en 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 con su geometría, generará diferentes tipos de movimientos (Figura N° 8.2—4). A su vez, esta ruptura conlleva una liberación de energía que se propaga por medio de ondas sísmicas.

Las ondas que transmiten la energía sísmica se agrupan en dos tipos principales: ondas de cuerpo y ondas de superficie. Las primeras se dividen en ondas P (compresivas) y ondas S (ondas de corte o de cizalle), mientras que las segundas se dividen en ondas Rayleigh y Love (Figura N° 8.2—5). En las ondas P el movimiento de partículas se produce en forma paralela al de la propagación de la onda y en las ondas S es en dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Las ondas Rayleigh tienen un movimiento oscilatorio elíptico y las ondas Love tienen un movimiento oscilatorio horizontal. Con respecto a su impacto en superficie, debido a que las ondas S transportan la mayor cantidad de energía y a que las ondas superficiales tienden a tener movimientos de mayor frecuencia, ambos tipos corresponden a los de carácter más destructivo del movimiento sísmico. 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.

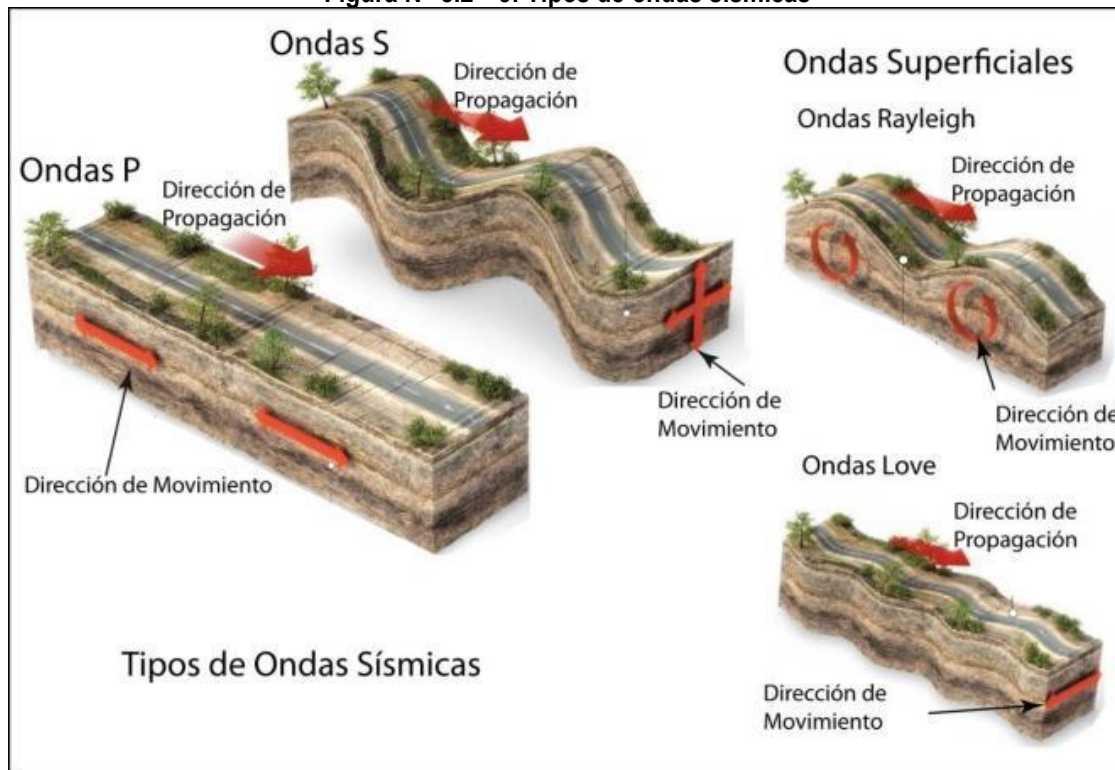
Para medir los sismos se utilizan, principalmente, dos escalas: *magnitud* e *intensidad*. La *magnitud* es una medida única y objetiva, que normalmente se relaciona con la escala de RICHTER (M_s). Actualmente para grandes sismos se utiliza la escala de magnitud de momento (M_w) que se calcula a partir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

Figura N° 8.2—4: Tipos de falla y esfuerzos asociados



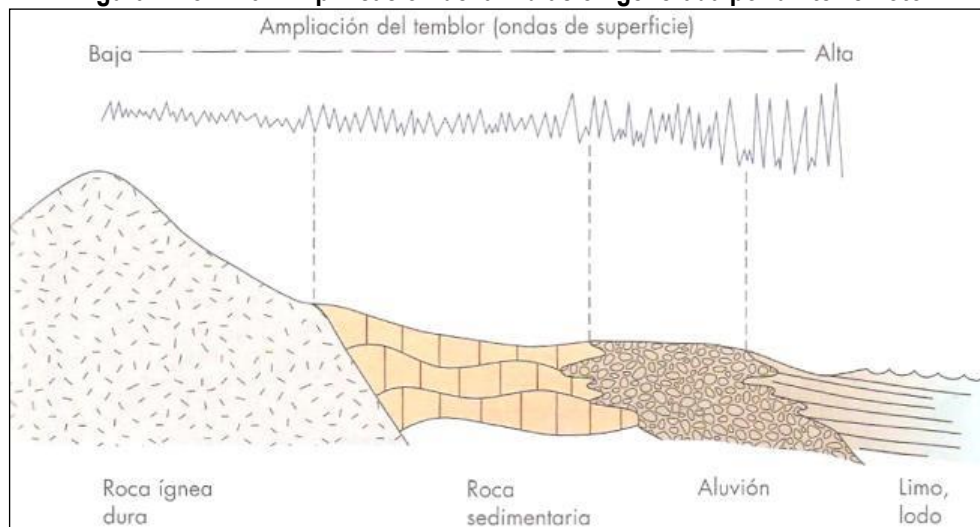
Fuente: Keller y Blodgett (2004).

Figura N° 8.2—5: Tipos de ondas sísmicas

Fuente: Modificado de Enciclopedia Britannica (2008).

Finalmente, debe destacarse el llamado “efecto sitio”, que indica un condicionamiento de carácter local bajo el cual para un mismo terremoto y dependiendo del tipo de terreno donde uno se encuentra ubicado, las ondas sísmicas pueden amplificarse durante el desarrollo del terremoto (Figura N° 8.2—6).

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

Figura N° 8.2—6: Amplificación de la vibración generada por un terremoto.

Fuente: Keller y Blodgett (2004).

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

Los deslizamientos y derrumbes se dan en diversos tipos de suelos y bajo variadas condiciones sismotectónicas, incluso se han detectado en sismos de grado $M_w = 4.0$. La cantidad y severidad de estos están en directa relación con la cercanía al epicentro y la magnitud del evento causante (Keefer, 1984; Sepúlveda, 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). Para más detalle acerca de estos procesos ver el Apéndice 8.2.2, letra b) "Procesos de remociones en masa".

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

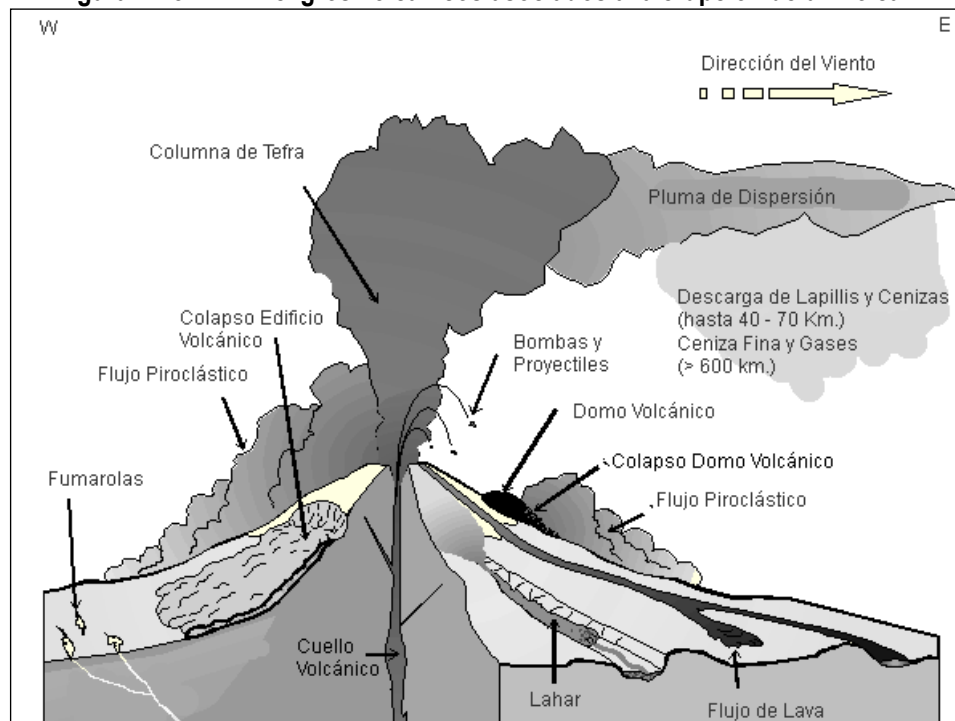
ser rellenos artificiales, especialmente aquellos creados por relleno hidráulico (ej. puertos y tranques de relaves), depósitos eólicos (dunas), depósitos de playas o de cursos de agua lo suficientemente jóvenes para estar sueltos. Los suelos con partículas de diferentes tamaños son menos propensos a 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.

b) 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 N° 8.2—7 y en el Cuadro N° 8.2-1.

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

Figura N° 8.2—7: 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:

11. Pérdida de tierras cultivables
12. Colapso de techos y obras civiles
13. Pérdidas de vidas humanas y forraje
14. 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 N° 8.2-1: Peligros asociados al volcanismo

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

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

8.2.2 Procesos externos o exógenos de la Tierra

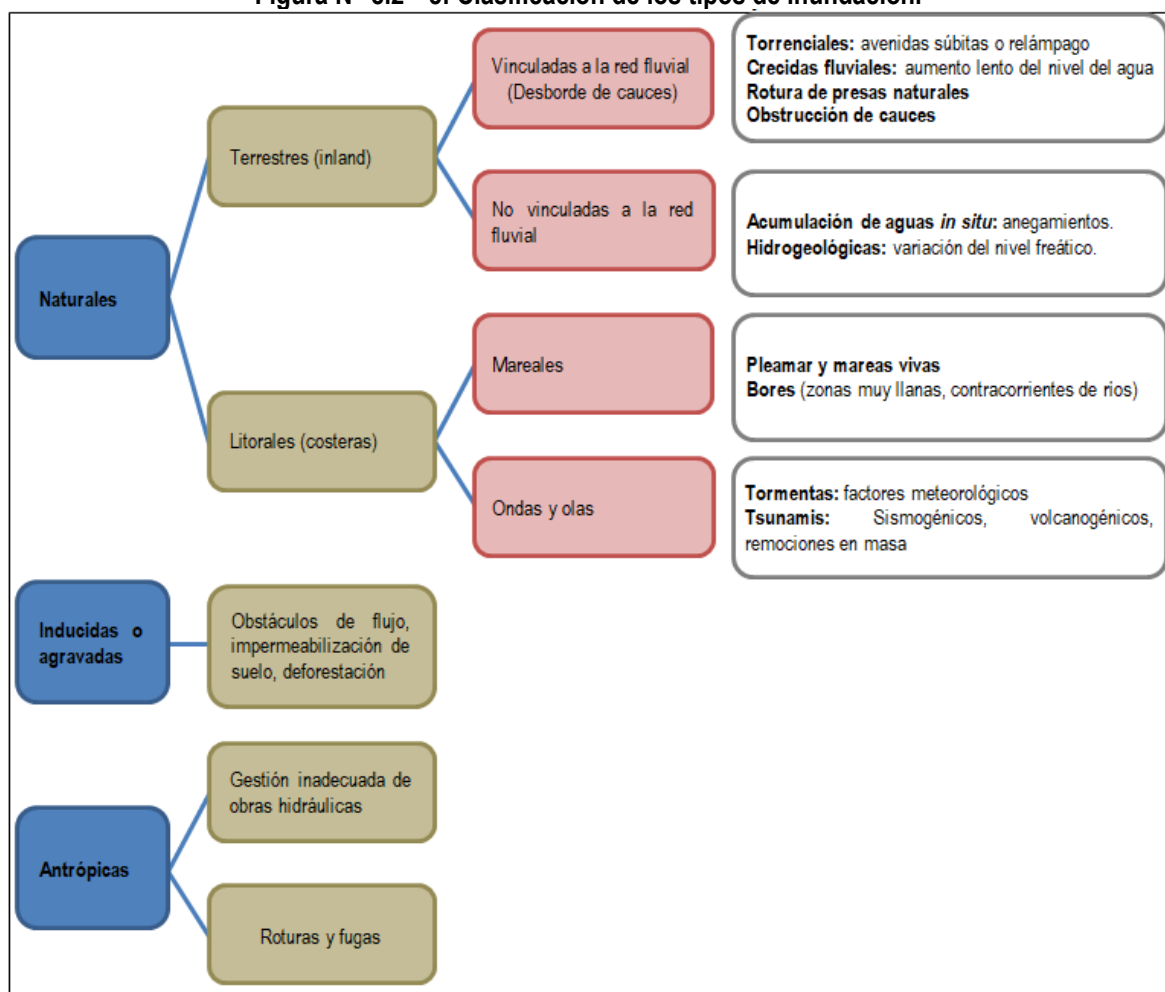
a) Inundaciones terrestres y litorales

Las inundaciones, sin considerar aquellas generadas por causas antrópicas, pueden ser de dos tipos (Figura N° 8.2—8): (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 N° 8.2—8: Clasificación de los tipos de inundación.



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

i) 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.

ii) Inundación por acumulación de aguas lluvia en zonas llanas o anegamiento

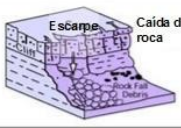
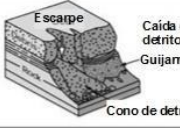
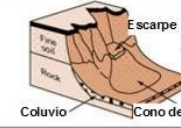


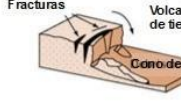

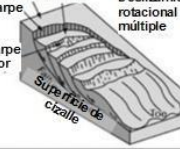
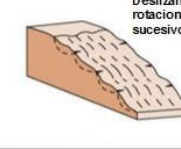


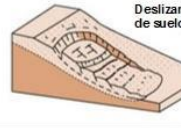
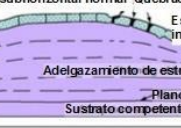
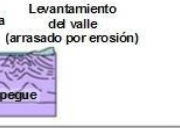
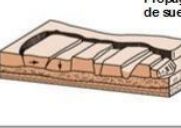

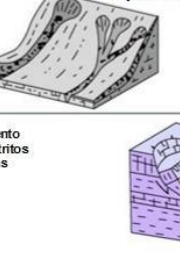

Este tipo de inundaciones se producen en zonas deprimidas, de baja permeabilidad, con niveles freáticos someros y deficiente drenaje del terreno, frecuentemente inundadas debido a lluvias intensas y/o prolongadas. Este tipo de inundaciones se asocia a la zona de desembocadura de algunas quebradas, las que son “embalsadas” por caminos y obstrucciones antrópicas. Estas barreras no permiten que el río escurra fácilmente hacia el mar, sino solo de forma subterránea, provocando el ascenso de los niveles freáticos y la formación de zonas pantanosas y humedales. 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.

b) 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 N° 8.2—9). El movimiento de estos materiales puede ser por caída, volcamiento, deslizamiento, propagación lateral o flujo (PMA-GCA, 2007).

Figura N° 8.2—9: 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
Tipo de movimiento			
CAIDA			
	Escarpe Caída de roca	Escarpe Caída de detritos Guijarros Cono de detrito	Escarpe Caída de suelo Coluvio Cono de detrito
VOLCAMIENTO			
	Volcamiento de roca	Volcamiento de detrito Cono de detrito	Fracturas Volcamiento de tierra Cono de detrito
DESPLAZAMIENTO			
	Deslizamiento rotacional simple (slump) Superficie de cizalla	Cima Escarpe Cabeza Escarpe menor Superficie de cizalla Deslizamiento rotacional múltiple	Deslizamientos rotacionales sucesivos
PROPAGACIÓN			
	Deslizamiento de roca	Deslizamiento de detrito	Deslizamiento de suelo
FLUJO			
	Solifluxión (Flujo de detritos periglacial)	Flujo de detritos	Flujo de suelo (flujo de barro)
COMPLEJO			
	p.ej.: Deslizamiento de suelo con detritos de caída de rocas	p.ej.: Deslizamiento rotacional/traslacional compuesto, gradando a flujo de suelo hacia el pie	p.ej.: Deslizamiento rotacional/traslacional compuesto, gradando a flujo de suelo hacia el pie

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

i) 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, 2002). Los flujos de detritos usualmente son descritos como fluidos no-newtonianos o plásticos de Bingham, donde la fracción sólida varía generalmente entre 50 a 90% en volumen (Costa, 1984). En los casos en que la granulometría del material transportado sea predominantemente fina estos flujos se conocen como flujos de barro.

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

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

En Chile, el factor desencadenante más común de flujos de detritos son las lluvias esporádicas, de corta duración y de intensidad excepcional. Por otro lado, en nuestro país existen muy pocos estudios que relacionen las intensidades de precipitaciones y este tipo de fenómenos, debido, principalmente, a los escasos registros de intensidad de precipitaciones y de flujos de detritos históricos. Solo durante las últimas décadas se han instalados 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.

ii) Desprendimientos o caídas 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.

iii) Deslizamientos

Los deslizamientos son remociones en masa en las cuales las masas de suelo o roca se deslizan principalmente a lo largo de superficies de ruptura, al superarse la resistencia al corte, generando el movimiento del material

en su conjunto (Hauser, 2000). Los volúmenes incluidos en estas remociones varían desde algunas decenas hasta varios millones de metros cúbicos y pueden adquirir magnitud catastrófica.

Estos fenómenos pueden ocurrir de varias formas dependiendo de las propiedades del material y las características geológicas y geomorfológicas del entorno, siendo principalmente divididos en rotacionales y traslacionales (Figura N° 8.2—10). Esto implica que las superficies de ruptura son ya sea curvas y cóncavas o a lo largo de un plano o superficie ondulada, respectivamente.

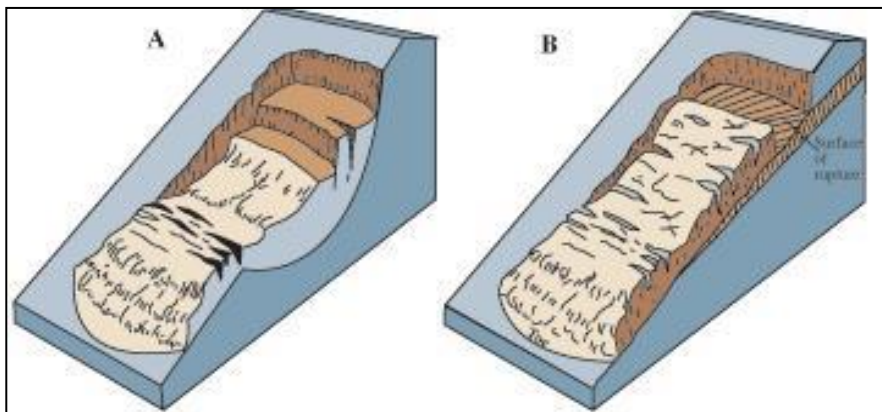
Adicionalmente, los deslizamientos que ocurren en escarpes de terrazas fluviales producto de la erosión fluvial, o el retroceso de acantilados costeros por erosión marina basal, se les denomina como “Retroceso de laderas”, que corresponde a la retirada del escarpe en dirección aguas arriba, sin que este 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.

Figura N° 8.2—10: 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>

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.

8.3 LÍNEA DE BASE DE GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

8.3.1 Metodología

Las líneas de base de geología y geomorfología forman parte de la caracterización del territorio y, por lo tanto, un insumo fundamental para el análisis de los peligros.

a) Geología

La caracterización de la geología considera la identificación y caracterización de los diversos materiales geológicos que componen el territorio estudiado, junto a las estructuras que los caracterizan. Estos materiales, que en forma inicial se clasifican en rocas y depósitos no consolidados pueden también estar cubiertos por una capa de espesor variable de suelo, que corresponde al resultado de la degradación de estos.

Se identificaron las unidades de roca consolidada y los depósitos sedimentarios presentes en la zona analizada, según la información disponible en los antecedentes bibliográficos:

- Wall et al., 1999. Hoja Tiltill-Santiago, Región Metropolitana. Escala 1:100.000. SERNAGEOMIN.
- SERNAGEOMIN, 2003. Mapa geológico de Chile. Versión Digital. Publicación digital N°4. Escala 1:1.000.000.
- Aguirre, 1960. Geología de los Andes de Chile central. IIG.

Como se observa, los antecedentes utilizados se encuentran a escalas 1:100.000 o superior, por lo que el mapa debe ajustarse a una escala adecuada para el instrumento de planificación territorial. Este ajuste se realizó utilizando otras tres fuentes de información: (1) topografía de resolución adecuada para el estudio, que permite ajustar los contactos entre las diferentes unidades reconocidas en la cartografía existente, (2) imágenes satelitales de catálogos públicos (Google Earth), que entrega información relevante para el ajuste de la topografía y ayuda a identificar cuerpos de unidades litológicas que no se pudieron reconocer en la topografía de mayor escala, y (3) información recopilada durante visitas a terreno, que permite confirmar los ajustes anteriores y observar otros aspectos que se hubieran omitido, ya sea por escala o por falta de otros antecedentes.

Complementariamente, se caracterizaron las rocas según tipos litológicos y los depósitos no consolidados según el proceso que los generó. Las unidades de roca se diferenciaron por litología y edad, según la información disponible en los antecedentes recopilados. Las unidades de depósitos no consolidados se diferenciaron y caracterizaron según litología, edad y procesos que les dan origen, diferenciando depósitos fluviales, aluviales, glaciares, coluviales o lacustres.

Por otra parte, se revisó la información de las estructuras geológicas reconocidas (identificación de fallas activas, potencialmente activas e inactivas, pliegues y zonas dañadas por fallas), aunque no se identificó ninguna.

El producto es un mapa geológico del territorio a planificar y de aquellas zonas que estuvieran fuera de este territorio pero que pudieran ser relevantes para el desarrollo de los peligros geológicos en el área estudiada.

La caracterización geológica resulta relevante para el estudio de peligros geológicos, ya que las características de las unidades de roca (litología, grado de meteorización, fracturamiento, etc.) influyen en la ocurrencia de remociones en masa, una de las amenazas a estudiar dentro del estudio de riesgos. Por otro lado, a partir de la caracterización de las unidades de roca y depósitos no consolidados es posible identificar unidades asociadas

a peligros geológicos, como, por ejemplo, depósitos producto de procesos de remoción en masa e inundaciones, depósitos aluviales activos e inactivos, depósitos fluviales activos e inactivos, depósitos coluviales, y las zonas de generación de coluvio, y depósitos volcánicos recientes.

b) Geomorfología

La caracterización de la geomorfología considera el análisis de parámetros morfométricos y la morfología descriptiva.

La morfometría consiste en la descripción y evaluación cuantitativa de las características de la superficie del territorio, como elevaciones, pendiente, aspecto, curvaturas, red de drenaje, densidad de drenaje, entre otros. Estas características pueden tener injerencia en la generación de amenazas o aumentan la susceptibilidad del área estudiada a generar o ser afectada por ciertos procesos.

Para el análisis morfométrico se construyó un modelo digital de elevaciones (DEM por sus siglas en inglés), que se utilizó para calcular los restantes parámetros. A partir de estos parámetros, se construyeron mapas, que se presentan como figuras en el informe.

La morfología descriptiva pretende identificar, delimitar y caracterizar las formas y elementos presentes en el territorio, que pueden ser el resultado de diferentes procesos geológicos, y que se traducen en erosión, transporte y depositación de materiales. Esto puede ser indicativo de las áreas que presentan condiciones para ser afectadas por la ocurrencia de procesos exógenos que pueden generar amenazas.

Los elementos morfológicos presentes en el área estudiada se delimitaron utilizando varios antecedentes, como el DEM del área de estudio, la geología, imágenes satelitales y observaciones realizadas durante la visita a terreno. Como resultado, se reconocieron formas como escarpes, terrazas fluviales, abanicos aluviales, cuencas de drenaje, entre otras.

8.3.2 Marco geodinámico

Chile se ubica en un margen convergente activo de placas oceánica-continental (Figura N° 8.3—1), en 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 inclusive podría persistir desde el Pérmico (Coloma, y otros, 2017). 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 loza oceánica se defleca 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.

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). 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 Chizmisa 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° 8.3—1: Marco geodinámico representado en 3D



Nota: 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.

Fuente: Elaboración propia (2021)

8.3.3 Marco geomorfológico

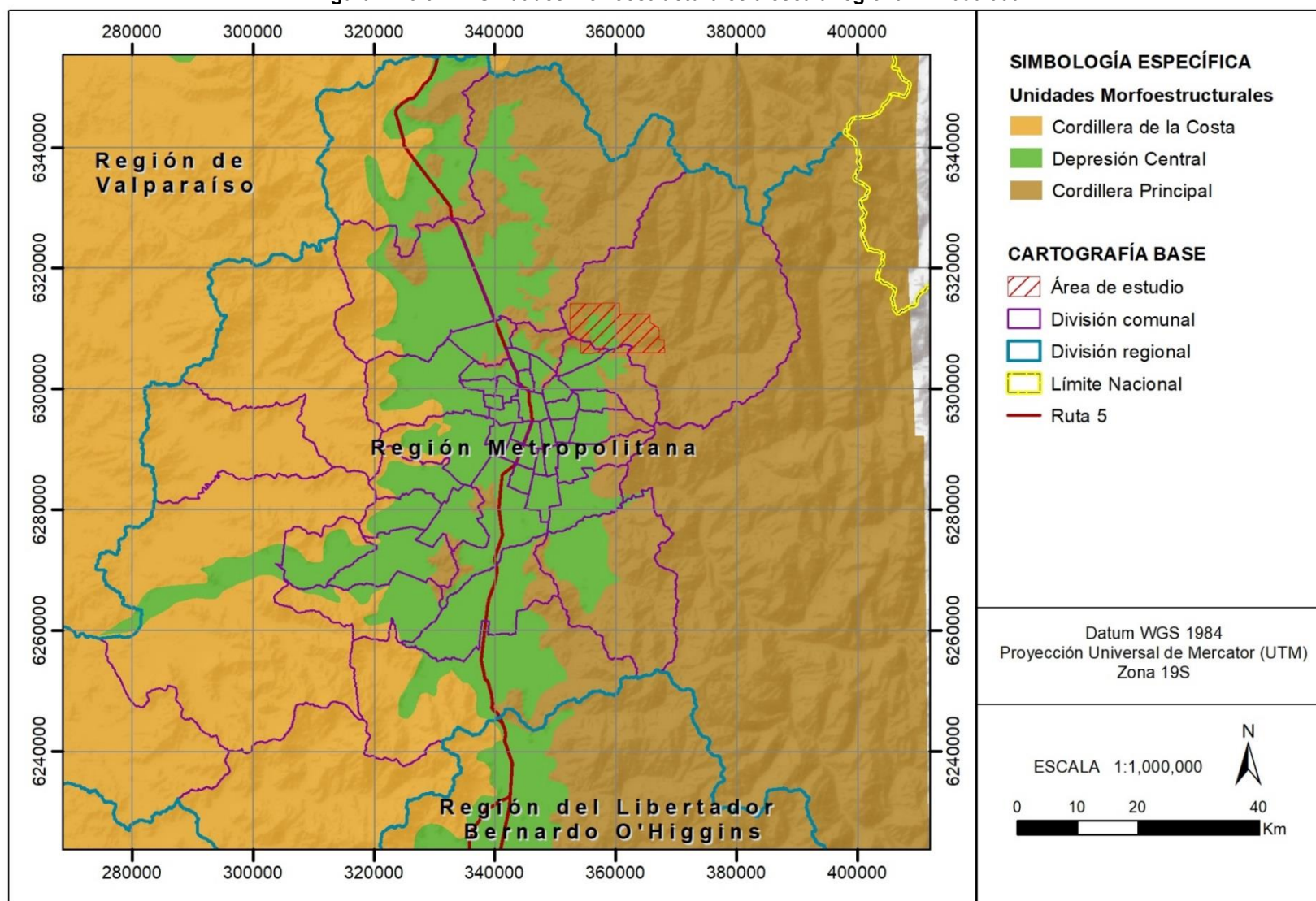
a) Unidades morfoestructurales

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 Lo Barnechea se ubica en la zona precordillerana de la Región Metropolitana, que corresponde a la transición entre la Depresión Central y la Cordillera Principal (Figura N° 8.3—2).

En el área de estudio, la Depresión Central se presenta como una franja alargada en dirección norte-sur, la cual corresponde a una extensa llanura levemente inclinada hacia oeste, la cual se ve afectada ocasionalmente interrumpida por zonas donde se une la Cordillera de la Costa con la Cordillera Principal (angostura) y por

algunos cerros islas, cuyas alturas no superan los 250 m con respecto a la Depresión Central (Ej. Cerro del Medio).

Figura N° 8.3—2: Unidades Morfoestructurales a escala regional 1:1.000.000



Fuente: Elaboración propia (2021)

b) Aspectos morfológicos relevantes

El área de estudio se ubica en la transición del valle de Santiago y la zona cordillera, por lo que las principales geoformas a escala local tienen directa relación con las unidades geológicas más recientes.

Las terrazas de origen fluvial generadas por la erosión del cauce del Mapocho destacan entre el relieve montañoso, lo mismo ocurre con las terrazas generadas por el Estero Arrayan. Se identificaron cuatro niveles de terrazas fluviales numerados con respecto al nivel base del río Mapocho que se ubican a distintas alturas, la terraza 1 (T1) presenta alturas entre 3 y 8 m sobre el cauce del estero Las Hualtatas y del río Mapocho. Por su parte, la terraza 2 (T2) posee alturas entre 9 y 18 m, la terraza 3 (T3) tiene alturas entre 19 y 23 m y la terraza 4 (T4) presenta alturas entre 18 y 26 m sobre el cauce del estero El Arrayán y del río Mapocho.

Además, se distinguen depósitos aluviales asociados al río Mapocho, cuya morfología en el área de estudio corresponde al ápice del abanico, el cual se extiende en la cuenca de Santiago. Abanicos aluviales menores se disponen sobre este gran depósito.

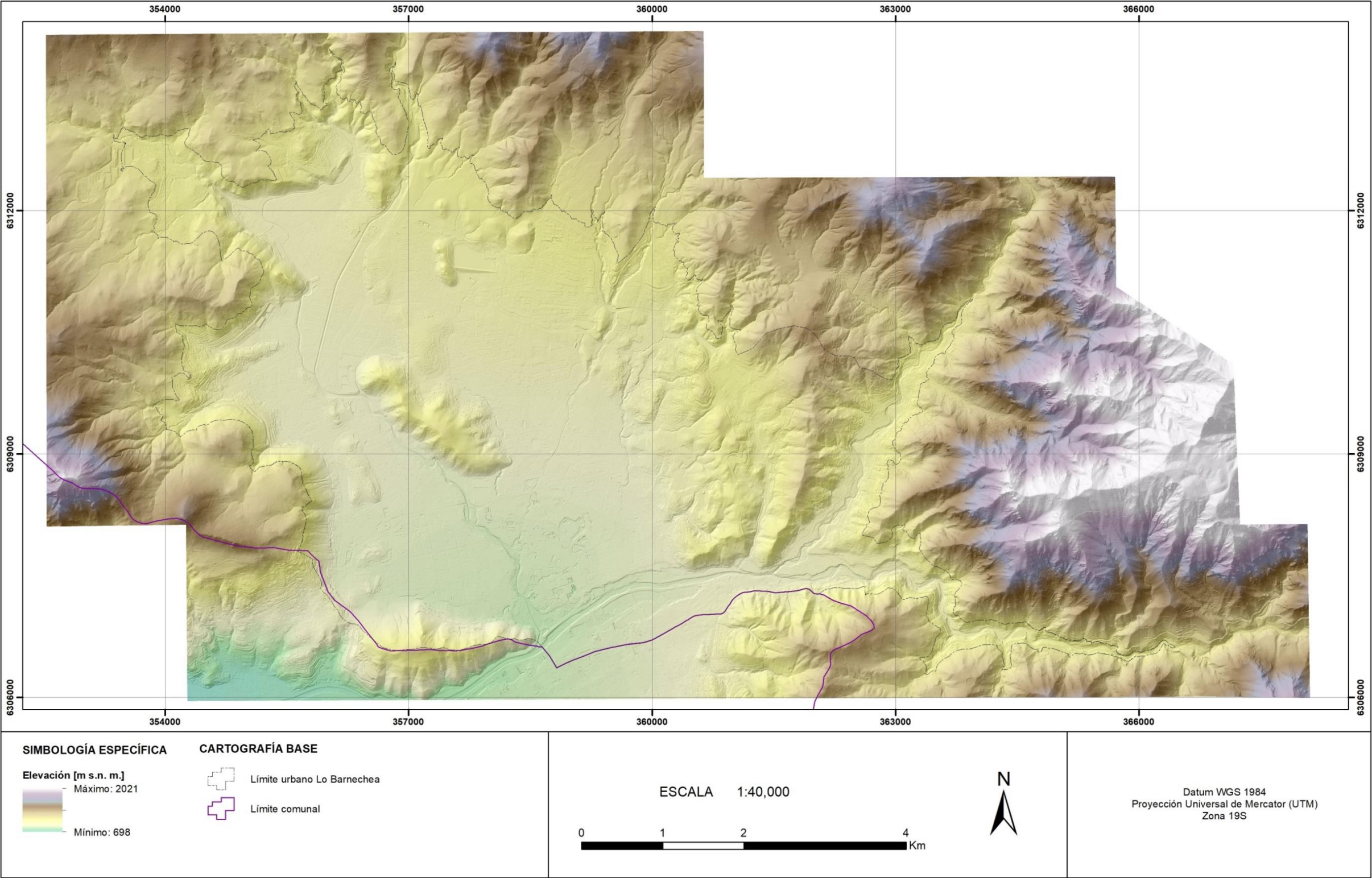
Las remociones en masa destacan en esta zona, las cuales han sido catastradas en la literatura. Su naturaleza corresponde generalmente a avalanchas de roca de gran magnitud, las cuales desplazan grandes cantidades de material. Las morfologías son lobulares y alargadas y sus zonas de generación se ubican fuera del área de estudio, sin embargo, debido a su tamaño alcanzan el área estudiada en algunos sectores.

c) Parámetros Morfométricos

En el área de estudio las elevaciones varían entre los 698 y los 2021 m s. n. m. (Figura N° 8.3—3), las mayores alturas se ubican hacia el área cordillerana y en el sector del cerro Manquehue. Por otro lado, las partes más bajas se ubican en el sector sur-poniente del área de estudio.

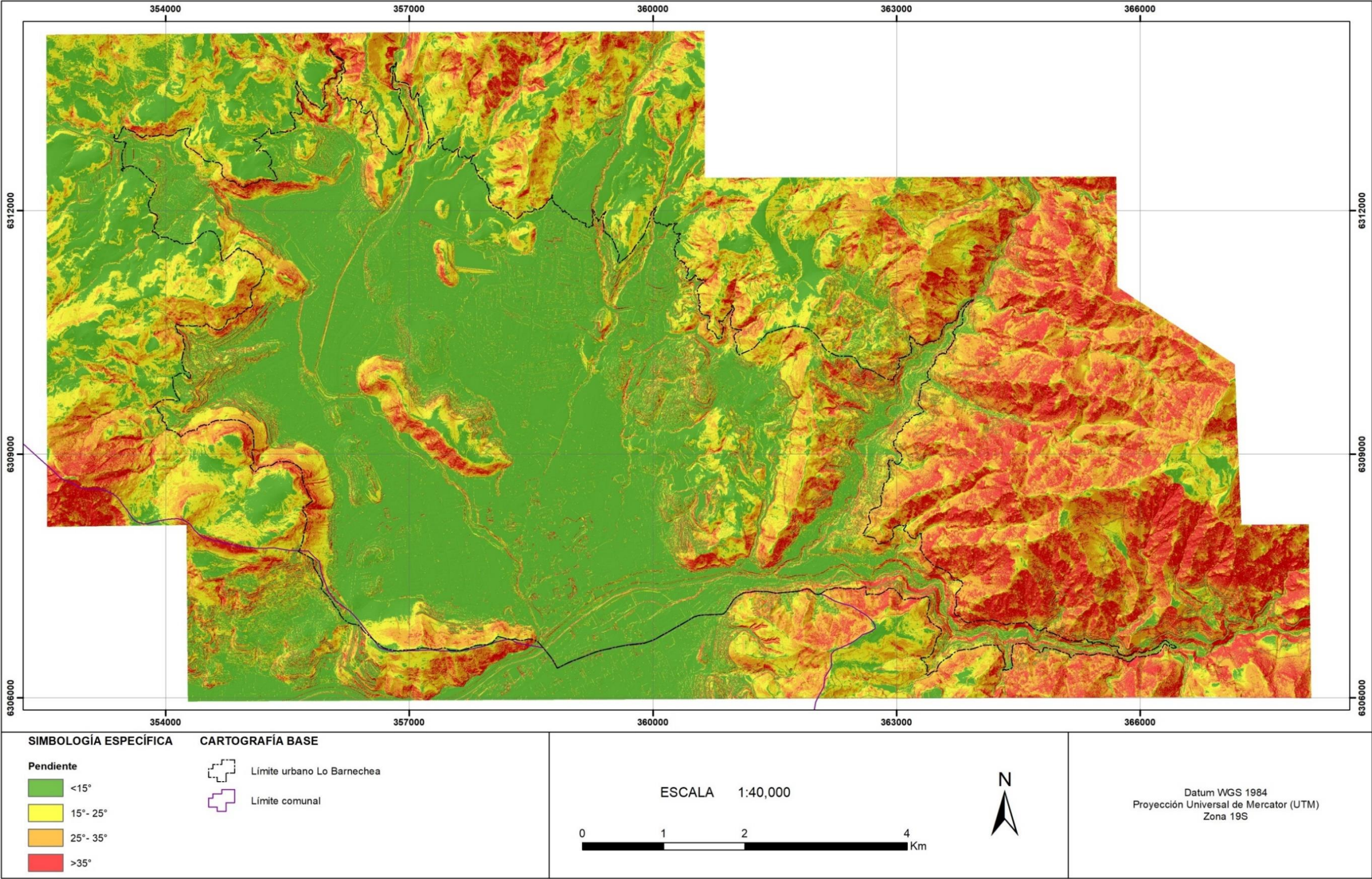
En cuanto a las pendientes, el sector de la dehesa y donde se concentra la mayor parte de la urbanización se emplaza sobre pendientes menores a 15°, estos sectores topográficamente más bajos se conforman geológicamente por depósitos aluviales, fluviales y fluvio-aluviales distales (Figura N° 8.3—4). Con respecto a aquellas pendientes mayores a 15° se encuentran en las laderas de los cerros, como en el cerro del Medio, cerro Alvarado y hacia el sector montañoso entorno del Estero El Arrayan, del río Mapocho y las laderas aledañas a sus quebradas afluentes. Geológicamente estas zonas de altas pendientes se encuentran caracterizadas por la Formación Abanico, donde las máximas pendientes superan los 80°.

Figura N° 8.3—3: Carta morfométrica de elevaciones del área de estudio a escala 1:40.000



Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.3—4: Carta morfométrica de pendientes del área de estudio a escala 1:40.000.



Fuente: Elaboración propia (2021)

8.3.4 Marco geológico

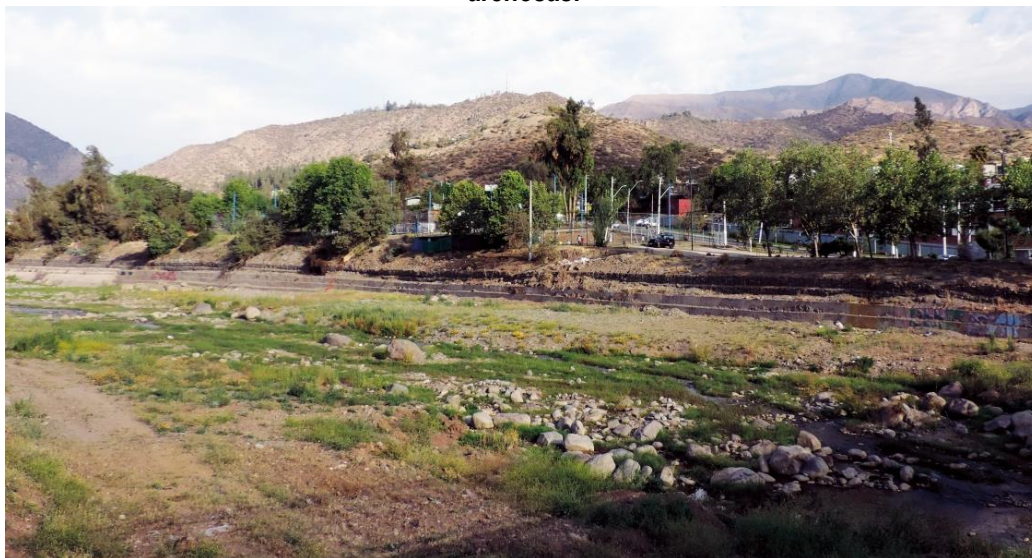
La geología de la comuna de Lo Barnechea está constituida esencialmente por rocas volcánicas con algunas intercalaciones sedimentarias de edad Eoceno-Mioceno, las que presentan diversos grados de meteorización. Estas rocas se encuentran cubiertas por distintos tipos de depósitos no consolidados, los que son producto de procesos fluviales, aluviales, coluviales y de remoción en masa. Cada una de estas unidades geológicas se describe a continuación. El mapa geológico levantado a escala 1:1.000 se representa en la Figura N° 8.3—9 a una escala de 1:40,000.

a) Depósitos no consolidados

i) Depósitos fluviales activos de ríos y esteros (Holoceno) (Hf)

Sedimentos genéticamente relacionados con los cursos fluviales activos del río Mapocho, el estero Arrayán y, la parte distal del estero Las Hualtatas. Están constituidos por ripios, gravas, gravas arenosas clastosoportadas, con clastos redondeados y en parte imbricados (Figura N° 8.3—5).

Figura N° 8.3—5: Vista de los depósitos fluviales activos del río Mapocho. Se distingue la diversidad granulométrica de los clastos redondeados que involucran desde bolones métricos a gravas arenosas.



Fuente: Elaboración propia (2021)

ii) Depósitos fluvio-aluviales activos de quebradas y esteros (Holoceno) (Hfa)

Corresponden al conjunto de bloques, gravas y arenas que se encuentran relleno los cauces de quebradas y esteros actuales en sus partes proximales y medias. Estos depósitos se encuentran al fondo de los canales confinados propios de regiones montañosas, como cuando estos se proyectan sobre las fracciones apicales y medias de los abanicos aluviales (Figura N° 8.3—6). Frecuentemente, en las quebradas es posible observar bloques de tamaños métricos yaciendo en el cauce.

Figura N° 8.3—6: Vista de los cauces de las quebradas Los Chanchos (izquierda) y la quebrada Huallalolén. Se reconocen abundantes bloques en los cauces, así como en las zonas ribereñas.



Fuente: Elaboración propia (2021)

iii) Depósitos lacustres activos y cuerpos de agua (Holoceno) (Hl)

Corresponden a los sedimentos que se depositan en el fondo de los cuerpos de agua (naturales y artificiales) compuestos principalmente por limos y arcillas.

iv) Depósitos fluvio-aluviales de quebradas y esteros (PIHfa)

Sedimentos constituidos por bloques, gravas, arenas y limos que se encuentran ocasionalmente en torno a los cauces activos de quebradas y esteros, en algunos casos formando niveles aterrizados en sus márgenes o abanicos aluviales pequeños en las regiones de desconfinamiento de los cauces. Estos depósitos se asocian a grandes flujos de barro y detritos que sobrepasaron el cauce activo de las quebradas y esteros.

v) Depósitos fluviales aterrizados (PIHf Tn)

Sedimentos compuestos por ripios, gravas, gravas arenosas, arenas y limos, que se distribuyen en torno de los principales cauces fluviales formando un total de cuatro terrazas principales. Como ya fue mencionado, la terraza 1 (T1, Figura N° 8.3—7) presenta alturas entre 3 y 8 m sobre el cauce del estero Las Hualtatas y del río Mapocho. Por su parte, la terraza 2 (T2) posee alturas entre 9 y 18 m, la terraza 3 (T3) tiene alturas entre 19 y 23 m y la terraza 4 (T4) presenta alturas entre 18 y 26 m sobre el cauce del estero El Arrayán y del río Mapocho.

Figura N° 8.3—7: Vista en corte de los depósitos fluviales aterrizados T1 en la ribera del estero Las Hualtatas.



Notas: Es posible distinguir diferentes paquetes de sedimentos que gradan de base a techo desde arenas gravosas a ripios de bolones

Fuente: Elaboración propia (2021)

vi) Depósitos antiguos de remociones en masa (Pleistoceno-Holoceno) (Wall, Sellés, & Gana, 1999) (PIHrm)

Depósitos originados por flujos de detritos, flujos de barro, deslizamientos, avalanchas de roca, desprendimiento de bloques, reptación y hundimiento. En el área de estudio se exponen en diversos sectores, destacando los depósitos en el área del portezuelo Lo Curro, en el extremo suroccidental de la comuna, o sobre la ladera norte del valle del río Mapocho camino a Farellones (Figura N° 8.3—8). Estos sedimentos incorporan bloques de hasta 10 m de diámetro, que forman parte de sendos depósitos de colapso gravitacional originados desde los cerros Manquehue y Loma de Vaca, respectivamente.

Figura N° 8.3—8: Vista en corte de los depósitos antiguos de remociones en masa en el kilómetro 10 del Camino a Farellones



Nota: Es posible distinguir bloques métricos polimícticos embebidos en un arreglo caótico de rocas fragmentadas y angulosas de granulometrías diversas.

Fuente: Elaboración propia (2021)

vii) Depósitos aluviales (Pleistoceno Medio-Pleistoceno Superior) (Wall, Sellés, & Gana, 1999) (PIHa)

Unidad conformada por extensos abanicos aluviales coalescentes, de baja pendiente ($<5^\circ$) y en declive hacia el sur-suroeste, que nacen cuando los drenajes de las principales hoyas hidrográficas abandonan las regiones montañosas confinadas aguas arriba. Sus depósitos están formados por gravas y arenas, con sedimentos finos en menos proporción. Aprovechándose de la vasta extensión de terreno llano que configura esta unidad, sobre ella se desarrolla gran parte de la urbanización de la comuna.

b) Unidades de Roca

i) Rocas Intrusivas del Cerro Manquehue (Mioceno)

Corresponden a stocks andesíticos y dacíticos que intruyen a la Formación Abanico y que forman parte de un conjunto de intrusivos hipabisales que Wall et al. (1999) dataron en 20-19 Ma. Son rocas leucocráticas, porfídicas, con fenocristales de plagioclasa, hornblenda y en menos proporción piroxeno, parcial o totalmente

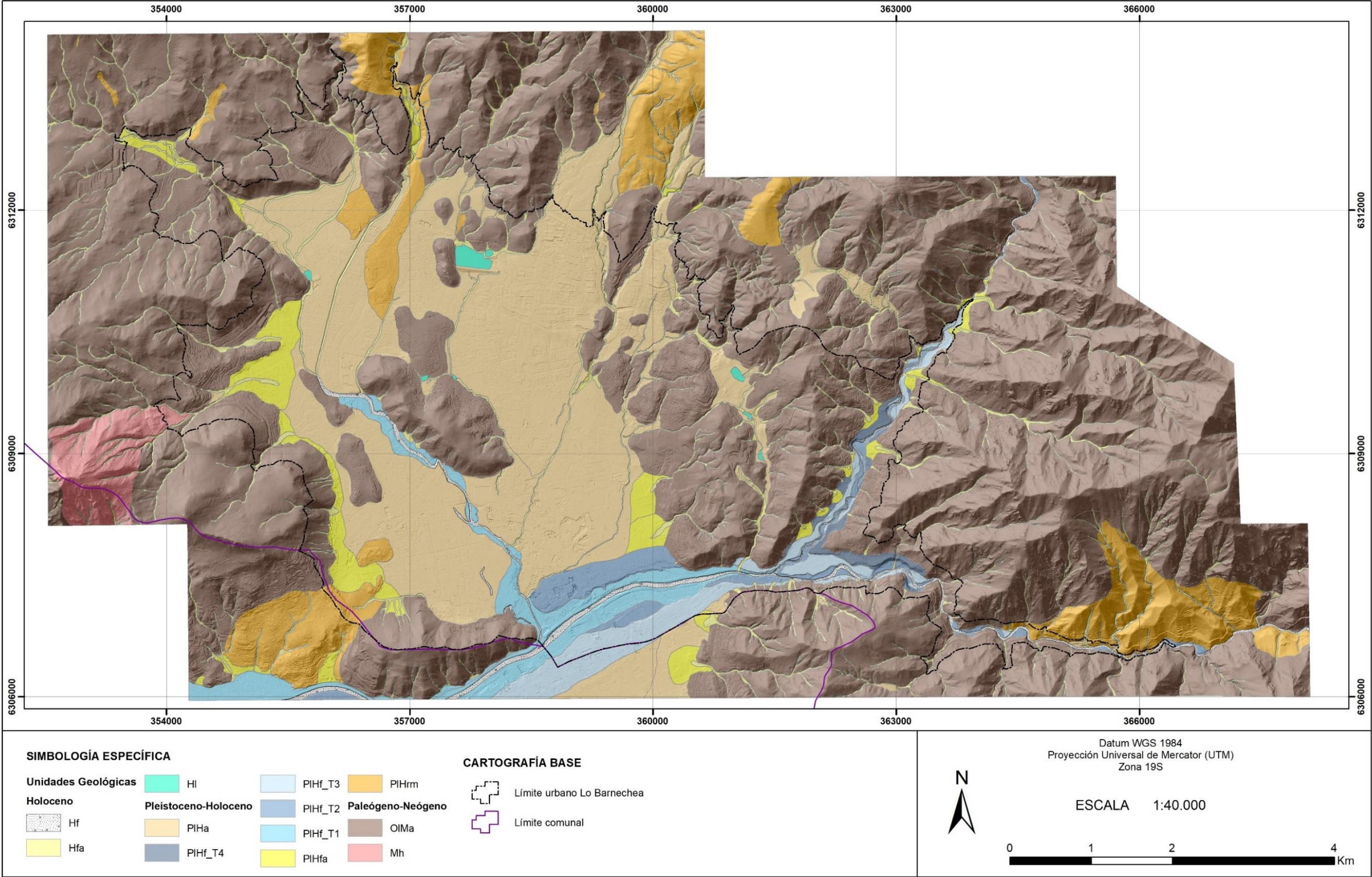
transformado en anfíbola, los que se encuentran inmersos en una masa fundamental compuesta por plagioclasa, cuarzo y escasa magnetita. Los stocks del cerro Manquehue presentan enclaves máficos microgranulares de anfíbola y plagioclasa (Wall, Sellés, & Gana, 1999).

ii) Formación Abanico (Eoceno Superior-Mioceno Inferior) (Aquirre, 1960)

Secuencia principalmente volcánica andesítica a basáltica, con intercalaciones piroclásticas y sedimentarias continentales, con espesor expuesto de ~2000 m. Aflora en todos los sectores montañosos del área urbana de la comuna, incluyendo a los cerros islas, como por ejemplo al cerro del Medio. Su techo no está expuesto y está intruida por stocks y diques datados entre 34 y 19 Ma. Dataciones radiométricas efectuadas en la región Metropolitana se ubican entre 28-20 Ma. Wall et al. (1999) reconocen dos niveles estratigráficos dentro de la Formación Abanico. En el nivel superior predominan rocas piroclásticas y volcanoclásticas, mientras que, en el nivel inferior, que es el que aflora en el área urbana, predominan las rocas volcánicas de composición andesíticas a basálticas, con algunas intercalaciones de rocas piroclásticas (tobas brechosas, tobas soldadas) y sedimentarias continentales (limolitas y areniscas tobáceas; conglomerados fluviales y tobas de depositación subacuática, portadoras de restos vegetales).

En el área urbana de la comuna de Lo Barnechea, las rocas de la Formación Abanico presentan abundantes diaclasas y en gran parte de los afloramientos se observa un alto grado de meteorización (IV a VI de acuerdo con la clasificación sugerida por la International Society for Rock Mechanics (ISRM, 1981)), lo que genera laderas inestables con una gran cantidad de suelo residual.

Figura N° 8.3—9: Mapa de unidades geológicas del área de estudio representado a escala 1:40,000.



Fuente: Elaboración propia (2021)

8.3.5 Línea Base de Hidrología

a) Clima

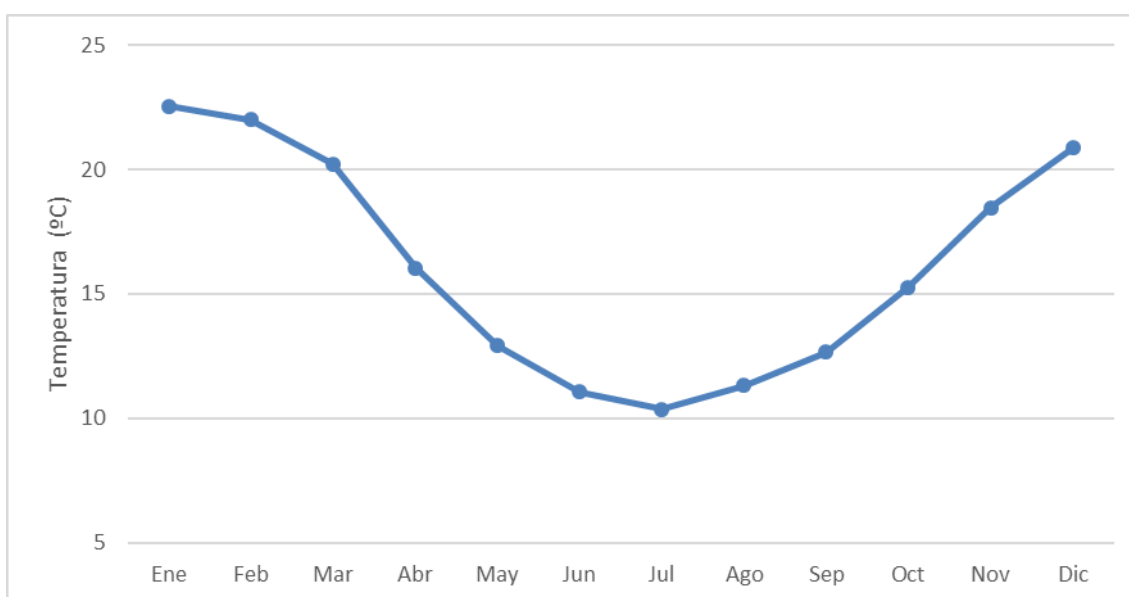
El área de estudio presenta un clima mediterráneo, con precipitaciones moderadas que se concentran en invierno, y con una estación seca prolongada de 7 a 8 meses. La temperatura media anual oscila en torno a los 16°C, con valores medios mensuales cercanos a los 10°C en invierno y 23°C en verano, según se presenta en el Cuadro N° 8.3-1 y en la Figura N° 8.3—10, en la estación meteorológica de la DGA Cerro Calán, cercana al área de estudio (ver Figura N° 8.3—12).

Cuadro N° 8.3-1: Temperaturas medias mensuales (°C), estación Cerro Calán

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
22,5	22,0	20,2	16,0	12,9	11,1	10,4	11,3	12,7	15,3	18,5	20,9	16,0

Fuente: Elaboración propia en base a Información hidrometeorológica BNA-DGA

Figura N° 8.3—10: Variación temperatura media mensual, estación Cerro Calán



Fuente: Elaboración propia en base a Información hidrometeorológica BNA-DGA

b) Revisión de antecedentes

Se revisaron antecedentes que aportan información relacionada con la determinación de eventos máximos, presentándose a continuación los resultados más relevantes.

i) Plan Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS). MINVU, 1994, y sus actualizaciones.

El PRMS define como áreas de alto riesgo a los territorios en los cuales el emplazamiento de asentamientos humanos se debe restringir en forma parcial o total, en consideración a las características que presentan. En esta tipología se establecen dos categorías con sus correspondientes subcategorías:

1.- De Riesgo de Origen Natural

- a. Áreas de Alto Riesgo Natural por Inundación.
- b. Lugares críticos de concentración de Aguas.
- c. Cauces Artificiales.
- d. Suelos de Mal Drenaje.

2.- De Riesgo por Actividades Peligrosas

Para este estudio es de importancia la categoría 1.a que a su vez presenta una subcategoría de Áreas de Alto Riesgo Natural por Inundación de Cauces Naturales, que comprenden el cauce y fajas adyacentes. Donde se permite sólo las instalaciones mínimas complementarias a las actividades al aire libre, por lo cual se prohíbe expresamente todo tipo de edificaciones y construcciones que impliquen la presencia prolongada de personas o la concentración de ellas sin posibilidad de evacuación expedita y/o que interfieran el libre curso de las aguas.

Los proyectos de urbanización, edificación y/o destinados al acondicionamiento y explotación de los terrenos emplazados en estas áreas, cualquiera sea su finalidad, deberán ser aprobados además por el Ministerio de Obras Públicas, en forma previa a su ejecución o iniciación. Los propietarios de terrenos afectados por estas normas, podrán desarrollar estudios y proyectos específicos, debidamente aprobados por el Ministerio de Obras Públicas, en los cuales se determinen en detalle los límites del área inundable que afecte a su predio, como asimismo, las obras que deben realizarse para protegerlo. Si como consecuencia de estudios específicos, resultaran anchos de restricción menores que los establecidos en los cuadros siguientes, se deberá respetar en cada caso el ancho mínimo de área verde fijado para los "Parques Quebradas".

A continuación, se presenta la tabla que define las fajas de restricción para las quebradas de la comuna de Lo Barnechea. Estas franjas de restricción adyacentes a cada borde del cauce están referidas al plano, por lo tanto, en pendiente, el distanciamiento mínimo corresponderá a la faja resultante de la proyección de estos.

Cuadro N° 8.3-2: Franjas de restricción para las quebradas de la comuna de lo Barnechea (PRMS)

Nombre Quebrada	Código	Tramo Normado	Ancho Min. Fa ja Restr. a c/ borde
Agua de Aranda	N-1	Desde Límite Extensión Urbana hasta Río Mapocho	40m
El Ají	N-2	Desde Límite Extensión Urbana hasta Río Mapocho	40m
Las Zorras	N-3	Desde su nacimiento hasta el Canal de La Dehesa	40m
El Gabino o Del Garín	N-4	Desde Límite Extensión Urbana hasta Estero Las Hualtatas	40m
Los Loros y brazo secundario	N-5	Desde cota 2.300 1.800 m.s.n.m., respectivamente, hasta confluencia quebrada El Manzano.	40m
El Manzano	N-5	Desde intersección quebrada Los Loros, hasta estero Las Hualtatas	40m
El Quisco	N-6	Desde cota 1.100 m.s.n.m., hasta estero Las Hualtatas	40m
El Maqui y brazos secundarios 1,2 y 3	N-7	Desde cota 1.900, 1.800 y 1.700 m.s.n.m., respectivamente, hasta confluencia estero Las Hualtatas	40m
Esteros Las Hualtatas	N-7	Desde intersección quebrada El Maqui, hasta el Río Mapocho	40m
El Carrizo	N-8	Desde Límite Extensión Urbana hasta Estero Las Hualtatas	40m
Los Chanchos	N-9	Desde Límite Extensión Urbana hasta Estero Las Hualtatas	40m
Los Carboneros	N-10	Desde Límite Extensión Urbana hasta Estero Las Hualtatas	40m
El Guindo	N-11	Desde Límite Extensión Urbana hasta Estero Las Hualtatas	40m
El Padre	N-12	Desde Límite Extensión Urbana hasta El Canal Conchalí	40m
El Abuelo	N-13	Desde Límite Extensión Urbana hasta Canal Metropolitano Desde canal Metropolitano hasta Canal Conchalí	40m 25m
Agua del Palo	N-14	Desde Límite Extensión Urbana hasta Canal Metropolitano Desde canal Metropolitano hasta canal Conchalí	40m 25m
La Ermita-La Totorá	N-15	Desde Límite Extensión Urbana hasta Límite Urbano	40m
Del Cerro Gordo	N-16	Desde Límite Extensión Urbana hasta Límite Urbano	40m
Los Pozos	N-17	Desde Límite Extensión Urbana hasta Límite Urbano	40m
El Sauce	N-18	Desde Límite Extensión Urbana hasta Camino de Cintura	40m
La Mina-Los Maitenes	N-19	Desde Límite Extensión Urbana hasta Camino de cintura	40m
El Mal Paso	N-20	Desde Límite Extensión Urbana hasta camino de Cintura	40m

Fuente: Plan Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS). MINVU, 1994, y sus actualizaciones.

ii) Estudio de Riesgo y Protección Ambiental Plan Regulador Comunal de Lo Barnechea. Municipalidad de Lo Barnechea, elaborado por Infracon Consultores, 2014.

Estudio Fundado de Riesgos en los cauces de 31 quebradas no reguladas por el Plan Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS). Los resultados corresponden a la identificación y zonificación de las áreas urbanas susceptibles a ser afectadas por un peligro natural de acuerdo con los criterios y definiciones expuestos en el artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC).

Debido a que las subcuencas en estudio no cuentan con registros fluviométricos, la estimación de los caudales máximos puntuales se realizó mediante modelos de precipitación-escorrentía, considerando las recomendaciones de la DGA para la estimación de caudales máximos en cuencas sin información fluviométrica (DGA-MOP, 1995), los criterios de diseño del Manual de Carreteras (MOP, 2018) y la Guía de Diseño de Técnica Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos (MINVU, 1996). Los resultados consisten en mapas de inundación para crecidas de 100 años de período de retorno. En el Cuadro N° 8.3-3, se presentan los parámetros geomorfológicos para las cuencas del estudio.

Los valores de la precipitación diaria de diez años de periodo de retorno para cada una de las subcuencas fueron obtenidos a partir del mapa de isoyetas del Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias para el Gran Santiago.

Cuadro N° 8.3-3: Parámetros morfométricos de las cuencas

Quebrada	A (km²)	Lc (km)	Sm (%)	Hmín(m)	Hm (m)	Hmáx (m)
Afluente Oscura I	0,104	0,421	38,76	902,2	988,3	1070,0
Afluente Oscura II	0,130	0,584	39,85	905,7	1006,1	1082,5
Afluente Oscura III	0,148	0,750	39,38	909,0	1015,3	1140,0
Chorro de la Vieja	0,379	1,172	33,90	826,0	1067,1	1240,0
Del Ñinhue	1,978	2,390	56,58	971,7	1494,8	1950,0
El Parrón	3,599	3,838	57,01	935,9	1411,1	1859,5
Huallalolén	2,980	3,611	65,11	951,9	1489,3	1950,0
La Carbonera I	2,095	3,093	38,18	935,6	1255,4	1630,0
La Laguna	0,425	1,375	22,68	859,7	922,2	1020,0
Las Lechuzas	2,539	3,987	26,67	926,0	1153,3	1550,0
Quebrada Grande/Las Nipas	0,546	1,414	23,98	844,6	929,3	1022,0
Las Varas	3,522	3,937	44,41	917,0	1206,9	1630,0
Los Clarines	0,606	1,986	29,02	887,1	1087,3	1290,0
Los Pitufos (Nido de Águilas)	0,389	1,221	22,74	853,4	925,0	1020,0
Los Quillayes	2,408	3,197	41,39	965,4	1172,9	1440,0
Oscura	4,377	6,061	28,05	915,9	1320,3	1700,0
Q2	0,458	1,636	26,89	925,7	1024,7	1190,0
Q3	0,188	0,883	29,24	924,0	987,7	1114,5
Q7	0,418	1,130	38,91	969,9	1093,2	1222,0
Q9	0,168	0,633	47,02	910,9	1022,9	1126,5
Q10	0,267	1,250	47,56	922,2	1055,1	1168,0
Q11	0,305	0,889	47,70	935,9	1085,1	1204,2
Q12	0,495	1,323	61,91	990,0	1343,8	1702,3
Q13	0,500	1,610	61,87	909,9	1184,0	1540,0
Q14	0,483	0,941	69,72	901,0	1259,3	1618,3
Q15	0,726	1,379	66,49	947,9	1364,6	1719,1
Q16	0,945	1,760	56,78	974,0	1364,8	1708,0
Q17	0,202	0,657	65,46	970,4	1246,1	1469,3
Q18	0,143	0,500	62,58	976,8	1160,7	1365,0
Q19	0,443	0,837	55,92	867,9	1061,8	1220,0
Q21	0,397	1,362	29,92	883,2	1047,0	1170,0

Fuente: Elaboración propia (2021)

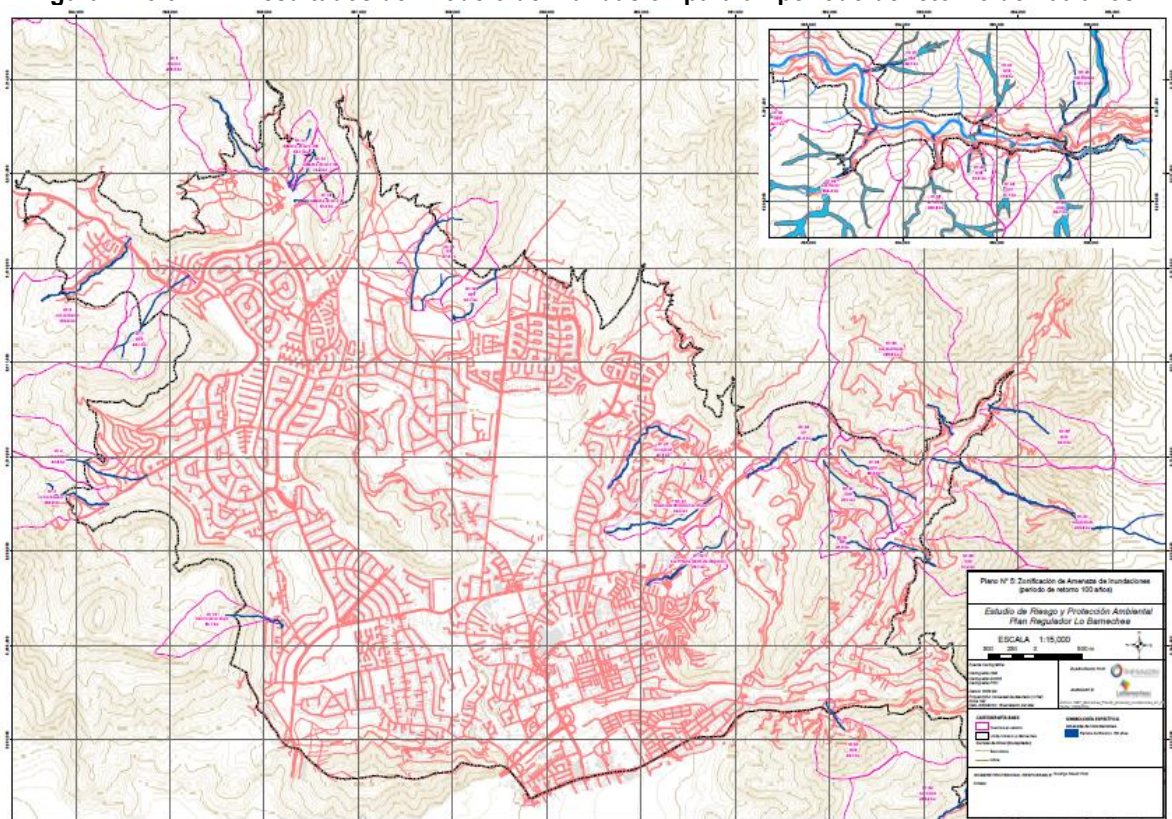
En el Cuadro N° 8.3-4, se presentan los resultados de caudales máximos instantáneos de 100 años de periodo de retorno. Estos caudales fueron estimados con el método racional el cual entregó los caudales más conservadores para todas las cuencas.

Cuadro N° 8.3-4: Caudal instantáneo de 100 años de periodo de retorno estimadas por el Método Racional.

Quebrada	Ap (km²)	PDT (mm)	i (mm/hr)	C	Qi (m³/s)
Afluente Oscura I	0,10	16,63	16,63	0,36	0,17
Afluente Oscura II	0,13	16,63	16,63	0,38	0,23
Afluente Oscura III	0,15	16,63	16,63	0,37	0,26
Chorro de la Vieja	0,38	16,63	16,63	0,35	0,62
Del Ñinhue	1,98	20,33	20,33	0,35	3,91
El Parrón	3,60	19,40	19,40	0,35	6,79
Huallalolén	2,98	20,10	20,10	0,35	5,84
La Carbonera I	2,09	16,63	16,63	0,35	3,42
La Laguna	0,42	17,79	17,79	0,55	1,15
Las Lechuzas	2,54	16,63	16,63	0,36	4,24
Quebrada Grande/Las Nipas	0,55	17,79	17,79	0,48	1,30
Las Varas	3,52	18,94	18,94	0,35	6,52
Los Clarines	0,61	16,63	16,63	0,39	1,10
Los Pitufos (Nido de águilas)	0,39	17,79	17,79	0,41	0,79
Los Quillayes	2,41	19,17	19,17	0,38	4,90
Oscura	4,38	16,63	16,63	0,35	7,08
Q2	0,46	17,09	17,09	0,35	0,77
Q3	0,19	17,09	17,09	0,35	0,31
Q7	0,42	18,25	18,25	0,38	0,80
Q9	0,17	18,48	18,48	0,37	0,32
Q10	0,27	18,71	18,71	0,40	0,55
Q11	0,30	18,71	18,71	0,42	0,66
Q12	0,50	20,10	20,10	0,35	0,97
Q13	0,50	19,17	19,17	0,35	0,94
Q14	0,48	19,40	19,40	0,35	0,91
Q15	0,73	19,87	19,87	0,35	1,40
Q16	0,95	20,10	20,10	0,35	1,85
Q17	0,20	19,87	19,87	0,35	0,39
Q18	0,14	19,64	19,64	0,35	0,27
Q19	0,44	18,25	18,25	0,36	0,82
Q21	0,40	16,63	16,63	0,35	0,65

Fuente: Elaboración propia (2021)

Finalmente, en base a los caudales máximos instantáneos para un periodo de retorno de 100 años se realiza la modelación hidráulica de las quebradas mediante el software HEC RAS entregando los resultados que se presentan en la Figura N° 8.3—11.

Figura N° 8.3—11: Resultados del modelo de inundación para un periodo de retorno de 100 años.

Fuente: Estudio de Riesgo y Protección Ambiental Plan Regulador Comunal de Lo Barnechea. Municipalidad de Lo Barnechea, elaborado por Infracon Consultores, 2014.

iii) Plan Maestro de Aguas Lluvias del Gran Santiago (PM-01). Dirección de Obras Hidráulicas, MOP, elaborado por CADE-IDEPE, 2001.

En el capítulo IV.5 de este informe, se realiza el catastro y capacidad hidráulica de los cauces naturales en zonas urbanas donde las cuencas aportantes de escorrentía a sectores urbanos se han clasificado en nueve grandes grupos. Los grupos que contienen a las zonas estudiadas corresponden a:

- El segundo grupo (Grupo II): Corresponde a la cuenca del río Mapocho antes de ingresar al área urbana, destacándose dentro de la hoya los ríos San Francisco y Molina, de la unión de los cuales nace el río Mapocho, y el estero Arrayán afluente a este último en su sector de ingreso al área urbana.
- El tercer grupo (Grupo III): Comprende todas las quebradas que rodean la zona urbana de la comuna de Lo Barnechea por el oriente, norte y poniente, extendiéndose como un gran anfiteatro, al sur del cual se encuentra el río Mapocho, el cual es el receptor final de las aguas. Estas quebradas han sido canalizadas en diversos tramos al cruzar el área urbana.

En ambos casos se analizaron los grandes cauces naturales que atraviesan el área urbana y aquellas quebradas que ingresan al área urbana con un cauce definido. Para las demás quebradas se consideró que concluyen al llegar a las urbanizaciones y actúan como aportantes de escorrentía hacia éstas.

Para el grupo II de la cuenca del río Mapocho, se realizó el análisis de la capacidad hidráulica del río Mapocho basado principalmente en el “Estudio de Antecedentes para la Proposición de Deslindes en el Río Mapocho. Sector Puente San Enrique - Américo Vespucio Poniente”, realizado por Luis Arrau del Canto para el

Departamento de Obras Fluviales de Vialidad, del Ministerio de Obras Públicas en 1996. El objetivo básico de dicho estudio fue proporcionar antecedentes para la fijación de deslindes del río Mapocho. Para esto, se efectuó un estudio del eje hidráulico a lo largo de un tramo de 32 km, comprendido entre los puentes San Enrique y Américo Vespucio Poniente.

En el Cuadro N° 8.3-5 se presentan los caudales de crecida adoptados en el río Mapocho, y en el

Cuadro N° 8.3-6, la capacidad hidráulica de los puentes.

Cuadro N° 8.3-5: Caudales de crecidas río Mapocho

Tramo	Kilómetro		Período de Retorno T (años)						
	Final	Inicial	2	5	10	25	50	100	200
8	32.315	29.516	250	470	640	850	1.000	1.100	1.300
7	29.516	25.073	310	530	700	920	1.080	1.250	1.420
6	25.073	19.982	310	530	700	920	1.080	1.250	1.420

Fuente: Elaboración propia (2021)

Cuadro N° 8.3-6: Capacidad hidráulica de los puentes del río Mapocho

Kilometraje	Puente	T (años)	Q (m³/s)
32,051	San Enrique	> 200	> 1.300
30,805	Pasarela Quinchamalí	> 200	> 1.300
29,411	Tubería en Puente Nuevo	> 200	> 1.300
29,366	Nuevo La Dehesa	> 200	> 1.300
24,388	Lo Curro	> 200	> 1.420
21,274	Centenario	> 200	> 1.420

Fuente: Elaboración propia (2021)

Las conclusiones del estudio para el río Mapocho son que el río entre el Puente San Enrique y A. Vespucio, está en condiciones de conducir caudales de períodos de retorno altos, entre 100 y 200 años, excepto en la zona poniente, la cual presenta situación de desbordes para períodos de retorno menores, con problemas en algunos puentes. En la zona canalizada y en la zona oriente, se observan problemas sólo para algunos puentes y desbordes puntuales para las crecidas indicadas.

Para el grupo III de las quebradas que rodean la zona urbana de la comuna de Lo Barnechea, la información recopilada permitió determinar la capacidad de los cauces para evacuar crecidas de distintos periodos de retorno, sobre la base del análisis de tramos y sectores críticos y los antecedentes de los respectivos estudios hidrológicos.

En el Cuadro N° 8.3-7 se presentan los caudales de crecida considerando una línea de nieve a 2000 msnm para las cuencas del grupo III y sus afluentes. En el

Cuadro N° 8.3-8 se presenta el estudio de la capacidad de los cauces en base a las singularidades que presento cada quebrada.

Cuadro N° 8.3-7: Caudales de crecida (m³/s)

Cuenca	Periodo de Retorno (años)		
	2	10	100
Q. El Ají	0,91	1,45	2,66
Q. El Gabino	2,08	4,20	7,99
Q. Las Rosas	3,72	7,48	13,94
Q. El Manzano	1,06	2,21	4,24
Q. El Culén	1,50	3,10	4,17
Q. Las Hualtatas	16,74	30,39	55,68
Q. El Carrizo Bajo	9,80	18,02	32,98
Q. Oscura	13,87	25,83	48,37
Q. La Carbonera	2,75	5,25	9,62
Q. Los Chanchos	1,27	2,04	3,75
El Guindo	2,75	5,22	9,54
E. Arrayán	60,84	102,20	173,11

Fuente: Elaboración propia (2021)

Cuadro N° 8.3-8: Capacidad de los cauces del Grupo II

Quebrada	Capacidad
Q. El Ají	Entubada en algunos cruces con capacidad $Q = 2,5 \text{ m}^3/\text{s}$.
Q. El Gabino	Entubada en algunos tramos lo que reduce su capacidad a $Q < 1 \text{ m}^3/\text{s}$.
Q. Las Rosas	Amplia capacidad de porteo, incluso para $Tr = 100$ años ($Q = 14 \text{ m}^3/\text{s}$).
Q. El Manzano	Capacidad suficiente para $Tr = 100$ años ($Q = 4,6 \text{ m}^3/\text{s}$)
Q. El Culén	Capacidad amplia inclusive para $Tr = 100$ años ($4,2 \text{ m}^3/\text{s}$)
Q. Las Hualtatas	Capacidad suficiente para $Tr = 100$ años
Q. El Carrizo Bajo	Se encuentra canalizado con capacidad para $Tr > 100$ años.
El Guindo	Capacidad suficiente para $Tr > 100$ años
E. Arrayán	Canalización del sector camino El Cajón tiene una capacidad $Q = 69,1 \text{ m}^3/\text{s}$ insuficiente para $Tr = 5$ años.

Fuente: Elaboración propia (2021)

iv) “Diagnóstico y Proposición Plan Maestro de Manejo de Cauces Naturales, Cuenca del Río Mapocho Hasta Estero Las Hualtatas, Región Metropolitana” (DOH, EIC Ingenieros Consultores; 2004).

Este estudio incorpora una caracterización y modelación hidráulica para la definición de zonas de inundación de un conjunto de cuencas en la comuna de Lo Barnechea. Se incluye a continuación lo resumido con respecto a los principales problemas identificados en cada una de ellas:

- Río Mapocho

El tipo de escurrimiento en crecidas presenta velocidades muy altas a todo lo largo del tramo analizado, con un claro régimen de torrente, aun cuando en algunos sectores singulares se generan pequeños tramos en crisis o río cercano a la crisis. Esta situación es clásica en ríos precordilleranos, donde el flujo escurre entre bloques de gran tamaño, produciéndose situaciones de gran pérdida de carga, al punto que el flujo puede llegar a resaltar en forma puntual.

Los problemas de desborde se generan prácticamente sólo en el tramo definido como “a) Cajón Cordillerano” ubicado entre los kms 7+500 y 2+650. Todos los problemas detectados corresponden a sectores de menor pendiente lateral, planicies ribereñas y brazos secundarios, todos ubicados en zonas en que el cajón tiene un mayor ancho. Estos sectores de riesgo, dependiendo de su uso, significan problemas de mayor o menos gravedad.

- Estero Arrayán

El estero corresponde a un típico cauce precordillerano confinado por ambos costados. Así, los sectores críticos siempre se presentan en tramos donde las pendientes laterales de los cerros se suavizan, dando pie a un acercamiento de la actividad urbana.

El cálculo del eje hidráulico permite también corroborar que el tipo de escurrimiento que se desarrolla en este estero es de torrente, aunque con intermitencia de sectores en crisis o con régimen de río, producidas por la presencia de bloques que generan pérdidas de carga importantes. Aun así, las velocidades de escurrimiento aguas arriba del km 2,0 son en general muy elevadas. La mayor presencia de tramos en crisis o de río alternados con tramos en torrente se da mucho más hacia la desembocadura, entre los km 2,0 y 0,0.

- Estero El Gabino

En este caso el cálculo del eje hidráulico aporta antecedentes relevantes en cuanto a la influencia de las múltiples alcantarillas presentes a lo largo del cauce. El análisis previo a la modelación describe en forma general el tipo de escurrimiento que se da en este estero, agregando que sus problemas están asociados principalmente a la deficiente red de obras de arte para cruces de calles. También se presentan problemas en tramos analizados de sección insuficiente, lo cual se ve confirmado por los resultados de la modelación.

En definitiva, el escurrimiento no puede desarrollarse preferentemente en régimen supercrítico, debido a que las condiciones de mayor energía que impone cada cruce o sección estrecha obligan a resaltar al flujo. Esto genera serios problemas de inundación, sobre todo en la Zona Baja definida en la sectorización geomorfológica. En esta misma zona existen sectores en que si bien las defensas o peraltes de borde del estero evitan desbordes para períodos de retorno intermedios, las aguas lluvias locales no tienen posibilidad de ingresar al cauce debido a que las cotas de coronamiento de los bordes del cauce superan a los terrenos aledaños.

- Estero Las Rosas

Los resultados del comportamiento hidráulico durante crecidas de este cauce muestran que en general ha sido bien trabajado. En efecto, hasta el shopping de La Dehesa, los desbordes que presenta son siempre locales, ya sea inundando una planicie intermedia, más baja que los terrenos urbanizados, o bien terrenos que son parte de los clubes ahí presentes, sin generar mayores daños. Hacia aguas abajo de Av. El Rodeo los desbordes se generan para períodos de retorno algo menores, aunque aún aceptables. Aun así, pequeñas modificaciones al sistema de entrada de las bóvedas o alcantarillas permitirían evitar cualquier riesgo.

- Quebrada El Manzano

Este cauce ha sido muy intervenido por las urbanizaciones, y actualmente los puntos de riesgos obedecen a obras de arte de cruce de calles o abovedamientos subdimensionados. Obviamente la seguridad de este cauce se fundamenta en la limpieza de sus obras de arte y de su lecho, a fin de que elementos de dimensiones mayores no sean arrastrados y puedan bloquear las alcantarillas. Adicionalmente, los dos tranques del Club de Golf Lomas de La Dehesa deberán mejorar sus vertederos, a fin de soportar crecidas mayores.

- Estero Las Hualtatas

Los resultados del cálculo del eje hidráulico de este estero son coherentes en su totalidad con el diagnóstico ya realizado. En el tramo de precordillera, las planicies ribereñas tienden a inundarse, de modo que al momento en que se proyecten calles y urbanizaciones en esa zona, deberán considerarse estos resultados. En cuanto al fujo, se trata de un régimen de torrente, cuya canalización ha aumentado las velocidades de escurrimiento, principalmente entre los km 7,4 y 4,9, lo que obliga a mantener un adecuado control del estado de las defensas y de las gradas reductoras de pendiente. Hacia aguas abajo los riesgos de erosión, sobre todo por la ribera izquierda son altos y deberán proponerse soluciones para cada caso.

Los problemas, principales se dan en el tramo final previo a la desembocadura, donde el cauce actual es demasiado estrecho en relación al caudal y carga sólida en crecidas. Esto acarrea serios riesgos de erosión lateral, razón por la que cualquier solución pasará por definir acordar qué ancho darle al cauce.

- Quebrada Oscura

El escurrimiento en esta quebrada resulta bastante estable, debido a que se trata de un encauzamiento artificial de sección y pendiente adecuada.

En los primeros 1.200 m la canalización fue desarrollada con una pendiente en torno al 2,2%, la que se reduce en forma algo brusca a 0,31% en los últimos 550 m previos a su descarga al estero El Carrizo. Esto genera una disminución de velocidades, e incluso una zona de desborde en torno al km 0 + 350 (a 350 m de la confluencia con El Carrizo), aunque para crecidas extremas. Debe hacerse presente, sin embargo, que la capacidad de arrastre se reducirá en forma brusca en la zona del cambio de pendiente, lo que va a significar que los niveles teóricos de escurrimiento serán aún mayores. Esto significa que los desbordes se generarán para períodos de retorno algo menores a los que aquí se plantean.

En cuanto a la mitigación del problema de pérdidas de arrastre, la canalización existente cuenta con gradas reductoras de pendiente, las que en algo van a ayudar a retener sólidos antes del cambio de pendiente del km 0 + 550. Finalmente, las velocidades del tramo de fuerte pendiente ameritan una revisión periódica del estado de las barreras transversales, ya que éstas son gravitantes en la estabilidad de la canalización.

- Estero El Carrizo

El estero El Carrizo está canalizado con gaviones desde los últimos 600 m ubicados dentro del cajón cordillerano, antes de su confluencia con quebrada Oscura. Se trata de un flujo en régimen de torrente, excepto en el tramo influenciado por la cubeta del antiguo Tranque Los Trapenses, en que, dependiendo del caudal, será más o menos su influencia (debe destacarse que el muro del embalse fue rebajado, sin embargo se mantiene una gran explanada que ensancha la sección de escurrimiento y reduce las velocidades).

Se presentan dos sectores críticos, los que se ubican aguas abajo de la confluencia con quebrada Oscura, inicialmente en la cercanía a la calle local y luego en la zona donde el cauce vira para desviarse hacia la cubeta del embalse.

- Quebrada El Guindo

Los resultados de los cálculos hidráulicos muestran que, en el sector canalizado (últimos 2 km antes de la confluencia con el estero Las Hualtatas), los problemas son bastante puntuales y se generan principalmente debido a la existencia de cruces de calles de sección insuficiente, especialmente debido a falta de mantención y limpieza. Sin embargo, en otros cruces se da que las revanchas para períodos de retorno mayores son bastante pequeñas, lo que podría ocasionar problemas en caso de que el cauce no tenga una adecuada mantención o algún elemento pueda bloquear las alcantarillas.

v) "Diagnóstico Cauces Naturales Sector Pie Andino, Región Metropolitana" (DOH, AC Ingenieros Consultores Ltda.; 2008).

Como parte de este estudio se incluyen 3 quebradas pertenecientes a la comuna de Lo Barnechea: Quebrada Agua de Aranda, Quebrada El Ají y Quebrada Las Zorras.

- Quebrada Agua de Aranda (N-1)

Esta quebrada se encuentra caracterizada aguas arriba del cruce con el camino San Alfonso hasta la descarga en el río Mapocho, a unos 60 m del cruce con el camino El Bajo, mediante un conjunto de 7 perfiles transversales, los cuales permiten representar la quebrada en una longitud de 202 m.

Los resultados del estudio hidráulico muestran que es posible señalar que la capacidad hidráulica de esta quebrada se encuentra limitada a un valor de $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$, lo cual corresponde a un período de retorno de alrededor de 2 años. Dicho valor corresponde al máximo caudal de conducción del cauce sin presentar desbordes, considerando como límite una revancha nula. El punto de desborde identificado se ubica 13 m aguas arriba del río Mapocho, razón por la que no genera gran impacto desde el punto de vista de los desbordes. Un segundo punto crítico se ubica en la alcantarilla del Camino El Bajo, la cual cuenta con una capacidad hidráulica asociada a 10 años de período de retorno. Cabe comentar, además, que este punto presenta revanchas de menos de 0,2 m para la crecida de 5 años de período de retorno. El resto de la quebrada presenta una capacidad hidráulica al menos equivalente a la crecida de 100 años de período de retorno con valores de revancha por sobre 0.5 m.

- Quebrada El Ají (N-2)

Esta quebrada fue caracterizada por un conjunto de 36 perfiles transversales, los cuales permiten representar la quebrada en una longitud de 2786 m, cuya extensión principal se ubica al interior del condominio Valle Escondido, para luego proseguir paralela al Camino Los Refugios, hasta su descarga en el río Mapocho a unos 30 m del cruce del cauce con la calle Raúl Labbé.

La modelación hidráulica muestra que la capacidad hidráulica de esta quebrada es de 1,9 m³/s, valor al cual le corresponde a un período de retorno menor a 2 años. Dicho valor corresponde al valor de caudal máximo de conducción del cauce sin presentar desbordes, considerando que la revancha es nula. El punto de menor capacidad hidráulica se presenta en la ribera izquierda, ubicándose a alrededor de 20 m. aguas arriba del cruce con el canal El Bollo y a 54 m del cruce con la Avda. Raúl Labbé.

Se identificaron además otros 2 puntos críticos respecto de la posibilidad de rebase, pero asociados a 50 años de período de retorno. Estos se ubican a 192 m y 22 m aguas arriba del cruce con la Avda. Raúl Labbé. Además, cabe comentar que el punto de desborde ubicado más aguas arriba, presenta revanchas bajo los 0,2 m para crecidas iguales o superiores a 10 años de período de retorno, lo cual le hace especialmente crítico para esta magnitud de caudales. El resto de la quebrada presenta una capacidad hidráulica superior a 100 años de período de retorno.

- Quebrada Las Zorras (N-3)

Esta quebrada se ubica a los pies del Cerro 18, presentando un cauce abovedado a partir del cruce con la calle Los Quincheros y luego bajo la calle Cuatro Vientos, descargando finalmente en el estero El Gabino. Su cauce en la zona abierta se encuentra caracterizado por un conjunto de 57 perfiles transversales, de los cuales 26 corresponden al brazo norte de la quebrada, 19 al brazo sur de la misma y 12 al tramo de aguas abajo de la confluencia de los brazos señalados, los cuales permiten representar una longitud de quebrada de 775 m, 934 m y 275 m respectivamente.

Los resultados de la modelación hidráulica indican que es posible señalar que la capacidad hidráulica de esta quebrada es superior a la crecida de 100 años de período de retorno en el brazo sur y tramo de aguas abajo de la confluencia de los brazos norte y sur. El brazo norte, sin embargo, como producto de la intervención que se ha realizado en una zona de rellenos, presenta una capacidad hidráulica de 2 años de período de retorno, presentando además una zona de alrededor de 100 m con revanchas bajas, que no permiten asegurar la inexistencia de desbordes como producto de las turbulencias propias del flujo. El borde crítico tanto desde el punto de vista del desborde como de la posibilidad de ser sobrepasada por ondas, se ubican en la ribera izquierda de la quebrada.

vi) “Proyecto Defensas Fluviales Río Mapocho – Sector Oriente Concesión Sistema Oriente Poniente Autopista Costanera Norte” (Asistecsa Ingenieros Consultores – EIC Ingenieros Consultores Ltda. & R. Astaburuaga; 2002).

Se cuenta con información del ORD. 1997-12 de diciembre de 2003, el cual haciendo referencia ORD. N°6070 (adjunto) del 02-12-2003, indica que se aprueba el proyecto de Ingeniería de Detalle de las Defensas fluviales del río Mapocho sector Oriente, específicamente entre el Puente San Enrique y el Puente Los Saldes. El ORD. N°6070 se basa en la Minuta Técnica elaborada por el Departamento de Obras Fluviales. Los principales contenidos de esta minuta hacen referencia a las obras proyectadas, los criterios de diseño, comentarios y conclusiones que llevan a generar la aprobación de las obras, bajo ciertas condiciones que se detallarán a continuación.

Las obras proyectadas corresponden a:

- Mejoramiento de los gaviones existentes, mediante la construcción de una zarpa de fundación, en mampostería reforzada, peraltamiento puntual con gaviones y una capa de shotcrete de 2,5 0 5 cm, en la cara que enfrenta al río, para el sector medio y bajo de la defensa, respectivamente.
- Mejoramiento del enrocado existente, mediante un refuerzo de su fundación y peralte puntual de ambos con roca de tamaño compatible al existente.

- Construcción de defensa nueva en base a mampostería reforzada

Como único criterio de diseño se toma la cota de coronamiento de las obras, que corresponde a adoptar como revancha sobre el eje hidráulico asociado a una crecida con periodo de retorno 100 años, el valor obtenido entre la altura del río conjugado del torrente y la altura del torrente, con un mínimo de 1,0 m.

Las cotas de fundación se definieron según el nivel de socavación, medido desde la rasante de fondo proyectada. De acuerdo a los resultados del proyecto, la profundidad de socavación no supera los 2,5 m. De acuerdo al informe, y en línea con la aprobación del proyecto, existe incertidumbre en relación a la estimación de socavación debido a las características del cauce. Pese a lo anterior, se entrega la aprobación al proyecto bajo la condición que considere medidas adicionales para control de socavación, correspondientes a estructuras transversales al cauce llamadas de “control de fondo”, a ser ubicadas en zonas estratégicas del río.

vii) Estudios disponibles de puente Padre Arteaga y solución de aguas lluvias.

Como parte del proyecto “Prolongación Eje Costanera de Sistema Oriente-Poniente: Desde puente La Dehesa a Av. Padre Alfredo Arteaga” se incluye el Volumen N°2, correspondiente al proyecto definitivo de saneamiento de la “Modificación Colector Padre Arteaga”. Este colector responde a la evacuación de los caudales de aguas lluvias que caerán sobre las nuevas vías, evitando de esta forma algún daño prematuro de la vialidad. El proyecto contempla un periodo de retorno de 10 años para las obras de colectores y 25 años para el diseño de las plantas elevadoras. Se trata por tanto de una situación local no relacionada con el flujo a través de quebradas.

viii) Estudio sobre el Estado del Cauce del Río Mapocho y de Conservación de Las defensas Fluviales, licitación Pública ID:2735-71-LE20

A través del ORD. DOH – RMS N°377, del 09 de abril de 2021, se tuvo acceso a los principales resultados del estudio señalado. En resumen, se puede señalar que el estudio considera un levantamiento topográfico del río Mapocho, abarcando un tramo de 1.500 m, medidos a partir de 500 m aguas arriba del puente La Dehesa, cubriendo el frente total del terreno de emplazamiento del proyecto habitacional Juan Pablo II. La topografía considera curvas de nivel cada 0,5 m, incluyendo las singularidades e infraestructura que influyen el escurrimiento hidráulico del río Mapocho. El estudio considera un caudal únicamente líquido, con un caudal máximo de 100 años de periodo de retorno de 710 m³/s aguas arriba de la confluencia con el Estero Las Hualtatas, y de 880 m³/s, aguas abajo de dicho punto. El análisis hidráulico se realiza para la condición existente, así como para una condición futura (cauce limpio), cuyos principales resultados indican:

- Los resultados de las simulaciones hidráulicas realizadas, muestran que los niveles de aguas para crecidas de T=100 años, están por debajo del borde superior de la ribera sur a lo largo de toda la extensión del estudio (revancha mayor o igual a 5 m en el sector del río Mapocho frente al terreno del proyecto habitacional Juan Pablo II).
- Las revanchas medidas con respecto al nivel de coronamiento de las defensas, en algunos sectores de los enrocados y al inicio de la mampostería de piedra son menores a 1 m, superándose el coronamiento de la defensa a 46 m aguas abajo del puente La Dehesa.

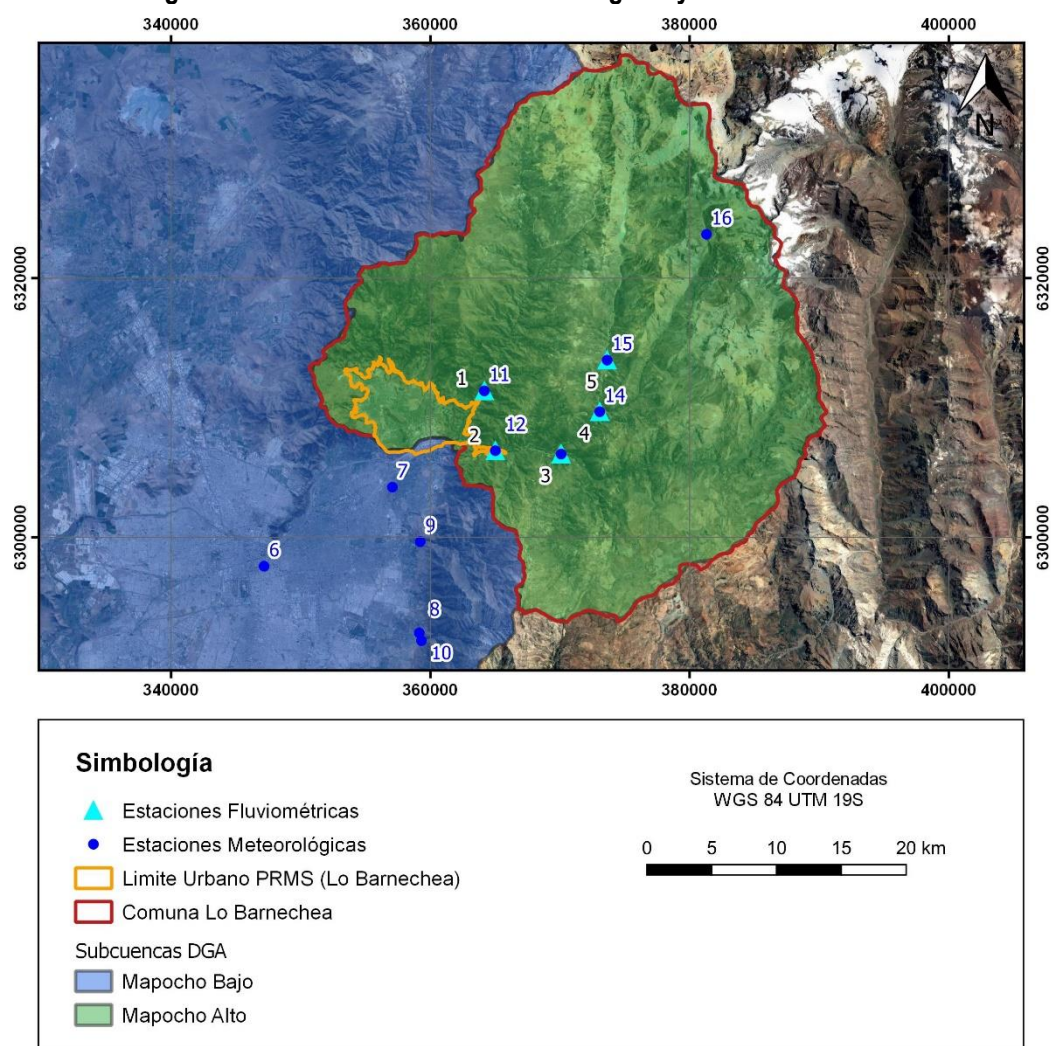
En cuanto a las socavaciones, se determina, mediante el método de Neill, que para la condición de socavación máxima, las cotas del lecho socavado quedan por sobre el sello de fundación en la zona en estudio, tanto para la situación actual del cauce como para la situación futura (cauce limpio).

El documento finaliza su análisis del estudio incorporando algunas recomendaciones para mejorar obras existentes, e indicando que el estudio cumple con los objetivos solicitados mediante el ORD DOH N°1504, no existiendo inconvenientes técnicos de índole fluvial para otorgar el V°B° al proyecto presentado.

ix) Información Hidrometeorológica

La información hidrometeorológica disponible en la red de estaciones de monitoreo de la Dirección General de Aguas (DGA) corresponde a estaciones meteorológicas y fluviométricas. Las primeras entregan información relacionada a precipitaciones (y otros parámetros climáticos), mientras que las segundas entregan información de caudales. Para el análisis se han considerado las estaciones fluviométricas en la subcuenca Mapocho Alto de acuerdo a la delimitación de cuencas de la DGA, que contiene en su delimitación a la comuna de Lo Barnechea, y estaciones meteorológicas que se ubican igualmente en la subcuenca Mapocho Alto y al poniente, en la subcuenca Mapocho Bajo, de acuerdo al detalle presentado en la Figura N° 8.3—12.

Figura N° 8.3—12: Estaciones meteorológicas y fluviométricas DGA



Fuente: Elaboración propia en base a Información hidrometeorológica BNA-DGA

En el Cuadro N° 8.3-9 se presenta el detalle de las estaciones fluviométricas, mientras que en el Cuadro N° 8.3-10 se entrega la información correspondiente a las estaciones meteorológicas. Complementando lo anterior

se entrega en el Cuadro N° 8.3-11 (estaciones fluviométricas) y en el Cuadro N° 8.3-12 (estaciones meteorológicas) la extensión de la información disponible para descarga en el sitio web de la DGA (<http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>), considerando los meses con más de 20 datos como meses completos. Es posible notar que a nivel fluviométrico las estaciones con un registro más largo corresponden a Río Mapocho en Los Almendros y Estero El Arrayán en La Montosa, mientras que a nivel meteorológico son Terrazas oficinas centrales DGA, Antupirén y Cerro Calán.

Cuadro N° 8.3-9: Estaciones Fluviométricas DGA

N°	Cod. BNA	Estación	Coordenadas UTM WGS84 19S		Altitud	Fecha Inicio	Estado
			Este	Norte			
1	05722001-5	Esterio Arrayan en La Montosa	364.171	6.311.298	880	01/08/1980	Vigente
2	05722002-3	Río Mapocho en Los Almendros	365.020	6.306.679	966	01/01/1986	Vigente
3	05720001-4	Río Molina antes junta San Francisco	370.094	6.306.419	1.158	01/09/1974	Vigente
4	05721001-K	Esterio Yerba Loca antes junta San Francisco	373.072	6.309.689	1.350	01/09/9174	Vigente
5	05721016-8	Río San Francisco antes junta Estero Yerba Loca	373.641	6.313.676	1.550	01/05/2009	Vigente

Fuente: Elaboración propia en base a Información hidrometeorológica BNA-DGA

Cuadro N° 8.3-10: Estaciones Meteorológicas DGA

N°	Cod. BNA	Estación	Coordenadas UTM WGS84 19S		Altitud	Fecha Inicio	Estado
			Este	Norte			
6	05730016-7	Terraza oficinas centrales DGA	347.173	6.297.768	560	01/01/1960	Vigente
7	05730012-4	Cerro Calán	357.078	6.303.869	848	01/06/1975	Vigente
8	05730013-2	Antupirén	359.149	6.292.612	904	01/06/1975	Vigente
9	05730008-6	Quebrada Ramon en recinto EMOS	359.226	6.299.663	845	01/07/1996	Vigente
10	05730039-6	Quebrada de Macul	359.320	6.292.012	950	29/04/2003	Vigente
11	05722001-5	Esterio Arrayan en La Montosa	364.171	6.311.298	880	01/08/1980	Vigente
12	05722002-3	Río Mapocho en Los Almendros	365.020	6.306.679	966	01/01/1986	Vigente
13	05720001-4	Río Molina antes junta San Francisco	370.094	6.306.419	1.158	01/09/1974	Vigente
14	05721001-K	Esterio Yerba Loca antes junta San Francisco	373.072	6.309.689	1.350	01/09/1974	Vigente
15	05721016-8	Río San Francisco antes junta Estero Yerba Loca	373.641	6.313.676	1.550	01/05/2009	Vigente
16	05721017-6	Esterio Yerba Loca en Piedra Carvajal	381.313	6.323.390	3.250	21/04/2011	Vigente

Fuente: Elaboración propia en base a Información hidrometeorológica BNA-DGA

Cuadro N° 8.3-11: N° de meses con información en estaciones fluviométricas

ESTACIÓN	1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2019
Estero Arrayan en La Montosa					
Río Mapocho en Los Almendros					
Río Molina antes junta San Francisco					
Estero Yerba Loca antes junta San Francisco					
Río San Francisco antes junta Estero Yerba Loca					

Meses Con información

- 1 a 4 meses
- 5 a 7 meses
- 8 a 11 meses
- 12 meses

Fuente: Elaboración propia en base a Información hidrometeorológica BNA-DGA

Cuadro N° 8.3-12: N° de meses con información en estaciones meteorológicas

ESTACIÓN	1960-1969	1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2019
Terraza oficinas centrales DGA						
Cerro Calán						
Antupirén						
Quebrada Ramon en recinto EMOS						
Quebrada de Macul						
Estero Arrayan en La Montosa						
Río Mapocho en Los Almendros						
Río Molina antes junta San Francisco						
Estero Yerba Loca antes junta San Francisco						
Río San Francisco antes junta Estero Yerba Loca						
Estero Yerba Loca en Piedra Carvajal						

Meses Con información

- 1 a 4 meses
- 5 a 7 meses
- 8 a 11 meses
- 12 meses

Fuente: Elaboración propia en base a Información hidrometeorológica BNA-DGA

c) Delimitación y caracterización de cuencas

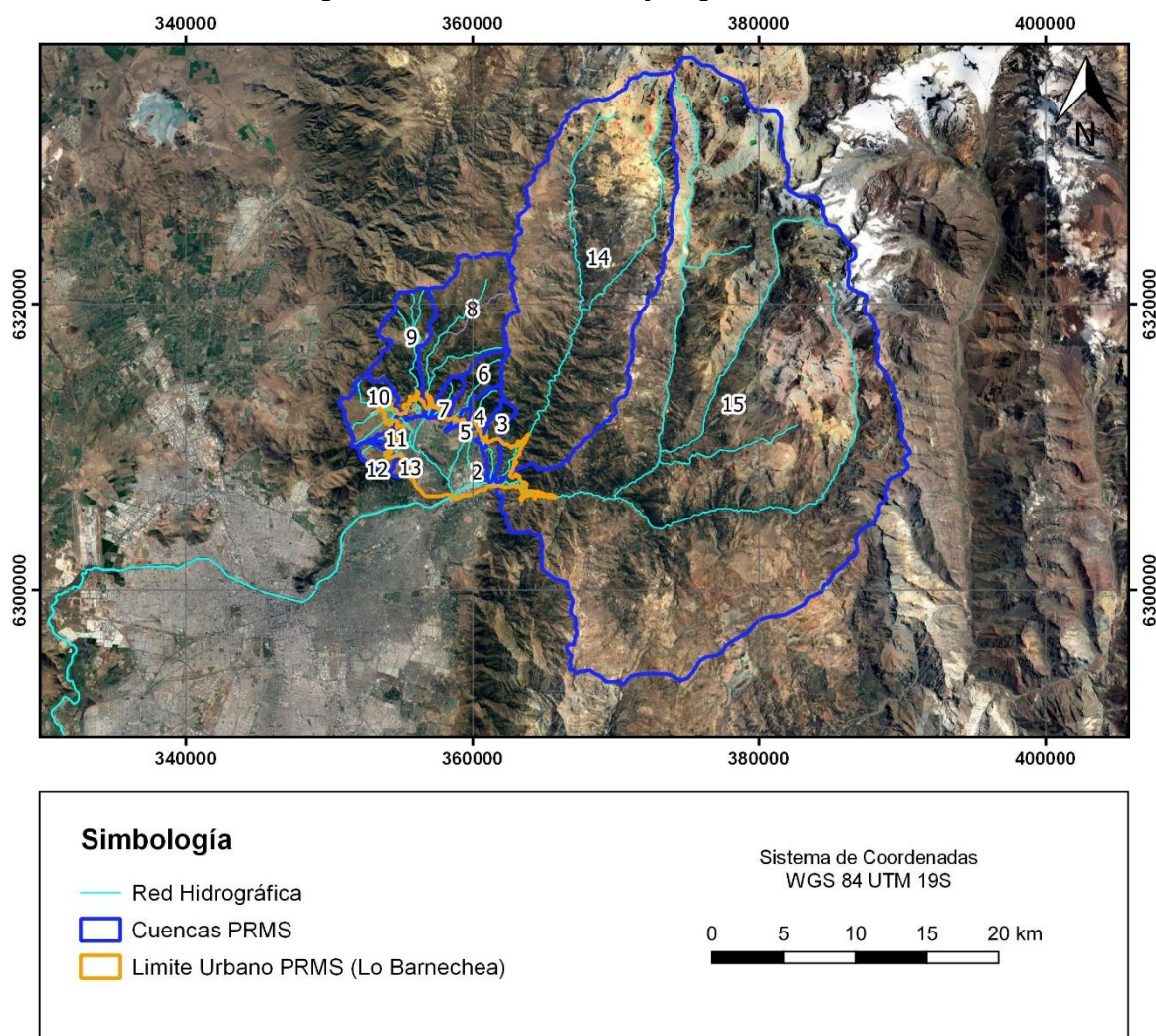
La caracterización hidrológica se ha realizado para dos grupos de cuencas, de acuerdo a los objetivos del presente estudio con respecto a la definición de áreas de inundación. El primer grupo corresponde a las cuencas reguladas por el PRMS, y el segundo a cuencas de menor tamaño en la comuna de Lo Barnechea, de acuerdo a la priorización realizada en el estudio de INFRACON (2014).

En la Figura N° 8.3—13 se presentan las cuencas del primer grupo (detalle en la Figura N° 8.3—14). Los parámetros morfométricos de dichas cuencas se presentan en el Cuadro N° 8.3-13. Se destacan entre estas cuencas las correspondientes al río Mapocho, estero El Arrayán y estero Hualtatas, las cuales presentan flujo de manera continua, de acuerdo con los antecedentes analizados y a lo observado en terreno, mientras que el

flujo en las otras quebradas es más bien intermitente, observándose únicamente durante algunos periodos del año.

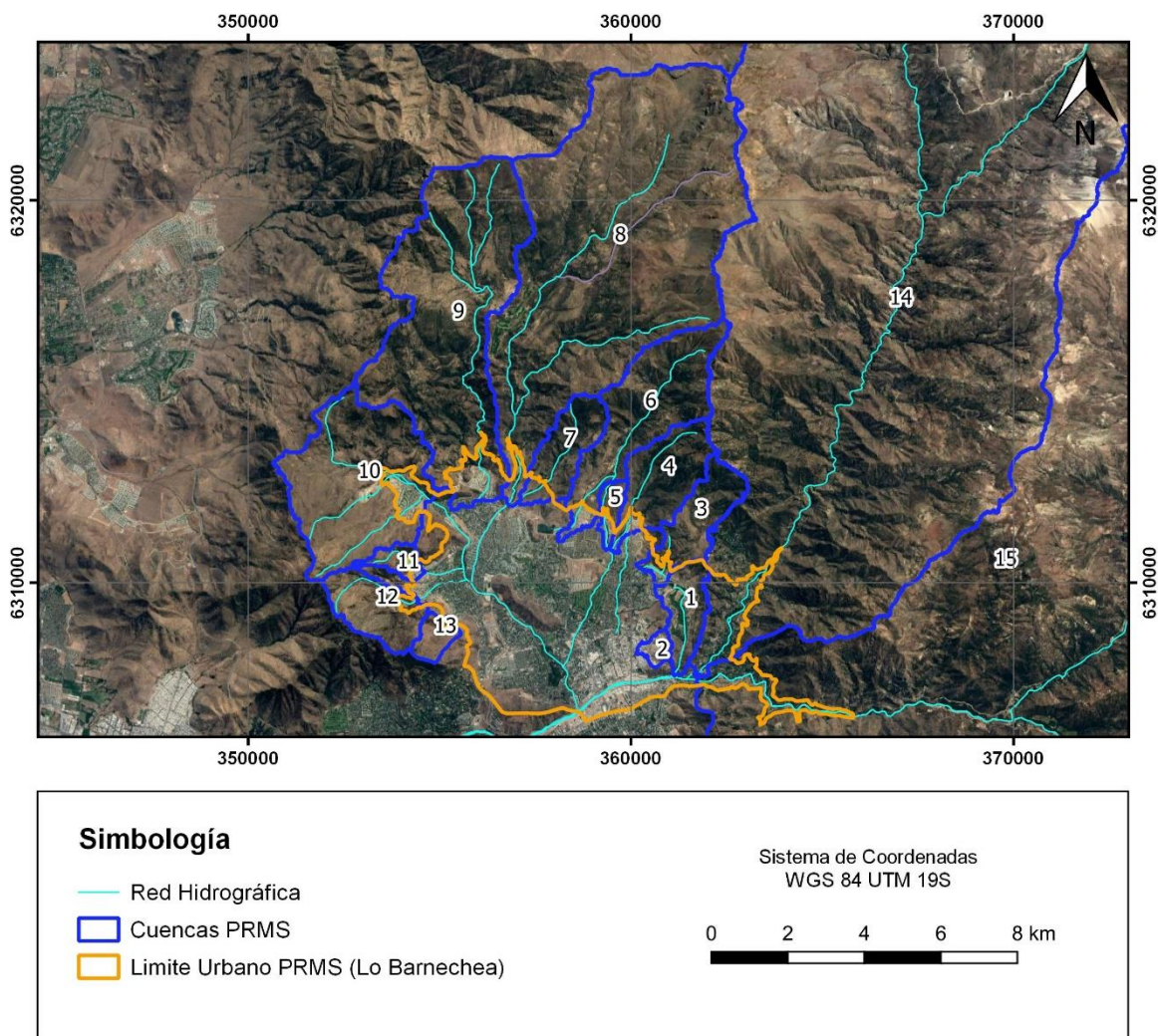
Considerando que la línea de nieve se presenta para estas cuencas a una altura de 2.000 msnm, de acuerdo a lo establecido en el Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas Sin Información Fluviométrica (DGA-MOP, 1995), se estimaron las áreas aportantes pluviales de aquellas cuencas que presentan elevaciones sobre este valor. Se descarta para este análisis las cuencas de la Qda. El Manzano y Qda. Oscura, dado que el área de ambas por sobre los 2.000 msnm es menor al 5% del área total. De esta forma, se presentan las curvas hipsométricas de las cuencas del estero Arrayán (Figura N° 8.3—15), estero Las Hualtatas (Figura N° 8.3—16) y río Mapocho (Figura N° 8.3—17), las cuales indican que el área pluvial en cada cuenca corresponde a un 32%, 60% y 22%, respectivamente.

Figura N° 8.3—13: Cuencas bajo regulación PRMS



Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.3—14: Cuencas bajo regulación PRMS (Detalle)

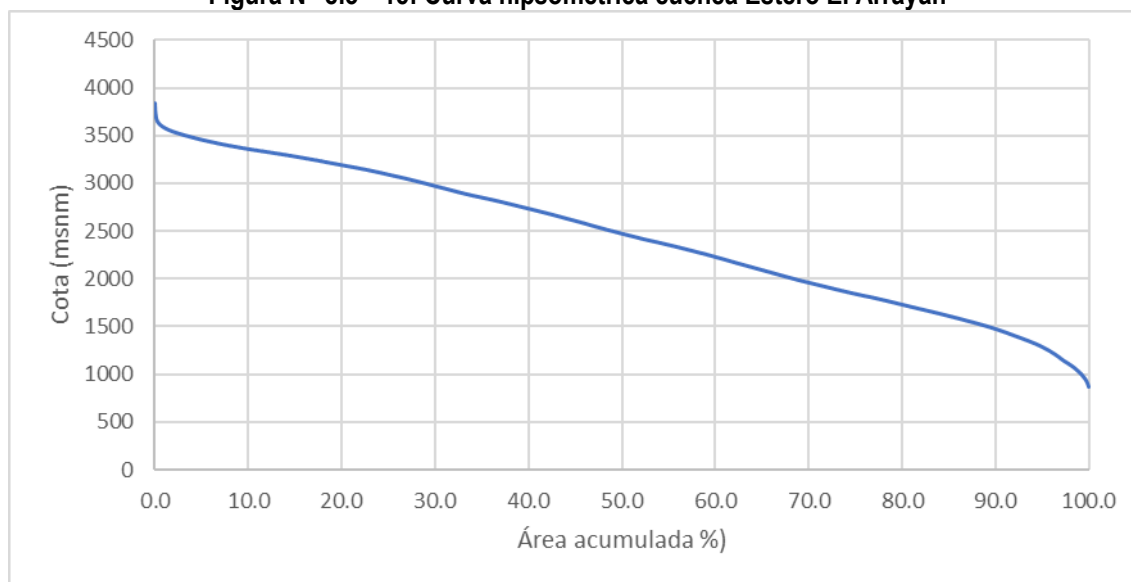


Fuente: Elaboración propia (2021)

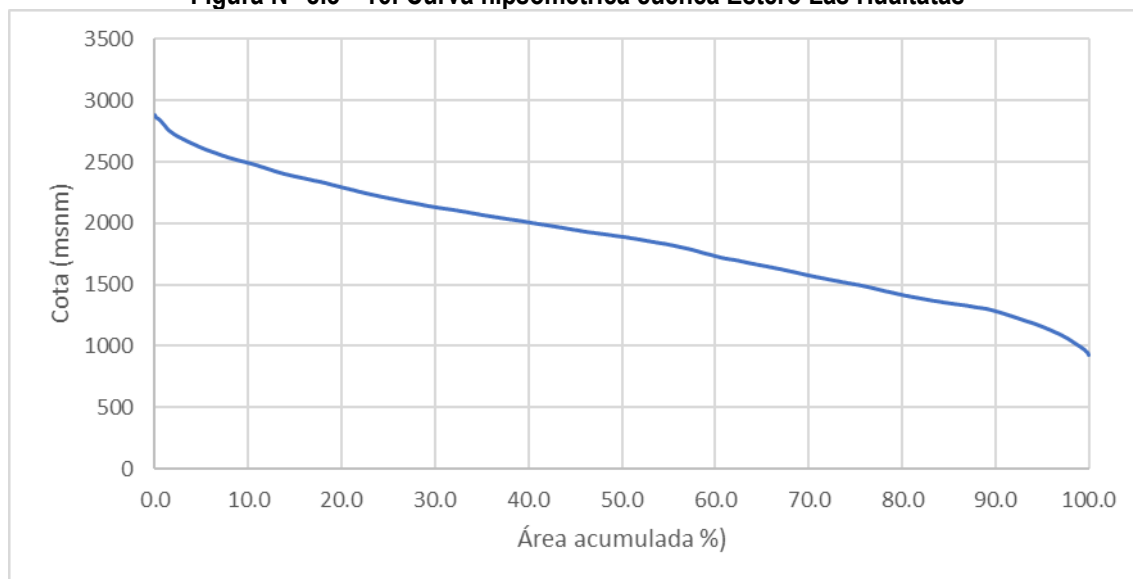
Cuadro N° 8.3-13: Parámetros morfométricos cuencas reguladas por el PRMS

N°	Cuenca	Área (km²)	Área Pluvial (km²)	Altura media (msnm)	Altura mínima (msnm)	Altura máxima (msnm)	Pendiente media (%)	Longitud cauce (m)
1	Qda. El Aji	2,6	2,6	1.008	854	1.224	26,0	2,7
2	Qda. Las Zorras	0,5	0,5	927	844	987	32,8	1,2
3	Qda. El Gabino	3,7	3,7	1.200	921	1.697	30,3	4,3
4	Qda. El Peumo	4,8	4,8	1.234	933	1.721	30,9	4,1
5	Qda. Las Rosas	0,8	0,8	1.023	937	1.099	13,6	1,8
6	Qda. El Manzano	8,8	8,8	1.443	930	2.322	40,6	6,7
7	Qda. El Culén	3,4	3,4	1.220	948	1.699	34,2	3,3
8	Estero Hualtatas	44,1	26,5	1.875	926	2.887	34,63	12,9
9	Qda. Oscura	23,6	23,6	1.417	883	2.111	28,9	10,5
10	Qda. Carrizo	13,3	13,3	1.157	909	1.534	22,9	4,9
11	Qda. Los Chanchos	0,9	0,9	1.102	912	1.290	30,8	1,8
12	Qda. La Carbonera	3,6	3,6	1.222	939	1.626	37,1	3,0
13	Qda. El Guindo	1,0	1,0	1.113	886	1.318	34,5	1,1
14	Estero Arrayan	230,8	73,0	2.443	869	3.834	45,3	34,9
15	Río Mapocho	651,0	142,7	2.753	864	5.373	46,4	40,0

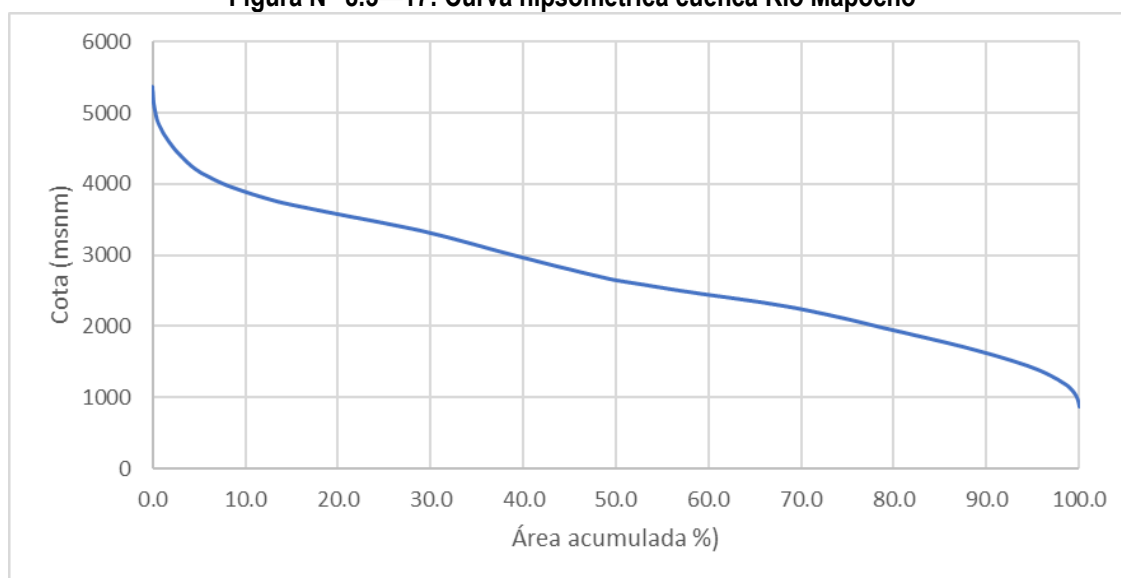
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.3—15: Curva hipsométrica cuenca Estero El Arrayán

Fuente: Elaboración propia (2021)

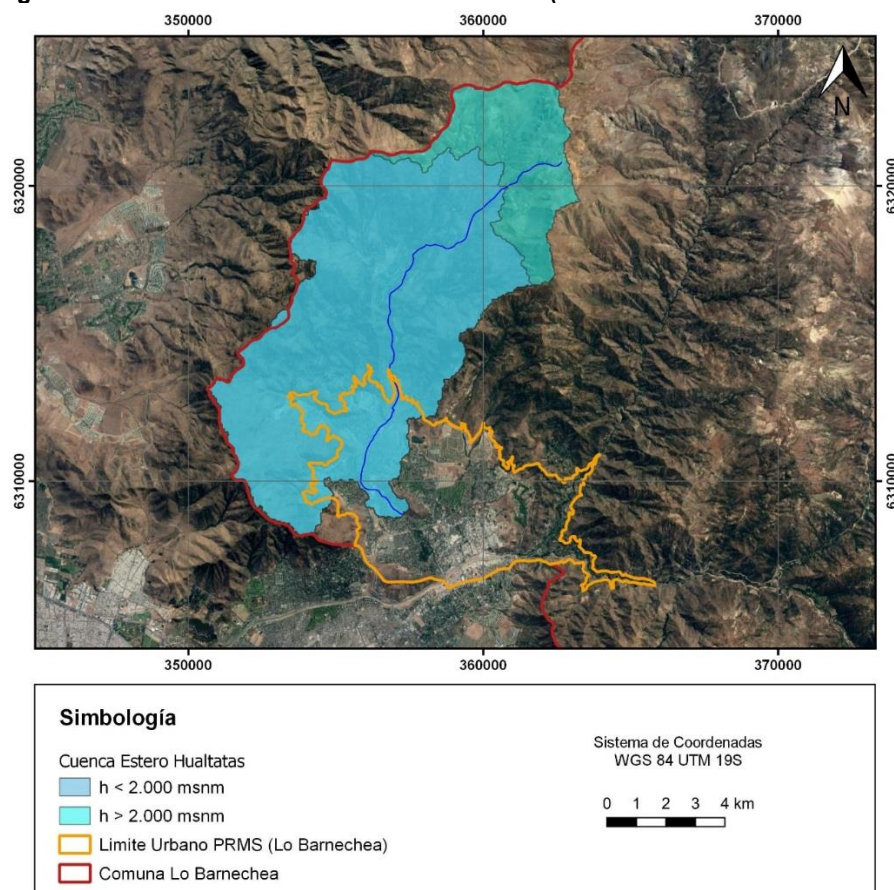
Figura N° 8.3—16: Curva hipsométrica cuenca Estero Las Hualtatas

Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.3—17: Curva hipsométrica cuenca Río Mapocho

Fuente: Elaboración propia (2021)

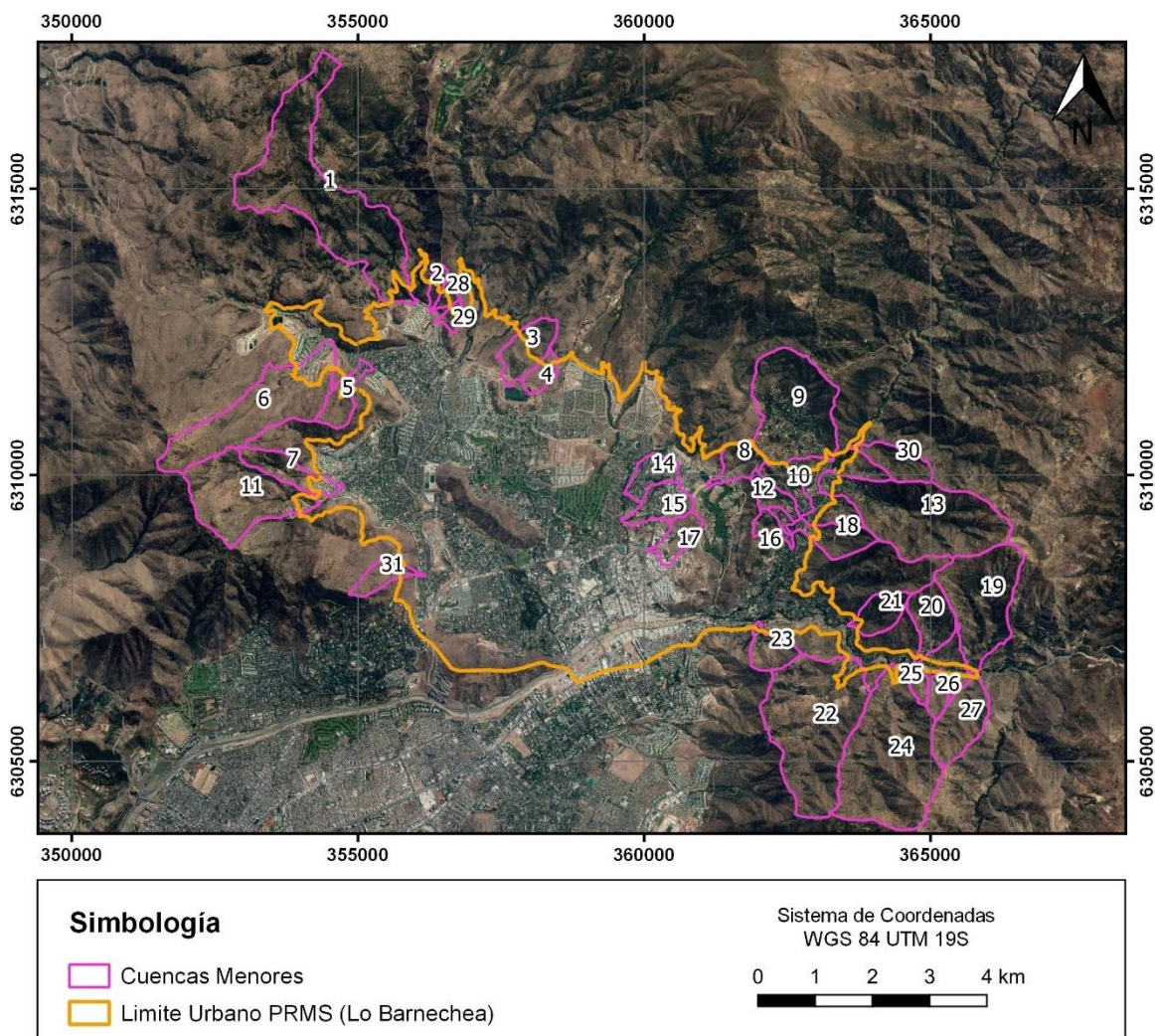
Adicionalmente, se analizó la cuenca del estero Hualtatas (Estero Las Hualtatas 2) considerando el área aportante definida en la Figura N° 8.3—18. Lo anterior, por cuanto, de acuerdo a lo observado en terreno y a una solicitud realizada por parte de la Autoridad, aguas abajo de este punto el trazado del cauce presenta singularidades que han sido interesantes de analizar por medio de un modelo hidráulico, según se detallará en el Capítulo 2.3 Modelación, motivo por el cual se delimitó la cuenca cerrándola en el punto mencionado con el objeto de estimar los caudales asociados, para posteriormente evaluar el área de inundación correspondiente.

Figura N° 8.3—18: Cuenca Estero Las Hualtatas (extensión hacia el área urbana)

Fuente: Elaboración propia (2021)

Por otra parte, las cuencas menores analizadas (INFRACON, 2014) se presentan en la Figura N° 8.3—19, mientras que sus parámetros morfométricos se incluyen en el Cuadro N° 8.3-14. Es posible notar que la Qda. N°1 forma parte de la Qda. Oscura, y la Qda. N°11 corresponde a la Qda. Las Carboneras. Cabe destacar que, dado que las alturas máximas no superan los 2.000 msnm no es necesario realizar un análisis particular de áreas aportantes pluviales.

Figura N° 8.3—19: Cuencas menores Área Urbana Sector Valle de Lo Barnechea



Fuente: Elaboración propia (2021)

Cuadro N° 8.3-14: Parámetros morfométricos cuencas menores Lo Barnechea

N°	Cuenca	Área (km ²)	Altura media (msnm)	Altura mínima (msnm)	Altura máxima (msnm)	Pendiente Media (%)	Longitud cauce (m)
1	Oscura	4,4	1.326	933	1.724	25,2	4,9
2	Afluente Oscura III	0,1	1.017	916	1.138	41,9	0,6
3	Q2	0,7	1.019	932	1.193	27,6	1,4
4	Q3	0,3	984	932	1.092	27,9	0,6
5	Q21	0,4	1.043	887	1.172	32,5	1,0
6	Las Lechuzas	2,5	1.157	950	1.540	24,0	3,2
7	Los Clarines	0,6	1.097	900	1.265	30,8	1,6
8	Q7	0,4	1.098	977	1.224	39,9	0,8
9	Los Quillayes	2,4	1.178	984	1.443	33,6	2,1
10	Q11	0,4	1.060	942	1.193	44,2	1,1
11	La Carbonera I	2,1	1.255	952	1.626	33,2	2,0
12	Q10	0,3	1.051	936	1.166	46,5	1,0
13	Huallalolen	3,1	1.473	966	1.968	57,1	2,9
14	La Laguna	0,4	928	878	1.018	26,4	0,9
15	Quebrada Grande/Las Nipas	0,5	935	860	1.021	26,3	1,2
16	Q9	0,2	1.013	914	1.118	43,9	0,7
17	Los Pitufos (Nido de águilas)	0,4	931	864	1.023	24,3	0,7
18	Q13	0,6	1.157	930	1.527	59,9	1,3
19	Del Ñilhue	2,0	1.482	993	1.971	54,4	2,0
20	Q15	0,7	1.363	970	1.723	76,1	1,0
21	Q14	0,5	1.259	920	1.607	72,6	0,6
22	Las Varas	3,5	1.211	943	1.632	36,6	2,8
23	Q19	0,4	1.065	873	1.218	58,3	0,8
24	El Parrón	3,6	1.416	966	1.871	50,2	3,1
25	Q18	0,2	1.157	973	1.343	65,3	0,4
26	Q17	0,2	1.240	997	1.483	62,4	0,6
27	Q16	0,9	1.366	1006	1.705	54,1	1,6
28	Afluente Oscura II	0,1	1.009	915	1.082	41,8	0,5
29	Afluente Oscura I	0,1	994	910	1.067	37,2	0,4
30	Q12	0,5	1.325	997	1.677	59,4	1,1
31	Chorro de la Vieja	0,4	1.087	833	1.242	34,9	0,8

Fuente: Elaboración propia (2021)

d) 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

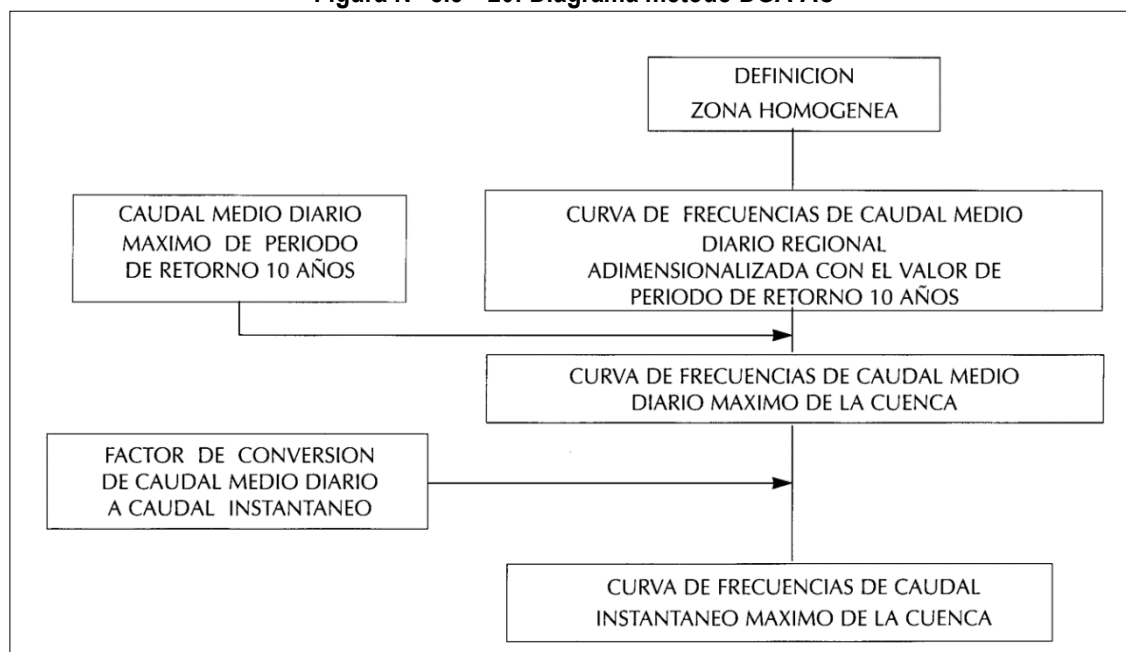
características morfológicas de cada cuenca, en que se aplican parámetros relativos a cada región. Estos métodos son DGA-AC, Verni y King modificado, la Fórmula Racional DGA y el Hidrograma Unitario. Adicionalmente, para cuencas menores, se ha considerado la Fórmula Racional definida de acuerdo al Manual de Carreteras Volumen N°3 Instrucciones y Criterios de Diseño. (MOP, 2018). Cada uno de los métodos se detalla a continuación.

i) 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.

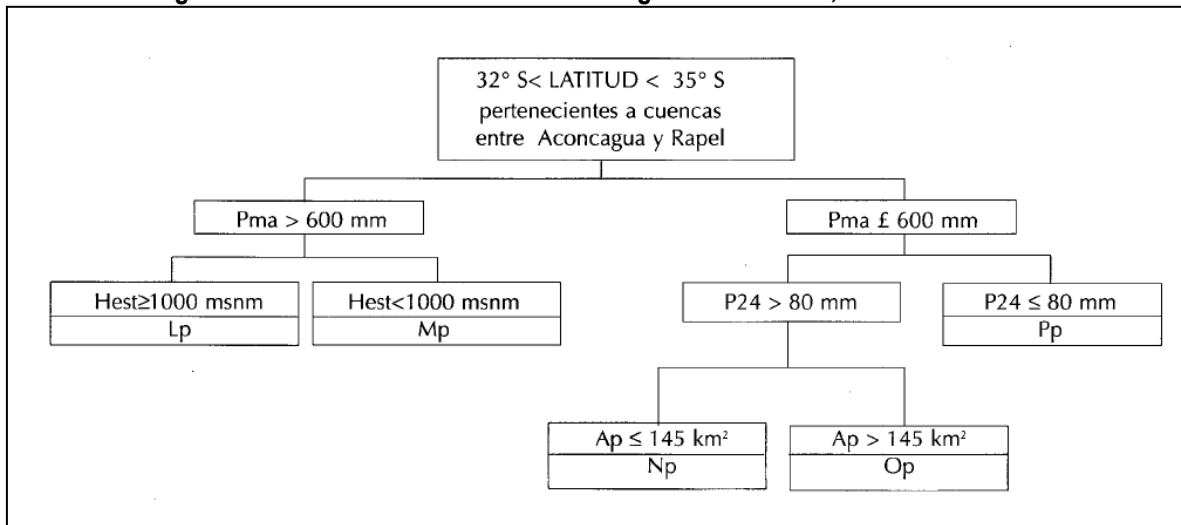
El método consiste básicamente en determinar una curva de frecuencias para el caudal instantáneo máximo de la cuenca, en base al procedimiento esquematizado en el diagrama presentado en la siguiente figura:

Figura N° 8.3—20: 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). A continuación, se definen las zonas correspondientes.

Figura N° 8.3—21: Definición Zonas Homogéneas Pluviales, método DGA-AC


Fuente: Manual de Cálculo y Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluvimétrica (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 Fluvimétrica (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:

$$Q_{10} = 5,42 \cdot 10^{-8} \cdot Ap^{0,915} \cdot (P_{24}^{10})^{3,432} \quad \text{Ecuación 1}$$

donde:

- Q_{10} : Caudal medio diario máximo de periodo de retorno 10 años [m³/s]
 Ap : Área pluvial de la cuenca [km²]
 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.

ii) 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 fluvimétrico de régimen pluvial o nivopluvial, con áreas entre 20 y 10.000 km² 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 [m³/s]
 $C(T)$: Coeficiente empírico de periodo de retorno T años
 Ap : Área pluvial de la cuenca [km²]
 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 periodo 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 a continuación.

Cuadro N° 8.3-15: Curva de frecuencia de coeficiente empírico V y VI Región para aplicación de Verni y King modificado

	V Región	VI Región
T (años)	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 Fluviométrica (DGA-MOP, 1995)

iii) Método de la Fórmula Racional

La expresión para la determinación del caudal máximo instantáneo de periodo 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 (m³/s)
 C : Coeficiente de escorrentía asociado al periodo de retorno T años
 Ap : 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)

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 N° 8.3-15).

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 (km ²)

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:

$$\frac{L}{3,6} \geq tc \geq \frac{L}{5,4}$$

Ecuación 7

iv) 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:

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

Ecuación 8

$$t_B = 5,377 \cdot t_p^{0,805} [hr] \quad \text{Ecuación 9}$$

$$q_p = 144,141 \cdot t_p^{-0,796} [l/s/mm/km^2] \quad \text{Ecuación 10}$$

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 N° 8.3-16.

Cuadro N° 8.3-16: 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.

$$P_{ef} = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{(P + 0,8 \cdot S)} \quad \text{Ecuación 11}$$

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

$$CN = \frac{25.400}{254 + S} \quad \text{Ecuación 12}$$

v) 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.

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{3,6} \quad \text{Ecuación 13}$$

donde:

- Q : Caudal instantáneo máximo de periodo de retorno T años [m³/s]
 C : Coeficiente de escorrentía asociado al periodo de retorno T años
 Ap : 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 del cuadro que se presenta a continuación:

Cuadro N° 8.3-17: 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

$$P_t^T = (0,54 * t^{0.25} - 0,5)(0,21 \ln(T) + 0,52)P_1^{10} \quad \text{Ecuación 14}$$

Siendo:

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

e) Anexos para la definición de caudales de crecida

Cuadro N° 8.3-18: Tiempos de concentración estimados, cuencas menores

N°	Cuenca	Tiempo de Concentración (minutos)			
		Normas españolas	California Culverts	Giandotti	Seleccionado
1	Oscura	78	27	59	55
2	Afluente Oscura III	15	10		12
3	Q2	30	10		20
4	Q3	16	10		13
5	Q21	23	10		16
6	Las Lechuzas	57	19		38
7	Los Clarines	32	10		21
8	Q7	18	10		14
9	Los Quillayes	39	13		26
10	Q11	23	10		16
11	La Carbonera I	38	11		24
12	Q10	21	10		15
13	Huallalolén	45	14	37	32
14	La Laguna	21	10		15
15	Quebrada Grande/Las Nipas	26	10		18
16	Q9	16	10		13
17	Los Pitufos (Nido de Águilas)	19	10		14
18	Q13	24	10		17
19	Del Ñilhue	34	10	29	24
20	Q15	19	10		14
21	Q14	14	10		12
22	Las Varas	48	15		31
23	Q19	17	10		13
24	El Parrón	48	15	43	35
25	Q18	10	10		10
26	Q17	14	10		12
27	Q16	28	10	25	21
28	Afluente Oscura II	12	10		11
29	Afluente Oscura I	11	10		11
30	Q12	21	10		15
31	Chorro de la Vieja	19	10		14

Fuente: Elaboración propia (2021)

Cuadro N° 8.3-19: Precipitaciones máximas asociadas al tiempo de concentración para distintos periodos de retorno

N°	Cuenca	Precipitaciones asociadas al tiempo de concentración (mm)					
		T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100
1	Oscura	10,6	13,7	16,0	19,1	21,4	23,8
2	Afluente Oscura III	5,6	7,3	8,5	10,1	11,4	12,6
3	Q2	7,0	9,0	10,6	12,6	14,1	15,7
4	Q3	5,8	7,5	8,8	10,4	11,7	13,0
5	Q21	6,4	8,3	9,7	11,6	13,0	14,4
6	Las Lechuzas	9,2	11,9	13,9	16,5	18,5	20,6
7	Los Clarines	7,2	9,3	10,9	13,0	14,5	16,1
8	Q7	6,0	7,8	9,1	10,8	12,1	13,4
9	Los Quillayes	7,9	10,2	12,0	14,2	16,0	17,7
10	Q11	6,4	8,3	9,7	11,6	13,0	14,4
11	La Carbonera I	7,7	9,9	11,6	13,8	15,5	17,2
12	Q10	6,3	8,1	9,4	11,3	12,6	14,0
13	Huallalolén	8,6	11,1	13,0	15,5	17,4	19,3
14	La Laguna	6,2	8,0	9,4	11,2	12,6	13,9
15	Quebrada Grande/Las Nipas	6,7	8,7	10,1	12,1	13,6	15,0
16	Q9	5,8	7,5	8,7	10,4	11,7	13,0
17	Los Pitufos (Nido de Águilas)	6,1	7,8	9,1	10,9	12,2	13,5
18	Q13	6,5	8,4	9,9	11,7	13,2	14,6
19	Del Ñilhue	7,7	9,9	11,6	13,8	15,5	17,2
20	Q15	6,0	7,8	9,1	10,9	12,2	13,5
21	Q14	5,5	7,1	8,3	9,9	11,1	12,3
22	Las Varas	8,6	11,0	12,9	15,4	17,2	19,1
23	Q19	5,9	7,5	8,8	10,5	11,8	13,1
24	El Parrón	9,0	11,6	13,5	16,1	18,1	20,1
25	Q18	5,1	6,5	7,6	9,1	10,2	11,3
26	Q17	5,6	7,2	8,4	10,0	11,2	12,4
27	Q16	7,2	9,3	10,9	12,9	14,5	16,1
28	Afluente Oscura II	5,3	6,8	7,9	9,5	10,6	11,8
29	Afluente Oscura I	5,2	6,7	7,9	9,4	10,5	11,6
30	Q12	6,3	8,1	9,4	11,2	12,6	14,0
31	Chorro de la Vieja	6,0	7,8	9,1	10,9	12,2	13,5

Fuente: Elaboración propia (2021)

Cuadro N° 8.3-20: Tiempos de concentración estimados, cuencas PRMS

N°	Cuenca	Tiempo de Concentración (minutos)			
		Normas españolas	California Culverts	Giandotti	Seleccionado
1	Qda. El Ají	56	22		39
2	Qda. Las Zorras	25	10		18
3	Qda. El Gabino	68	24	63	52
4	Qda. El Peumo	66	22	64	51
5	Qda. Las Rosas	42	16		29
6	Qda. El Manzano	91	32		61
7	Qda. El Culén	54	17		36
9	Qda. Oscura	136	56		96
10	Qda. Carrizo	79	30		54
11	Qda. Los Chanchos	35	12		23
12	Qda. La Carbonera	50	16		33
13	Qda. El Guindo	23	10		17

Fuente: Elaboración propia (2021)

Cuadro N° 8.3-21: Precipitaciones máximas asociadas al tiempo de concentración para distintos periodos de retorno

N°	Cuenca	Precipitaciones Tiempo de Concentración (mm)					
		T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100
1	Qda. El Ají	9,4	12,1	14,1	16,8	18,9	20,9
2	Qda. Las Zorras	6,6	8,6	10,0	11,9	13,4	14,8
3	Qda. El Gabino	10,4	13,4	15,7	18,7	21,0	23,3
4	Qda. El Peumo	10,3	13,3	15,6	18,6	20,8	23,1
5	Qda. Las Rosas	8,3	10,6	12,4	14,8	16,6	18,4
6	Qda. El Manzano	11,1	14,3	16,7	19,9	22,4	24,8
7	Qda. El Culén	9,0	11,6	13,6	16,2	18,2	20,1
9	Qda. Oscura	13,1	16,9	19,7	23,5	26,4	29,2
10	Qda. Carrizo	10,6	13,7	16,0	19,1	21,4	23,7
11	Qda. Los Chanchos	7,6	9,7	11,4	13,6	15,2	16,9
12	Qda. La Carbonera	8,8	11,3	13,2	15,7	17,6	19,6
13	Qda. El Guindo	6,5	8,3	9,8	11,6	13,0	14,5

Fuente: Elaboración propia (2021)

i) Definición de caudales de crecida

Se presenta a continuación la estimación de caudales de crecida en las cuencas delimitadas en el punto anterior. Para ello se consideran en primer lugar aquellas cuencas que cuentan con control fluviométrico, que corresponden a las cuencas del estero Arrayán y río Mapocho, en las estaciones Estero Arrayán en La Montosa y Río Mapocho en los Almendros, respectivamente. En segundo lugar, se estimarán los caudales en las cuencas

sin control fluviométricos a partir de relaciones precipitación – escorrentía, tomando en cuenta las precipitaciones máximas en 24 horas y los parámetros morfométricos de cada cuenca.

ii) Cuencas con control fluviométrico

Las cuencas del estero Arrayán y río Mapocho cuentan con estaciones fluviométricas de la DGA que entregan información de caudal instantáneo. De acuerdo con la extensión de los datos presentada en el Cuadro N° 8.3-12 y lo completos que estaban las series de datos, se optó por considerar ambas series entre los años 1985 y 2018, diferenciando los caudales entre los periodos pluviales y nivales. Los valores máximos anuales se presentan en el Cuadro N° 8.3-22.

Cuadro N° 8.3-22: Caudales máximos instantáneos en periodo de invierno y verano

Año	Esterio Arrayan en La Montosa		Río Mapocho en Los Almendros	
	Qmax Invierno (m³/s)	Qmax Verano (m³/s)	Qmax Invierno (m³/s)	Qmax Verano (m³/s)
1985	2,8	4,5	23,1	16,9
1986	44,8	9,9	330,2	20,6
1987	69,9	17,4	234,4	63,6
1988	2,8	10,0	12,3	36,0
1989	22,0	5,1	140,9	25,9
1990	1,5	1,7	14,6	12,4
1991	18,0	7,4	136,6	29,6
1992	9,9	7,3	23,2	24,3
1993	27,5	3,4	305,0	15,7
1994	3,1	4,1	10,8	10,9
1995	2,1	2,5	10,5	8,0
1996	0,8	0,7	3,0	5,8
1997	8,9	10,6	86,1	37,2
1998	2,6	7,3	6,2	19,6
1999	2,4	4,6	31,5	16,1
2000	27,3	9,3	103,7	31,9
2001	15,7	5,7	110,1	23,8
2002	25,4	10,1	75,3	34,6
2003	4,1	4,6	10,5	21,1
2004	1,4	4,9	12,7	50,8
2005	17,9	6,9	325,6	34,7
2006	20,4	6,0	198,7	20,9
2007	1,9	2,6	15,0	13,2
2008	19,7	6,4	218,5	24,3
2009	10,7	5,1	216,7	31,7
2010	1,3	5,7	8,3	17,8
2011	1,3	2,3	8,3	7,2
2012	10,8	5,1	21,1	6,5
2013	0,8	5,3	10,9	8,4
2014	0,7	1,6	5,4	8,3
2015	15,4	4,6	60,6	18,3
2016	26,8	3,8	136,8	14,3
2017	5,0	3,1	44,0	17,1
2018	0,8	1,1	7,2	7,2

Fuente: Elaboración propia en base a Información hidrometeorológica BNA-DGA

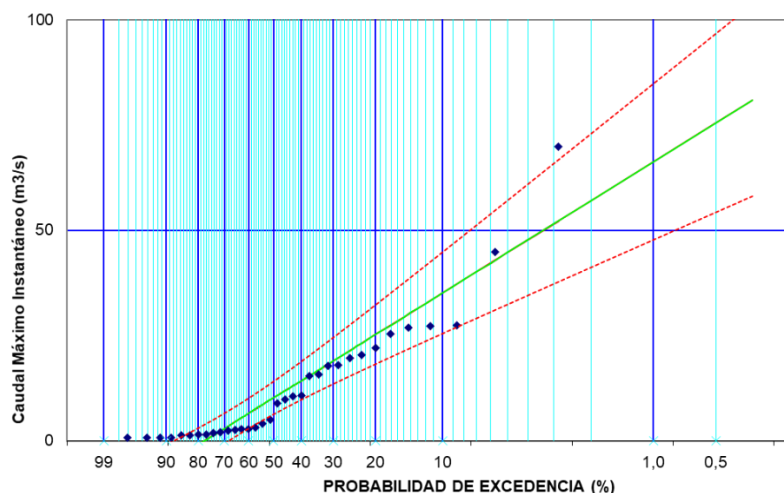
A partir de esta información se realizó un análisis de frecuencia tanto para las series de verano (asociadas a caudales de deshielo) como de invierno (asociada a caudales pluviales), obteniéndose valores mayores a partir de las series pluviales. Los resultados para la estación Estero Arrayán en La Montosa se presentan en el Cuadro N° 8.3-23. Es posible observar que únicamente la distribución Gumbel es aceptada, de acuerdo con el test chi-cuadrado, por lo que se toman estos resultados. El análisis gráfico (Figura N° 8.3—22) muestra que los valores para periodos de retorno altos podrían estar siendo subestimados, por lo que resulta fundamental considerar el rango que entrega el intervalo de confianza, que, según lo presentado en el Cuadro N° 8.3-24, entrega valores entre 48 y 85 m³/s para un periodo de retorno de 100 años.

Cuadro N° 8.3-23: Análisis de frecuencia serie caudales máximos estación Estero Arrayán en La Montosa, periodo pluvial (1985 – 2018)

Período de Retorno (años)	Caudal Máximo Instantáneo (m³/s)				
	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
2	13	6	8	6	10
5	25	18	21	18	25
10	32	33	31	33	35
20	37	54	42	54	45
25	39	63	45	62	48
50	43	94	56	92	57
100	47	136	67	131	66
χ^2 (calculado)=	19,33	12,53	6,08	13,46	4,84
χ^2 (0,05)=	5,99	5,99	3,84	3,84	5,99
Test	Rechazado	Rechazado	Rechazado	Rechazado	Aceptado
Razón	0,310	0,478	0,632	0,285	1,238

Fuente: Elaboración propia en base a Información hidrometeorológica BNA-DGA

Figura N° 8.3—22: Distribución Gumbel, análisis de frecuencia serie caudales máximos estación Estero Arrayán en La Montosa, periodo pluvial (1985 – 2018)



Fuente: Elaboración propia en base a Información hidrometeorológica BNA-DGA

Cuadro N° 8.3-24: Resultados distribución Gumbel, análisis de frecuencia serie caudales máximos estación Estero Arrayán en La Montosa, periodo pluvial (1985 – 2018)

Período de Retorno	Caudal Máximo Instantáneo (m³/s) - Distribución Gumbel		
(años)	Resultado	Límite Inferior	Límite Superior
2	10	6	14
5	25	18	32
10	35	26	45
20	45	32	57
25	48	35	61
50	57	41	73
100	66	48	85

Fuente: Elaboración propia en base a Información hidrometeorológica BNA-DGA

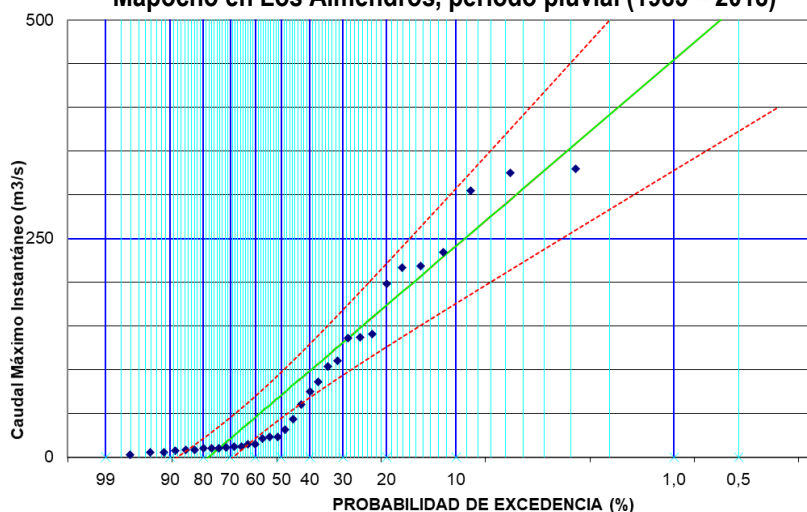
Los resultados para la estación Río Mapocho en Los Almendros se presentan en el Cuadro N° 8.3-25. El test chi-cuadrado acepta los resultados entregados por las distribuciones Log-normal, Pearson y Gumbel. De acuerdo con el análisis gráfico, la serie que mejor se ajusta, y que es además la que presenta una un mayor valor para el test chi-cuadrado, es la distribución Gumbel, por lo que se han seleccionado estos resultados (Figura N° 8.3—23). El rango que entrega el intervalo de confianza, según lo presentado en el Cuadro N° 8.3-25, es entre 328 y 541 m³/s para un periodo de retorno de 100 años.

Cuadro N° 8.3-25: Análisis de frecuencia serie caudales máximos estación Río Mapocho en Los Almendros, periodo pluvial

Período de Retorno (años)	Caudal Máximo Instantáneo (m³/s)				
	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
2	87	37	67	37	71
5	173	124	161	123	174
10	218	231	223	235	242
20	255	388	281	404	307
25	265	451	300	473	328
50	296	695	356	748	391
100	324	1.024	411	1.133	454
χ^2 (calculado)=	7,22	4,68	2,84	12,28	2,45
χ^2 (0,05)=	5,99	5,99	3,84	3,84	5,99
Test	Rechazado	Aceptado	Aceptado	Rechazado	Aceptado
Razón	0,829	1,280	1,353	0,313	2,441

Fuente: Elaboración propia en base a Información hidrometeorológica BNA-DGA

Figura N° 8.3—23: Distribución Gumbel, análisis de frecuencia serie caudales máximos estación Río Mapocho en Los Almendros, periodo pluvial (1985 – 2018)



Fuente: Elaboración propia en base a Información hidrometeorológica BNA-DGA

Cuadro N° 8.3-26: Resultados distribución Gumbel, análisis de frecuencia serie caudales máximos estación Río Mapocho en Los Almendros, periodo pluvial (1985 – 2018)

Período de Retorno (años)	Caudal Máximo Instantáneo (m³/s) - Distribución Gumbel		
	Resultado	Límite Inferior	Límite Superior
2	71	45	98
5	174	126	222
10	242	176	308
20	307	223	391
25	328	237	418
50	391	283	500
100	454	328	581

Fuente: Elaboración propia en base a Información hidrometeorológica BNA-DGA

Finalmente, se han comparado las áreas aportantes asociadas a cada estación fluviométrica, con las áreas delimitadas para las cuencas en el presente estudio, de acuerdo a los puntos de cierre de interés (ver Cuadro N° 8.3-27). A partir de estos valores se realiza una transposición por áreas, despreciando el efecto de la diferencia en las precipitaciones, dada la similitud de las áreas, obteniendo los resultados presentados en el Cuadro N° 8.3-28.

Cuadro N° 8.3-27: Comparación áreas de cuencas aportantes

Cuenca	Área Estudio (km²)	Área cuenca aportantes estación (km²)
Estero Arrayan	230,8	210
Río Mapocho	651,0	620

Cuadro N° 8.3-28: Caudales máximos instantáneos cuencas Estero Arrayán y Río Mapocho

Período de Retorno (años)	Esterio Arrayan	Río Mapocho
2	10	71
5	25	174
10	35	242
20	45	307
25	48	328
50	57	391
100	66	454

Fuente: Elaboración propia (2021)

iii) Cuencas sin control fluviométrico

Para estimar los caudales en las cuencas sin control fluviométrico se utilizan relaciones precipitación – escorrentía, válidas de acuerdo con las áreas de las cuencas estudiadas. En el caso de las cuencas menores a 25 km² se utiliza la fórmula racional presentada en el Manual de Carreteras (MOP, 2018), mientras que para cuencas mayores a 20 km² se utilizarán las metodologías presentadas en el Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica (DGA-MOP, 1995). Las metodologías Fórmula Racional DGA, Verni-King Modificado y DGA-AC para crecidas pluviales fueron calibradas para cuencas entre 20 y 20.000 km², mientras que el Hidrograma Unitario lo fue para cuencas entre 10 y 4.000 km². El detalle de cada una de estas fórmulas se incluye en la sección 0 de este Apéndice.

i. Análisis de Precipitaciones Máximas en 24 horas

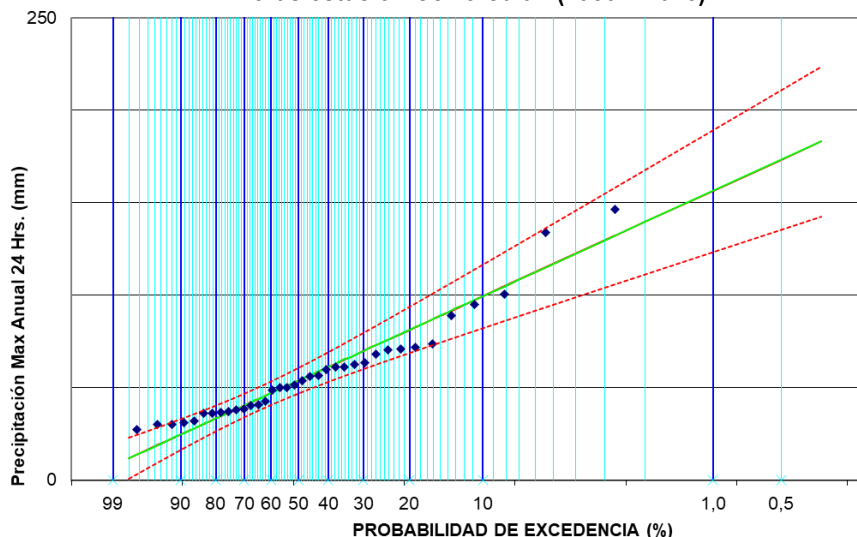
Se estimaron en primer lugar las precipitaciones asociadas a los distintos periodos de retorno. Para esto, y de acuerdo con la distribución espacial de estaciones meteorológicas presentada en la Figura N° 8.3—12 y a la extensión de las series de datos presentada en el Cuadro N° 8.3-29, se ha considerado una estación base para la definición de las precipitaciones máximas en 24 horas, que corresponde a la estación Cerro Calán, ubicada a 848 msnm, que es la estación más cercana con un registro de datos mayor a 20 años. Para complementar el análisis anterior, dado que las cuencas estudiadas se encuentran a mayores cotas, pero no se cuenta con estaciones con un buen registro a mayores alturas, se revisaron las precipitaciones máximas en 24 horas determinadas en la publicación “Precipitaciones Máximas en 1, 2 y 3 días” (DGA-MOP, 1991) y las definidas en el Plan Maestro de Aguas Lluvias del Gran Santiago PM-01 (CADE Consultores en Ingeniería, 2001)

Los resultados del análisis de frecuencia de los datos en la estación Cerro Calán se presentan en el Cuadro N° 8.3-29, los cuales indican que las distribuciones de frecuencia aceptadas, de acuerdo con el test chi-cuadrado son Log-normal, Pearson y Gumbel. Al analizar gráficamente los resultados, el mejor ajuste corresponde a la distribución Gumbel (ver Figura N° 8.3—22), lo que indica una precipitación de 99 y 156 mm para periodos de retorno de 10 y 100 años, respectivamente, con valores para el intervalo de confianza de acuerdo con lo indicado en el Cuadro N° 8.3-30.

Cuadro N° 8.3-29: Análisis de frecuencia serie precipitaciones máximas en 24 horas estación Cerro Calán

Período de Retorno (años)	Precipitación máxima anual en 24 hrs (mm)				
	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
2	58	53	51	51	54
5	81	75	76	74	81
10	93	90	94	92	100
20	103	105	112	111	117
25	106	110	117	118	122
50	114	125	134	140	139
100	122	140	152	165	156
χ^2 (calculado)=	13,55	3,94	3,17	4,10	3,83
χ^2 (0,05)=	5,99	5,99	3,84	3,84	5,99
Test	Rechazado	Aceptado	Aceptado	Rechazado	Aceptado
Razón	0,442	1,519	1,211	0,936	1,566

Fuente: Elaboración propia en base a Información hidrometeorológica BNA-DGA

Figura N° 8.3—24: Distribución Gumbel, análisis de frecuencia serie precipitaciones máximas en 24 horas estación Cerro Calán (1983 – 2018)

Fuente: Elaboración propia en base a Información hidrometeorológica BNA-DGA

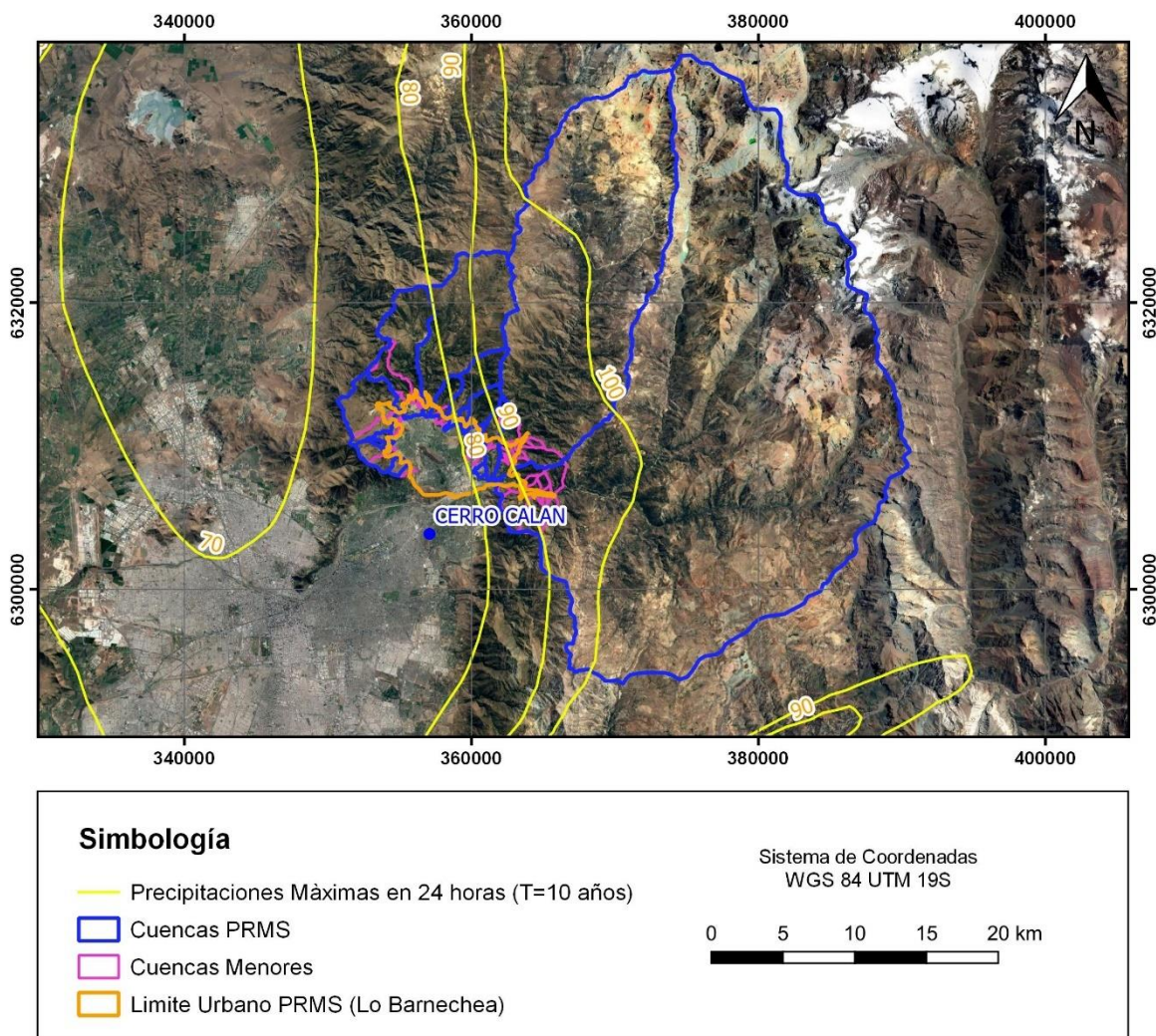
Cuadro N° 8.3-30: Resultados distribución Gumbel, análisis de frecuencia precipitaciones máximas en 24 horas estación Cerro Calán (1983 – 2018)

Período de Retorno (años)	Precipitaciones Máximas en 24 horas (mm) - Distribución Gumbel		
	Resultado	Límite Inferior	Límite Superior
2	54	47	61
5	81	69	94
10	100	82	117
20	117	95	139
25	122	99	146
50	139	111	168
100	156	123	189

Fuente: Elaboración propia en base a Información hidrometeorológica BNA-DGA

Adicionalmente, se presenta en la Figura N° 8.3—25 el trazado de las isoyetas de precipitación máxima en 24 horas (DGA-MOP, 1991), que entregan valores entre los 70 y los 100 mm para las cuencas estudiadas, asociadas a un periodo de retorno de 100 años. Por último, el análisis de precipitación desarrollado en el PM-01 (CADE Consultores en Ingeniería, 2001) entrega valores de precipitación para 10 años de periodo de retorno que van entre 72 y 95 mm en la zona de estudio. De esta forma, y a falta de mayores antecedentes con respecto a las precipitaciones en zonas más altas, se optará por un criterio conservador, respecto a los estudios anteriores, considerando una precipitación de 100 mm para todas las cuencas estudiadas (no considera el río Mapocho), para un periodo de retorno de 100 años.

Figura N° 8.3—25: Isoyetas precipitaciones máximas en 24 horas



Fuente: Elaboración propia en base a DGA (1991)

ii. Cuencas Menores - Fórmula Racional – Manual de Carreteras (MOP, 2018)

Los caudales en las cuencas menores, dado que todas tienen un área menor a 25 km², se estimaron a partir de la fórmula racional, de acuerdo con la definición del Manual de Carreteras (MOP, 2018). En el Cuadro N° 8.3-18 se presenta el análisis del tiempo de concentración realizado para cada cuenca, y el valor seleccionado. El valor se estima utilizando las fórmulas: Normas Españolas, California Culverts y Giandotti, quedando esta última solo para aquellas cuencas que cumplen las restricciones correspondientes. De acuerdo con las

recomendaciones del Manual, no se consideran tiempos de concentración menores a 10 minutos. Posteriormente, se estiman las precipitaciones asociadas al tiempo de concentración para distintos periodos de retorno (ver Cuadro N° 8.3-19), a partir de la precipitación máxima en 24 horas de 100 mm para T=10 años, de acuerdo con lo indicado en el punto anterior. Finalmente, se estima el caudal máximo instantáneo, considerando valores de coeficientes de escorrentía según el detalle del Cuadro N° 8.3-31.

Cuadro N° 8.3-31: Caudales de crecida estimados para distintos periodos de retorno

N°	Cuenca	Coeficiente de escorrentía (T=10 años)	Caudales Máximos (m³/s)					
			T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100
1	Oscura	0,48	6,8	8,8	10,3	13,5	16,5	19,1
2	Afluente Oscura III	0,51	0,6	0,7	0,9	1,1	1,4	1,6
3	Q2	0,52	2,1	2,7	3,1	4,1	5,0	5,8
4	Q3	0,54	1,0	1,3	1,5	2,0	2,4	2,8
5	Q21	0,56	1,6	2,1	2,4	3,2	3,9	4,5
6	Las Lechuzas	0,54	5,5	7,1	8,3	10,9	13,3	15,4
7	Los Clarines	0,52	1,8	2,4	2,8	3,6	4,4	5,1
8	Q7	0,54	1,6	2,0	2,4	3,1	3,8	4,4
9	Los Quillayes	0,47	5,7	7,3	8,6	11,2	13,7	15,9
10	Q11	0,52	1,3	1,7	2,0	2,6	3,2	3,7
11	La Carbonera I	0,52	5,7	7,4	8,6	11,3	13,8	15,9
12	Q10	0,52	1,1	1,4	1,6	2,1	2,6	3,0
13	Huallalolén	0,58	7,9	10,2	12	17,9	19,2	22,2
14	La Laguna	0,46	1,3	1,7	2,0	2,6	3,2	3,7
15	Quebrada Grande/Las Nipas	0,46	1,6	2,0	2,4	3,1	3,8	4,4
16	Q9	0,52	0,8	1,0	1,2	1,5	1,8	2,1
17	Los Pitufos (Nido de Águilas)	0,52	1,4	1,9	2,2	2,9	3,5	4,0
18	Q13	0,54	2,0	2,6	3,0	3,9	4,8	5,6
19	Del Ñilhue	0,58	6,1	7,9	9,2	12,5	14,8	17
20	Q15	0,59	3,0	3,9	4,6	6,0	7,3	8,4
21	Q14	0,59	2,2	2,8	3,3	4,4	5,3	6,2
22	Las Varas	0,24	3,8	5,0	5,8	7,6	9,3	10,7
23	Q19	0,56	1,8	2,4	2,8	3,6	4,4	5,1
24	El Parrón	0,56	8,5	11,0	12,9	16,9	20,6	23,8
25	Q18	0,57	0,7	0,9	1,1	1,4	1,8	2,0
26	Q17	0,57	1,0	1,2	1,4	1,9	2,3	2,7
27	Q16	0,56	3,0	3,9	4,6	6,0	7,3	8,5
28	Afluente Oscura II	0,51	0,5	0,7	0,8	1,0	1,3	1,5
29	Afluente Oscura I	0,51	0,6	0,7	0,8	1,1	1,4	1,6
30	Q12	0,56	2,0	2,6	3,1	4,1	5,0	5,7
31	Chorro de la Vieja	0,54	1,4	1,7	2,0	2,7	3,3	3,8

Fuente: Elaboración propia (2021)

iii. Cuencas PRMS - Fórmula Racional – Manual de Carreteras (MOP, 2018)

Repitiendo la metodología anterior, se estimó el caudal de crecida asociado a las cuencas reguladas por el PRMS menores a 25 km². En el Cuadro N° 8.3-20 se presenta el análisis del tiempo de concentración realizado para cada cuenca, y el valor seleccionado. El valor se estima utilizando las fórmulas: Normas Españolas, California Culverts y Giandotti, quedando esta última solo para aquellas cuencas que cumplen las restricciones correspondientes. De acuerdo con las recomendaciones del Manual, no se consideran tiempos de concentración menores a 10 minutos. Posteriormente, se estiman las precipitaciones asociadas al tiempo de concentración para distintos periodos de retorno (ver

Cuadro N° 8.3-21), a partir de la precipitación máxima en 24 horas de 100 mm para T=10 años, de acuerdo con lo indicado en el punto anterior. Finalmente, se estima el caudal máximo instantáneo, considerando valores de coeficientes de escorrentía según el detalle del Cuadro N° 8.3-32.

Cuadro N° 8.3-32: Caudales de crecida estimados para distintos periodos de retorno

N°	Cuenca	Coeficiente de escorrentía (T=10 años)	Caudales Máximos (m ³ /s)					
			T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100
1	Qda. El Aji	0,47	4,8	6,2	7,2	9,5	12,1	13,4
2	Qda. Las Zorras	0,53	1,8	2,3	2,7	3,6	4,3	5,0
3	Qda. El Gabino	0,5	6,1	7,9	9,3	12,1	15,5	17,2
4	Qda. El Peumo	0,5	8,1	10,4	12,2	16,0	20,4	22,6
5	Qda. Las Rosas	0,44	1,8	2,3	2,7	3,5	4,4	4,9
6	Qda. El Manzano	0,54	14,3	18,5	21,6	28,3	36,1	40,0
7	Qda. El Culén	0,51	7,3	9,4	11,0	14,4	18,3	20,3
9	Qda. Oscura	0,47	25,2	32,4	37,9	49,7	63,4	70,3
10	Qda. Carrizo	0,46	19,9	25,6	30,0	39,3	50,1	55,5
11	Qda. Los Chanchos	0,5	2,4	3,1	3,6	4,8	6,1	6,8
12	Qda. La Carbonera	0,53	8,3	10,7	12,5	16,4	20,9	23,2
13	Qda. El Guindo	0,55	3,7	4,8	5,6	7,3	8,9	10,3

iv. Cuencas PRMS – Fórmulas Manual DGA (DGA-MOP, 1995)

Del total de cuencas analizadas en el PRMS, existen 3 cuyas áreas son mayores a 20 km² y por ende fueron analizadas considerando las metodologías del Manual de la DGA. Estas cuencas corresponden a la Qda. Oscura, al estero Hualtatas y al estero El Arrayán. Adicionalmente, se agrega una cuarta cuenca que corresponde a la cuenca del estero Hualtatas en el punto de cierre definido anteriormente. En el Cuadro N° 8.3-33 se presentan las características morfológicas de las cuencas, considerando en este caso las cuencas bajo los 2.000 msnm, que corresponden al aporte pluvial.

Cuadro N° 8.3-33: Parámetros morfológicos para definición de caudales según Manual DGA (Área bajo los 2.000 msnm)

Cuenca	Área (km²)	Área Pluvial (km²)	Altura media (msnm)	Altura mínima (msnm)	Altura máxima (msnm)	Pendiente media (%)	Longitud cauce (m)
Qda. Oscura	23,6	23,6	1.417	883	2.000	28,9	10,5
Estero Hualtatas	44,1	26,5	1.565	926	2.006	32,8	10,7
Estero Hualtatas 2	97,2	79,7	1.394	828	2.006	28,6	15,0
Estero Arrayán	230,8	73,9	1.590	869	2.020	47,0	20,4

15. Tiempo de Concentración

Al igual que en los puntos anteriores, es necesario determinar el tiempo de concentración para cada cuenca estudiada. A partir de los parámetros morfológicos de cada cuenca se define el tiempo de concentración, de acuerdo con el detalle del Cuadro N° 8.3-34.

Cuadro N° 8.3-34: Tiempos de concentración estimados, cuencas PRMS

Cuenca	Tiempo de Concentración (minutos)			
	Normas españolas	California Culverts	Giandotti	Seleccionado
Qda. Oscura	56	114	136	96
Estero Hualtatas	60	126	135	97
Estero Hualtatas Grande	86	204	179	132
Estero Arrayán	123	255	206	164

16. Método DGA-AC

Para utilizar la relación precipitación escorrentía mediante el método DGA-AC se definió en primer lugar la zona homogénea asociada a las tres cuencas. Dado que se trata de cuencas pertenecientes a cuencas entre Aconcagua y Rapel, con precipitación media anual menor a 600 mm, precipitación máxima en 24 horas para 10 años de periodo de retorno mayor a 80 mm, las zonas corresponden a Np (Estero Arrayán) y Op (Qda. Oscura y Estero Hualtatas). Para estas zonas se tienen las curvas de frecuencias de caudal medio diario regional adimensionalizadas con el valor de período de retorno de 10 años indicadas en el Cuadro N° 8.3-35.

Cuadro N° 8.3-35: Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos Zona Homogénea Op y Np Pluvial

Zona Op				Zona Np			
T [años]	Media	Max	Min	T [años]	Media	Max	Min
2	0,46	0,3	0,21	2	0,2	0,18	0,16
5	0,72	0,64	0,59	5	0,57	0,56	0,54
10	1,00	1,00	1,00	10	1,00	1,00	1,00
20	1,55	1,48	1,39	20	1,67	1,61	1,59
50	1,76	1,67	1,55	50	1,94	1,86	1,81
100	2,53	2,35	2,16	100	2,98	2,77	2,66

Fuente: DGA (1995)

Por último, y de acuerdo con lo señalado en el Manual DGA, el factor de conversión desde caudal medio diario máximo a caudal instantáneo máximo es de 1,87 en la zona Np y de 1,76 en la zona Op.

Aplicando la ecuación correspondiente a las zonas estudiadas, se estiman los caudales en las cuencas para distintos periodos de retorno, resultados que se incluyen en el Cuadro N° 8.3-36.

Cuadro N° 8.3-36: Caudales de crecida (m³/s) estimados a partir de métodos DGA-AC

Cuenca	Método		Periodo de Retorno [años]					
			2	5	10	20	50	100
Qda. Oscura	DGA-AC	Mínimo	2,1	7,2	13,4	21,3	35,6	50,3
		Medio	2,4	7,5	13,4	21,5	37,1	53,1
		Máximo	2,7	7,6	13,4	22,3	39,9	58,6
Estero Hualtatas	DGA-AC	Mínimo	2,4	8,0	14,8	23,6	39,5	55,8
		Medio	2,7	8,3	14,8	23,9	41,1	58,9
		Máximo	3,0	8,5	14,8	24,8	44,2	65,0
Estero Hualtatas Grande	DGA-AC	Mínimo	6,5	22,0	40,7	64,7	108,3	153,0
		Medio	7,3	22,8	40,7	65,5	112,7	161,6
		Máximo	8,1	23,2	40,7	68,0	121,3	178,3
Estero Arrayán	DGA-AC	Mínimo	7,5	21,1	35,7	49,7	77,2	107,2
		Medio	10,7	22,9	35,7	52,9	84,0	115,8
		Máximo	16,4	25,7	35,7	55,4	90,4	125,4

Fuente: Elaboración propia (2021)

17. Estimación de caudal mediante método Verni-King Modificado

Se estima el caudal instantáneo máximo para los distintos periodos de retorno a partir del método de Verni-King Modificado, considerando el coeficiente empírico de frecuencia que para período de retorno de 10 años para la VI Región (0,68) y la curva de frecuencia correspondiente. Se ha considerado el coeficiente de la VI Región dado que el Manual no establece un valor para la Región Metropolitana, y se ha considerado el resultado más desfavorable entre utilizar el coeficiente de la V o VI Región. Los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro N° 8.3-37

Cuadro N° 8.3-37: Caudales de crecida (m³/s) estimados a partir de métodos Verni-King

Cuenca	Método	Periodo de Retorno (años)					
		2	5	10	20	50	100
Qda. Oscura	Verni-King Modificado	6,6	13,8	20,5	28,4	39,4	53,4
Estero Hualtatas	Verni-King Modificado	7,3	15,3	22,7	31,3	43,5	59,1
Estero Hualtatas Grande	Verni-King Modificado	19,2	40,3	59,8	82,7	114,9	155,8
Estero Arrayán	Verni-King Modificado	17,9	37,7	55,9	77,3	107,5	145,7

Fuente: Elaboración propia (2021)

18. Estimación de caudal mediante Fórmula Racional DGA

Se estima el caudal instantáneo máximo para los distintos periodos de retorno a partir de la Fórmula Racional DGA, considerando el coeficiente empírico de frecuencia que para período de retorno de 10 años para la VI Región (0,31) y la curva de frecuencia. Al igual que en el caso del método Verni-King Modificado, se ha considerado el coeficiente de la VI Región, dado que el Manual no establece un valor para la Región

Metropolitana, y se ha considerado el resultado más desfavorable entre utilizar el coeficiente de la V o VI Región. Los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro N° 8.3-38

Cuadro N° 8.3-38: Caudales de crecida (m^3/s) estimados a partir de Fórmula Racional DGA

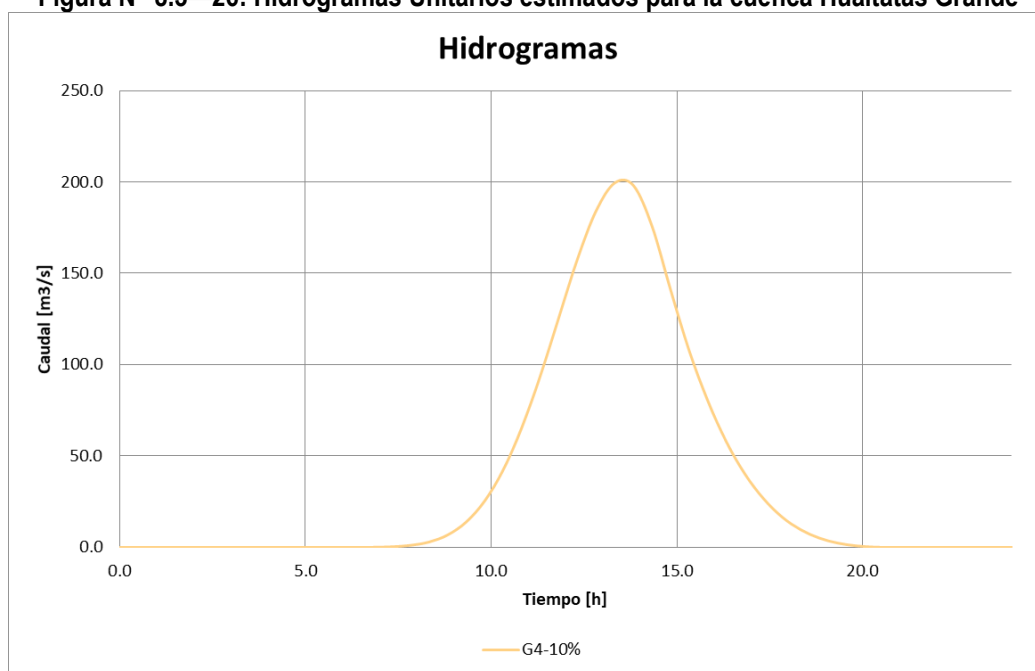
Cuenca	Método	Periodo de Retorno (años)					
		2	5	10	20	50	100
Qda. Oscura	Fórmula Racional	12,0	23,1	32,8	43,7	58,4	77,3
Estero Hualtatas	Fórmula Racional	12,3	23,8	33,7	45,0	60,0	79,4
Estero Hualtatas Grande	Fórmula Racional	31,9	61,6	87,3	116,5	155,5	205,8
Estero Arrayán	Fórmula Racional	28,7	55,3	78,4	104,6	139,7	184,8

Fuente: Elaboración propia (2021)

19. Estimación de caudal mediante Hidrograma Unitario (HU)

En particular para el modelo hidráulico del Estero Hualtatas se ha optado por desarrollar un Modelo 2D, el cual requiere como variables de entrada un hidrograma de crecida, y no únicamente el caudal máximo, tal como es requerido por los Modelos 1D en régimen estacionario. Debido a lo anterior se ha construido para la cuenca del Estero Hualtatas 2 un HU, de acuerdo con la metodología presentada en el Apéndice 8.3.5, letra 0, número iv). El resultado obtenido se presenta en la Figura N° 8.3—26, con un caudal máximo cercano a los 200 (m^3/s), para un periodo de retorno de 100 años.

Figura N° 8.3—26: Hidrogramas Unitarios estimados para la cuenca Hualtatas Grande



Fuente: Elaboración propia (2021)

20. Caudales seleccionados

Finalmente, luego de comparar los resultados obtenidos para cada cuenca se selecciona el caudal asociado a cada periodo de retorno. Para esto se utiliza un criterio conservador, con lo cual los resultados obtenidos son aquellos asociados a la Fórmula Racional, presentados en el Cuadro N° 8.3-39.

Cuadro N° 8.3-39: Caudales de crecida (m³/s) seleccionados

Cuenca	Periodo de Retorno (años)					
	2	5	10	20	50	100
Qda. Oscura	12,0	23,1	32,8	43,7	58,4	77,3
Estero Hualtatas	12,3	23,8	33,7	45,0	60,0	79,4
Estero Hualtatas 2	31,9	61,6	87,3	116,5	155,5	205,8
Estero Arrayán	28,7	55,3	78,4	104,6	139,7	184,8

Fuente: Elaboración propia (2021)

f) Hidrología subterránea

El objetivo de esta caracterización es identificar la profundidad a la cual se encuentra el nivel piezométrico en la comuna, para contar con un insumo que pudiera entregar información relativa a la profundidad del nivel piezométrico. Esta información es necesaria para proteger las aguas subterráneas de la comuna.

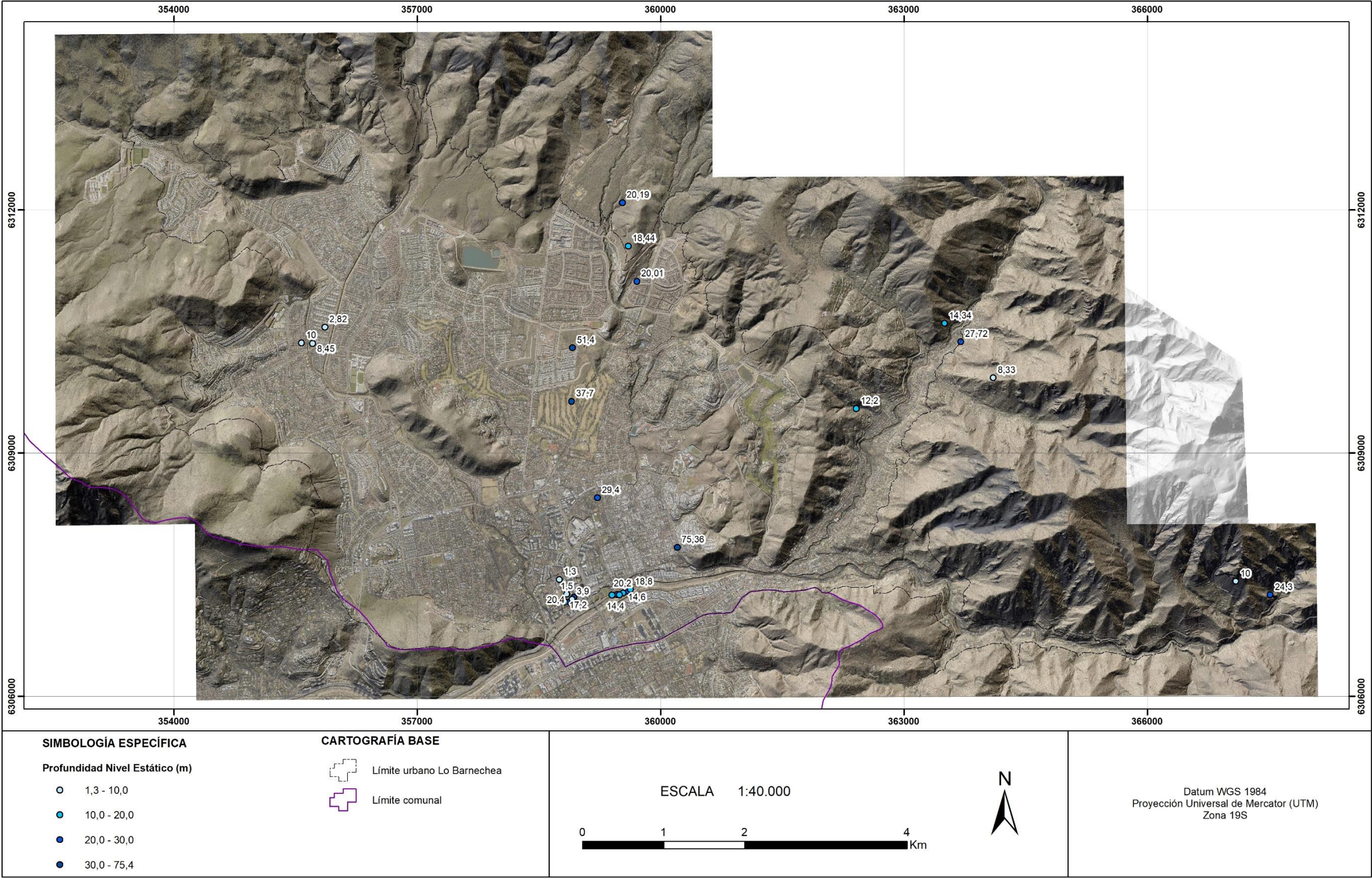
Para lograr el objetivo propuesto, se recopilaron antecedentes de niveles medidos en pozos de la comuna de Lo Barnechea, que se concentran principalmente alrededor del río Mapocho (Figura N° 8.3—27). En el resto del área urbana de la comuna, la densidad de pozos es baja.

De la totalidad de los pozos revisados, en los únicos sectores donde se midieron niveles cercanos a la superficie son un pozo ubicado junto a la quebrada El Carrizo, cerca del cruce de la calle El Golf de Manquehue (a una profundidad del orden de 3 m), y dos pozos que se encuentran alrededor del estero Las Hualtatas, cerca de la confluencia con el río Mapocho (a profundidades entre 1 y 2 m, aunque esta condición no es similar en todos los pozos que se encuentran en este sector). En el resto del área, los niveles se encuentran a profundidades del orden de 10 m o mayores.

Pese a que se han identificado solo dos sectores donde el nivel freático se encuentra cerca de la superficie, no se puede descartar que existan otros sectores donde, producto de las condiciones geológicas locales, se pudieran encontrar napas colgadas a una profundidad menor que los niveles freáticos medidos. Estas se podrían encontrar principalmente cerca de los cauces del área urbana de la comuna.

Tanto los sectores donde el acuífero se encuentra cerca de la superficie como las eventuales napas colgadas que pudieran existir determinan que el agua subterránea puede estar cerca de la superficie y, por lo tanto, es necesario establecer medidas destinadas a proteger las aguas subterráneas. Por otra parte, las napas colgadas no son relevantes para el escurrimiento en los cauces de la comuna.

Figura N° 8.3—27: Pozos con información de nivel freático en Área Urbana Sector Valle de Lo Barnechea



Fuente: Elaboración propia (2021)

8.3.6 Línea Base de Sismicidad

El contexto geodinámico de subducción dado por la convergencia entre las placas de Nazca y Sudamericana, emplaza 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 interplacas, lo que genera acumulación de energía que es liberada generando grandes terremotos. Los sismos presentan una clara distribución, 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.

a) Tipos de sismos

Existen cuatro tipos de sismos que afectan al territorio chileno, y estos se reconocen 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 Apéndice 8.2.1 letra a).

En el área de estudio, el contacto entre las placas se extiende entre los 44 Km (Tichelaar & Ruff., 1993) y los 51 Km (Hayes, Wald, & Johnson, 2012) de profundidad, en esta zona ocurren la mayoría de los hipocentros de los terremotos que han ocurrido en la zona central. Entre este tipo de terremotos destacan: 1730, 1906 y 1985; cuyos largos de ruptura se ilustran en la Figura N° 8.3—28. Adicionalmente, el área de estudio ha sido afectada por sismos intraplaca de profundidad intermedia, tales como los de 1647, 1965 y 1971; y otros sismos de magnitud cercana a 7 con características de terremoto, como el sismo de 1822.

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 esta fecha. Las rupturas de los terremotos anteriores a esta fecha fueron estimadas a partir de datos históricos y la intensidad de los daños de cada uno de los eventos con la metodología propuesta por Kausel & Ramírez (1992). A continuación, se muestran los datos de los sismos de subducción con magnitud superior a 7.2 con zona de ruptura frente al área de estudio.

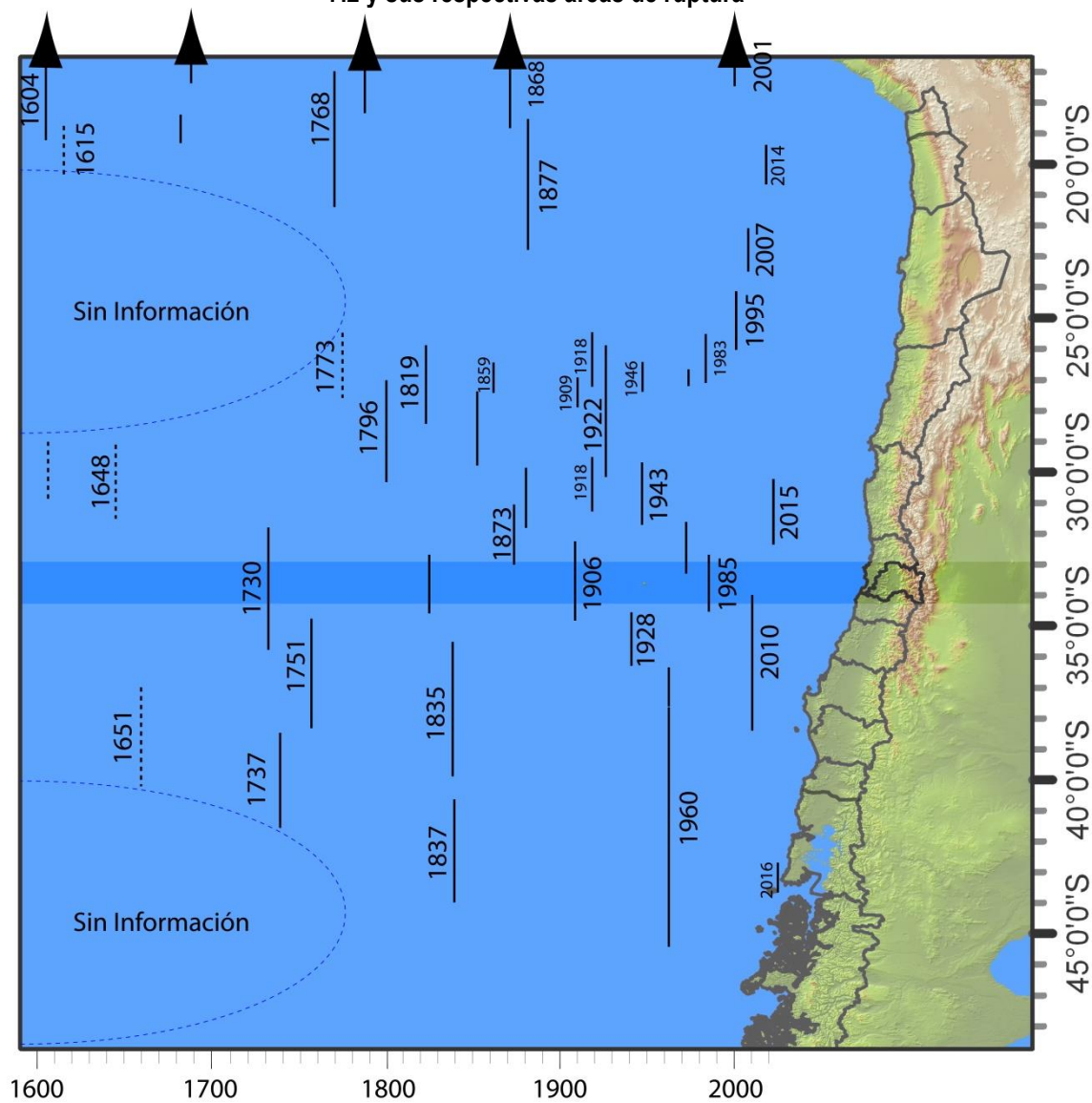
Cuadro N° 8.3-40: Datos de terremotos históricos de subducción con magnitud superior a 7.2 cuya zona de ruptura coincide con el área de estudio.

Latitud	Longitud	Profundidad	Magnitud Aprox.	Año	Mes	Día
-33.05	-71.63	-	8.9	1730	07	07
-33 ≈	-	25	8.2	1906	08	16
-32.01	-71.17	50 a 60 km	7.6	1965	03	28
-32.45	-71.57	60	7.7	1971	07	08
-33.24	-72.04	33	7.7	1985	03	03

Fuente: Elaboración propia (2021)

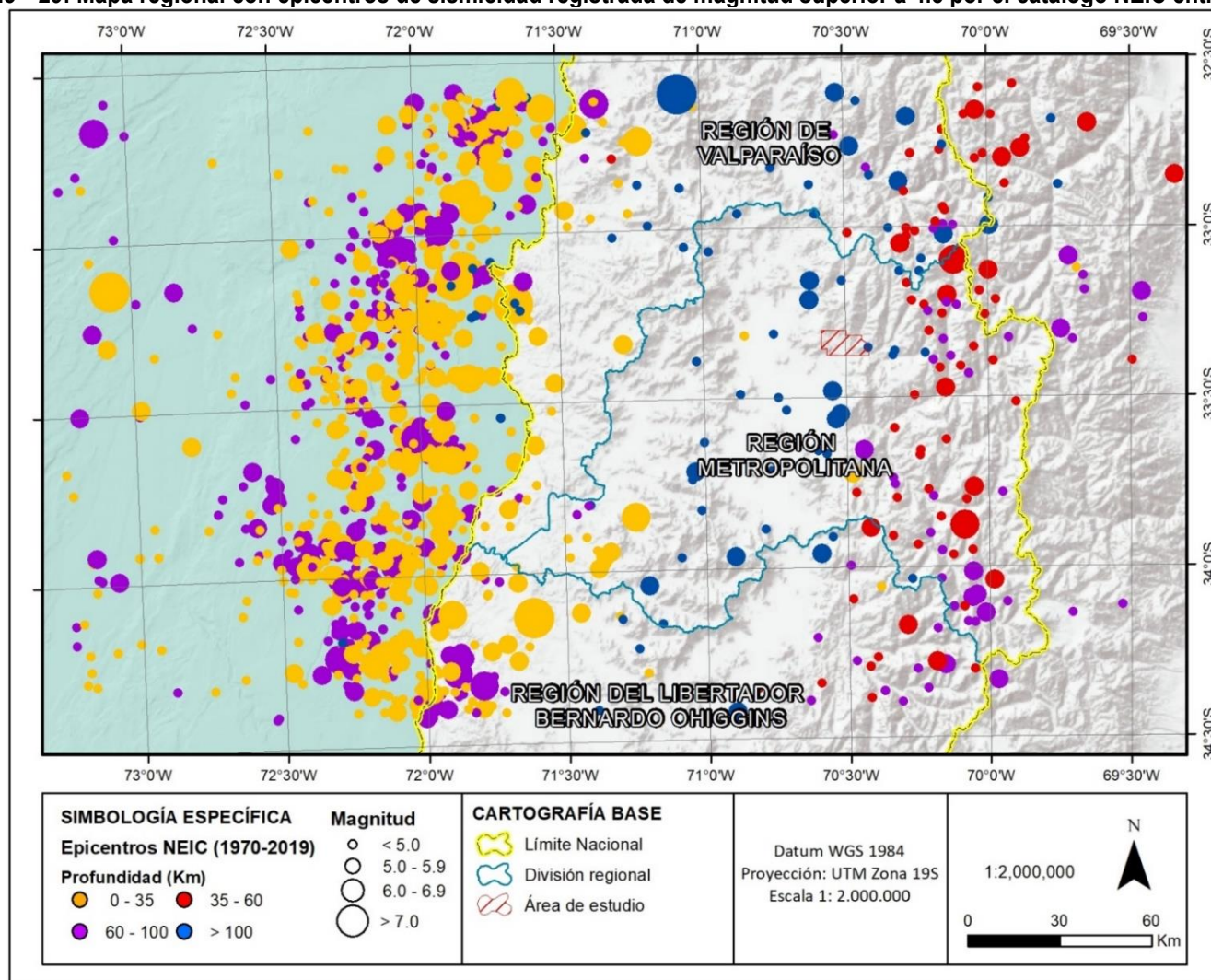
Estos sismos anteriormente citados como terremotos de subducción, son denominados por su fuente sísmica como interplaca tipo *thrust*, y tal como se mencionó representan un tipo de las cuatro fuentes que pueden afectar al territorio. A partir de la sismicidad registrada por la red sismológica internacional se puede visualizar la distribución de las cuatro fuentes que se describirán a continuación (Figura N° 8.3—29).

Figura N° 8.3—28: Terremotos de subducción históricos con magnitud estimada y calculada mayor a 7.2 y sus respectivas áreas de ruptura



Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.3—29: Mapa regional con epicentros de sismicidad registrada de magnitud superior a 4.5 por el catálogo NEIC entre 1970 y 2019



Fuente: Elaboración propia (2021)

En Figura N° 8.3—29 se pueden observar cuatro grupos subparalelos de franjas sísmicas, sobre el océano al extremo oeste de la figura se emplazan los sismos con fuente *outer-rise*, en la costa donde hay una mayor densidad de puntos se ubican los sismos con fuente interplaca tipo *thrust*, luego sobre el continente, donde se emplazan los valles centrales la fuente sísmica se denomina interplaca de profundidad intermedia, y en la zona cordillerana se generan los de fuente cortical. Las observaciones que se pueden realizar en la franja espacial entre los 32° y 34° aproximadamente, son las siguientes:

1. La mayor concentración de sismicidad en el periodo registrado por el catálogo NEIC se dispone en la línea paralela a la costa y mayormente sobre los 35 Km de profundidad. Son estos terremotos los que se generarían en el contacto de las placas, es decir, interplaca. Ejemplo de este sismo es el terremoto de 1985 de magnitud 7.2 Mw a 38 Km de profundidad según catálogo NEIC.
2. En la zona central sobre el continente, donde se ubican los valles transversales al norte y el valle central a la latitud de Santiago, la densidad de los sismos es menor que los terremotos interplaca y ocurren a una profundidad mayor a 100 Km (color azul). Estos sismos corresponden a la fuente sísmica intraplaca y dentro de esta categoría destacan los terremotos de 1965 y 1971 con profundidades entre 50 y 60 Km y magnitudes 7.6 M.w y 7.7 M.w respectivamente, este último se puede observar en la Figura N° 8.3—29. Estos eventos afectaron fuertemente a la Región Metropolitana.
3. En la franja cordillerana con una distribución más dispersa se ubican los terremotos cordilleranos de menor magnitud que el resto de los sismos. Estos sismos están asociados a la deformación actual de la cordillera.

En resumen, el área de estudio se encuentra expuesta a la ocurrencia de tres tipos de sismos observables en la Figura N° 8.3—29, (1) sismos interplaca tipo *thrust*; (2) sismos intraplaca de profundidad intermedia, (3) sismos cordilleranos.

- **Sismos interplaca tipo *thrust***

Como se ha mencionado, esta fuente sismogénica ocurre en el contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana, estos eventos que suelen tener grandes magnitudes generan terremotos con alta capacidad de daños a la infraestructura. En la zona de estudio destacan los terremotos de Valparaíso de 1906 con magnitud 8.2 Mw y de Algarrobo de 1985 con magnitud 7.8 según el Centro Sismológico Nacional (CSN)².

- **Sismos intraplaca de profundidad intermedia**

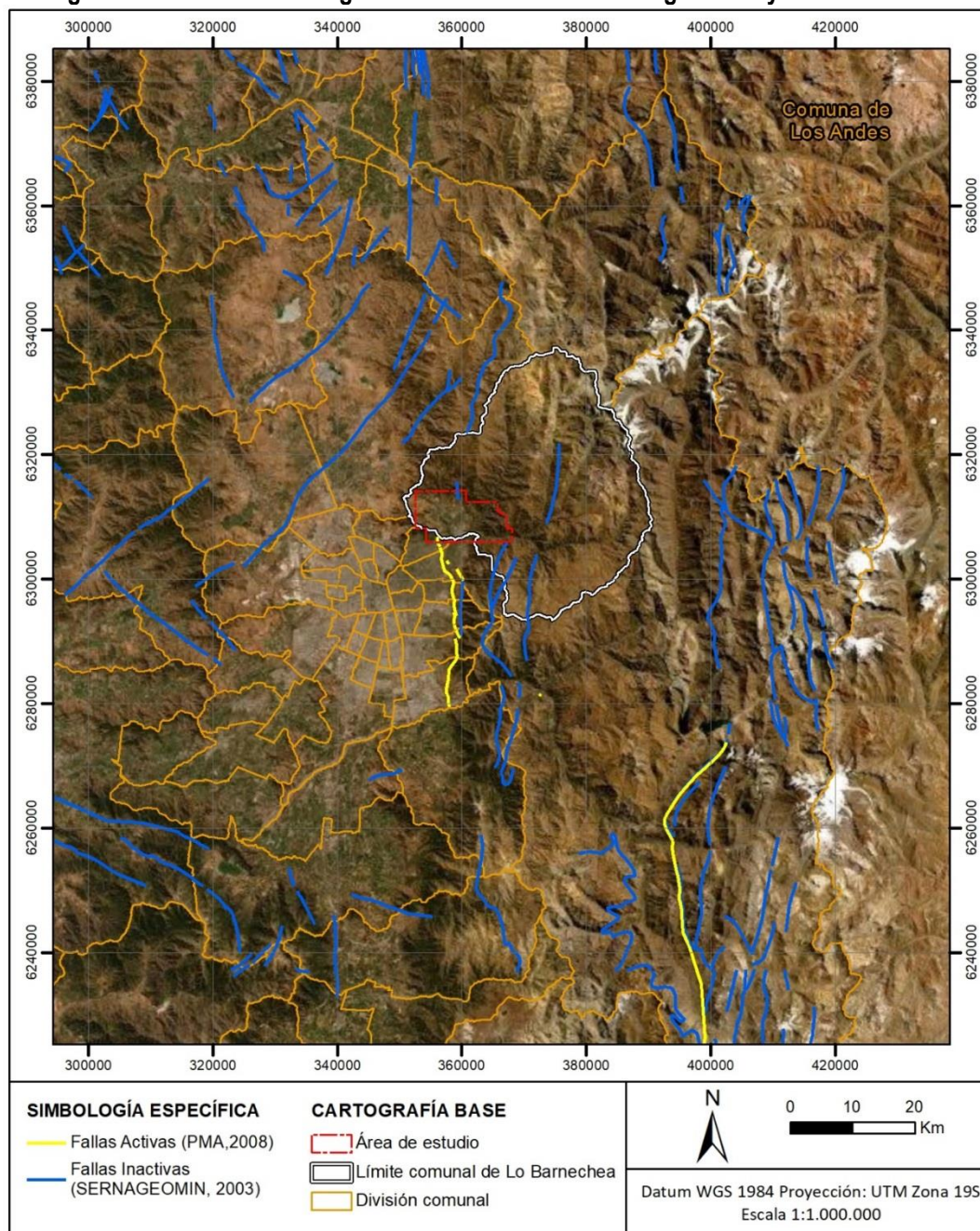
Esta fuente sísmica está asociada a los terremotos que ocurren dentro de la placa de Nazca, por ello sus profundidades son mayores a 50 Km y pueden llegar a los 200 Km. Este tipo de sismos que presentan una menor frecuencia en comparación a los interplaca, estarían asociados a eventos con un potencial muy destructivo con altas aceleraciones máximas debido a la trayectoria que tendrían las ondas desde el hipocentro. De los terremotos históricos destaca el Santiago de 1647, que podría estar asociado a una fuente intraplaca (Cisternas, 2012), el cual corresponde a uno de los sismos más catastróficos ocurridos en la zona de estudio. Dentro de eventos más recientes destacan los sismos de La Ligua de 1965 e Illapel de 1971.

² <http://www.csn.uchile.cl/sismologia/grandes-terremotos-en-chile/> consultado el 12/12/19.

• Sismos Cordilleranos

Corresponden a sismos ocurridos en la zona cordillerana, de estos destacan los sismos corticales generados por fallas geológicas activas. Este tipo de fuente sismogénica se encuentra asociado a eventos de baja profundidad, menores a 30 Km. De acuerdo a los datos levantados por SERNAGEOMIN (2003) y PMA-GCA (2007), solo se reconocería una falla regional como una estructura activa cercana al área de estudio (Figura N° 8.3—30), por otro lado, el catálogo NEIC muestra que si habrían algunos pocos eventos de esta categoría pero que al parecer no estarían asociados a esta misma estructura.

Figura N° 8.3—30: Fallas regionales activas e inactivas según PMA y SERNAGEOMIN



Fuente: Elaboración propia (2021)

Como se detalló en la línea de base geomorfológica, la comuna de Lo Barnechea 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 alzan 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, 2002; Armijo, y otros, 2010; Rauld, 2011).

En el frente cordillerano occidental la falla más estudiada corresponde a la Falla San Ramón, y su traza superficial está bien delimitada al oeste de Santiago entre los ríos Mapocho y Maipo (Rauld, 2002; Armijo, y otros, 2010; Rauld, 2011). La Falla San Ramón corresponde a la falla inversa más occidental de la cordillera principal y que alza la cordillera sobre el valle central. Esta falla presenta evidencias de actividad durante el Cuaternario, incluyendo el Holoceno y ha estado activa, al menos, desde el Mioceno ya que deforma rocas de la Formación Abanico.

El trazado reconocido de la Falla San Ramón se sigue en el Valle de Santiago hasta el Cerro Alvarado por el norte (Rauld, 2002). En la comuna de Lo Barnechea no ha sido estudiado con detalle, pero se considera que el frente cordillerano occidental, corresponde al sector entre el cordón de las Pozas y el valle del estero El Arrayán en base a las estructuras y morfologías que se observan en dicho sector y su relación con la traza de la falla San Ramón ubicada más al sur.

b) Catastro de Sismos

Se recopilaron los principales terremotos registrados en la zona central que afectaron al área de estudio con base en Urrutia & Lanza (1993) y Petit-Breuilh (2004).

Terremoto del 13 de Mayo de 1647: La ciudad de Santiago quedó prácticamente arruinada, se cayeron la mayoría de los edificios. 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 ($M \approx 8.9$): 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.

8.4 MODELACIÓN NUMÉRICA

8.4.1 Modelos de inundación

De acuerdo con los problemas identificados y las zonas de mayor conflicto, se desarrollaron 4 modelos hidráulicos en 3 cuencas de la comuna. Los primeros dos modelos corresponden a modelos hidráulicos 1D, desarrollados en el software HEC-RAS, en las quebradas Las Zorras y Huallalolén, mientras que los otros dos modelos fueron hechos para el estero Hualtatas, en dos zonas de interés, mediante el software Iber 2D.

a) Metodología

El estudio y modelo hidráulico tiene como objetivo determinar las áreas inundables, de acuerdo a los caudales de crecida de distintos periodos de retorno determinados en el estudio hidrológico y a los antecedentes topográficos disponibles. Para ello se elaboró una metodología general y una específica que se describen a continuación.

Existen en la comuna de Lo Barnechea múltiples cauces (río, esteros y quebradas), propensos a causar inundaciones por desborde de cauces, de los cuales un grupo se encuentra actualmente regulado por el PRC vigente (como resultado de lo establecido en el PRMS) y un segundo grupo de quebradas menores, las cuales fueron analizadas, según su prioridad, en el Estudio de Riesgo y Protección Ambiental Plan Regulador Comunal de Lo Barnechea Municipalidad de Lo Barnechea, elaborado por Infracon Consultores en 2014. Para todos estos cauces se desarrolló la línea base hidrológica para estimar los caudales de crecida asociados a distintos periodos de retorno.

Es necesario mencionar que, en el área de mayor urbanización, muchos de estos cauces han sido intervenidos mediante canalizaciones y/o entubamientos, que no siempre son continuos y pueden ir variando predio a predio, y de los cuales no se cuenta necesariamente con toda la información.

El Departamento de Documentación Técnica y Catastro, de la Ilustre Municipalidad de Lo Barnechea ha desarrollado una base de datos con las modificaciones de franjas de protección realizadas, asociadas a los distintos cauces, incluyendo el Rol de las propiedades, y los Ordinarios con las modificaciones respectivas. Estos ordinarios son producto de autorizaciones emanadas de la Autoridad correspondiente, producto del desarrollo de un estudio de riesgo, que permite entregar una nueva delimitación del riesgo en un área específica. Si bien se ha buscado incorporar esta información al presente estudio, se ha logrado finalmente solo incorporar un análisis general, identificando las zonas más intervenidas, dado lo fraccionado de estos estudios o las dificultades a la hora de interpretar distancias desde el centro del cauce o límite de obras para las cuales no se conoce su ubicación georreferenciada. Esta información se incluyó dentro de las recomendaciones de este estudio.

En este sentido, se ha propuesto desarrollar una metodología específica con el objeto de posteriormente delimitar las áreas de susceptibilidad asociadas a los distintos cauces de la comuna, que se describen en el Cuadro N° 8.4-1.

Para el desarrollo de modelos hidráulicos se utilizó el software HEC-RAS 1D, en aquellas cuencas para las cuales un modelo en una dimensión debería permitir establecer los límites de la inundación provocada por las crecidas, o el software Iber 2D, en aquellas en que se identifiquen zonas de mayor irregularidad, donde la dirección de flujo preferente no siempre se vea claramente definida.

El drenaje a través de la zona urbana, así como los puntos de conexión hacia los canales, colectores o vías de descarga artificiales, se estudiaron a nivel conceptual, a partir de los antecedentes disponibles en la Base de Datos desarrollada por el departamento de catastro.

Finalmente, se validaron y/o definieron las áreas de inundación correspondientes a períodos de retorno de 10 y 100 años, si la escala lo permite, y del análisis conceptual. Cabe indicar que los resultados de los modelos hidráulicos deben ser interpretados por un especialista, debido a posibles singularidades topográficas que no puedan ser incorporadas directamente en la modelación.

Cuadro N° 8.4-1: Metodología modelación hidráulica

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Características	Cauces abiertos	Parte Alta: Cauces abiertos Parte Baja: Entubamiento completo	Parte Alta: Cauces abiertos Parte Baja: Mix abierto – entubamiento
Quebradas o Ríos	Mapocho, El Arrayán, El Peumo, Hualtatas, Oscura, Carrizo y quebradas menores	Las Zorras, Culén, Los Chanchos y La Carbonera	El Gabino, Las Rosas, El Manzano y El Guindo
Metodología	Análisis geomorfológico y complemento con modelo hidráulico (Hualtatas y Huallalolén)	Análisis geomorfológico y complemento con modelo hidráulico (Las Zorras) Análisis entubamientos	Análisis geomorfológico y obras entubamiento/encauzamiento

Se detallan a continuación los contenidos mínimos requeridos para la construcción de los modelos hidráulicos, HEC-RAS 1D e Iber 2D.

i) Topografía

La modelación hidráulica requiere de una base topográfica, la cual fue obtenida mediante un levantamiento aerofotogramétrico (vuelo Lidar) a una escala 1:1000. A partir de este levantamiento se obtuvo un DTM (Modelo digital de terreno) el cual fue utilizado para la modelación. Cabe destacar que el levantamiento aerofotogramétrico considera la altura del espejo de agua en los cuerpos de agua, sin embargo, y de acuerdo con la fotografía tomada el mismo día del vuelo, el estero Las Hualtatas presentaba un flujo mínimo (ancho < 1 metro), mientras que las quebradas no presentaban flujo cuando este fue realizado, y por ende no se tendrá un efecto relevante sobre los resultados de la modelación.

En el caso de los modelos HEC-RAS, se necesitan perfiles topobatimétricos que representen las distintas secciones del cauce. Para ello, y a partir del levantamiento aerofotogramétrico, se generaron perfiles cada 50 metros o menos, en función de las singularidades de cada cauce. De manera adicional, en zonas particulares como cruces de alcantarillas, se incorporaron sus dimensiones aproximadas en función de las observaciones realizadas en terreno toda vez que dicha información no fue levantada en la base topográfica para el presente estudio. Los tramos intermedios de los cauces fueron interpolados mediante las herramientas disponibles en el software HEC-RAS.

Para los modelos Iber, se construyó una malla de elementos triangulares con celdas de 2m, en las dos zonas de interés, a la cual se le asignaron las elevaciones automáticamente en el modelo a partir del DTM.

ii) Coeficiente de rugosidad

Para caracterizar la rugosidad se utilizó el coeficiente de Manning, presentado por el ingeniero irlandés Robert Manning, según el cual la ecuación de flujo está dada por:

$$21. \frac{Q \cdot n}{\sqrt{I}} = A \cdot R_h^{\frac{2}{3}}$$

Dónde:

- Q : Caudal (m^3/s)
- n : Coeficiente de Manning
- i : Pendiente (m/m)
- A : Área (m^2)
- R_h : Radio Hidráulico

Existen diversos factores que afectan al coeficiente de rugosidad de Manning, entre los que destacan la rugosidad superficial (el tamaño y la forma de los granos), la presencia de vegetación, las irregularidades, el alineamiento, el tamaño y la forma del canal, la sedimentación y la socavación, las obstrucciones, el cambio estacional, etc. No existe un método exacto que permita determinar el coeficiente de Manning, pero se ha optado en este caso por utilizar la metodología de Cowan (1996), procedimiento para estimar el valor del coeficiente de Manning, el cual queda dado por:

$$22. n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m_5$$

Dónde:

- n : Coeficiente de Manning
- n_0 : Valor básico de n para un canal recto, uniforme y liso en los materiales naturales involucrados
- n_1 : Corrección por efecto de las rugosidades superficiales
- n_1 : Corrección por la variación de forma y tamaño de la sección transversal
- n_3 : Corrección debido a las obstrucciones
- n_4 : Corrección por presencia de vegetación
- m_5 : Consideración del efecto de los meandros

La determinación del Manning se realizó a partir de los antecedentes recopilados durante la visita a terreno, de los valores utilizados en los estudios anteriores y utilizando imágenes satelitales.

iii) Condiciones de borde y régimen de flujo

Los modelos desarrollados en el software HEC-RAS fueron simulados en régimen permanente, considerando los caudales máximos simulados para los distintos periodos de retorno en las dos cuencas. Debido a que se desconoce a priori el régimen de flujo de los distintos cauces en el área de estudio, el modelo permite simular un régimen mixto, determinado la condición durante el proceso. Para ello es necesario incorporar condiciones de borde tanto aguas arriba como aguas abajo. Se tomaron como condiciones de borde la altura normal, para lo que se consideran las pendientes de terreno determinadas.

La modelación Iber requiere de un hidrograma de crecida como condición de borde de entrada, y se definen igualmente las condiciones de borde de salida.

b) **Análisis de entubamientos**

Se desarrolla a continuación un análisis no exhaustivo de la configuración, obras y/o modificaciones de franjas de protección realizadas para las distintas quebradas de la comuna, considerando la Base de datos de modificaciones de franjas realizada por El Departamento de Documentación Técnica y Catastro, de la Ilustre Municipalidad de Lo Barnechea, estudios previos y lo observado durante la visita a terreno terreno. Cabe destacar que, en el caso de la Base de datos, se tienen más de 60.000 elementos, asociados a predios, y corresponde a un documento en trabajo del Departamento, que se ha desarrollado durante tiempos mayores a

un año. Adicionalmente, se buscará comprar, en aquellos casos en que el volumen de documentos resulte abordable, los caudales de diseño de las obras con los obtenidos en el presente estudio. En primer lugar, se analizan las quebradas identificadas en el grupo N°2, que presentan un tramo superior abierto, y un tramo inferior con un entubamiento, que corresponden a Las Zorras, Culén, Los Chanchos y La Carbonera. En segundo lugar, se analizan las quebradas correspondientes al grupo N°3, en las cuales se presenta una intercalación de obras abiertas y entubamientos, y que corresponden a El Gabino, Las Rosas, El Manzano y El Guindo.

i) Quebrada Las Zorras:

La quebrada las zorras se ubica en el sector del estadio de Lo Barnechea y posee dos cauces principales por el costado de calle camino a la media luna y de circunvalación sur. En su recorrido atraviesa 2 alcantarillas, una de sección circular de aproximadamente 0.5m de diámetro y otra de sección rectangular de aproximadamente 0.4x1.5m. Cercano a la esquina de Cerro Dieciocho con Los Quincheros la quebrada se dirige por un canal hacia un entubamiento de dimensiones desconocidas. En general, las modificaciones de franjas en la quebrada Las Zorras indican un área de restricción de 30m, medidas a partir del eje de la quebrada; y una franja menor en la zona del entubamiento.

En cuanto a la obra de canalización final, de acuerdo la Resolución DGA N°782 de mayo de 2010, la DGA aprobó el Proyecto “Canalización Quebrada Las Zorras”, para un caudal 4,406 m³/s, que comprende dos sectores:

- Primero, un tramo de 240 m, en sección trapezoidal de base 10 metros, talud H:V=1:1
- Segundo, un tramo entubado con tuberías de hormigón armado de entre 1,0 y 1,2 metros, por una longitud de 491,5 metros

De acuerdo al análisis hidrológico desarrollado en el presente estudio, el caudal asociado a una crecida de periodo de retorno de 100 años se encuentra en torno a los 5 m³/s, valor que supera el caudal de diseño asociado a las obras, motivo por el cual se podrían presentar desbordes, lo que lleva al desarrollo de un modelo hidráulico en la parte alta, y a un análisis geomorfológico para determinar el posible trazado del desborde aguas abajo del entubamiento.

ii) Quebrada Culén

La quebrada Culén se encuentra sin intervención en su parte alta, para luego dar paso a un entubamiento en el sector de Avda. Los Trapenses y Avda. El Golf. De acuerdo a la resolución DGA N° 1829 del 30 de noviembre de 2010, el proyecto “Obras de Abovedamiento Quebrada El Culén” se encuentra aprobado. El proyecto corresponde al encauzamiento de las aguas que drena por la quebrada y desembocan al estero Las Hualtatas, mediante el entubamiento con tuberías de hormigón armado de 1,6 metros de diámetro, por una longitud de 525 metros, con un relleno en su parte superior del tipo canal trapezoidal de tierra. El proyecto contempla, además, la construcción de 9 cámaras de inspección con caídas y una obra de descarga al estero correspondiente a un muro y enrocado de mampostería de piedra. La obra se encuentra diseñada para un periodo de retorno de 100 años, que de acuerdo al proyecto corresponde a 8,6 m³/s.

De acuerdo al estudio hidrológico realizado en el presente estudio, el caudal de 100 años de periodo de retorno podría alcanzar valores cercanos a 20 m³/s, valor que se aleja del antes mencionado. Debido a lo anterior, el análisis de riesgo considerará un criterio geomorfológico para definir el posible trazado de la crecida.

iii) Quebrada Los Chanchos

En la quebrada Los Chanchos se tiene una serie de resoluciones que aprueban obras de entubamiento (en su mayoría tuberías de 1 m de diámetro) que dan respuesta a una crecida de 100 años de periodo de retorno, con un caudal asociado de 2,5 m³/s. Diversos documentos indican que se recomienda una franja de restricción de 4 metros hacia cada lado del entubamiento (10 cuando el cauce está abierto). Los resultados del estudio hidrológico realizado en el presente estudio, indican que el caudal de 100 años de periodo de retorno podría superar los 6,0 m³/s, valor que supera el anteriormente presentado, y lleva a optar por considerar adicionalmente el criterio geomorfológico para definir el posible trazado de la crecida.

iv) La Carbonera

Existen múltiples documentos asociados a modificaciones de franja de restricción en la quebrada La Carbonera, En particular, la resolución DGA N° 1717 del 25 de agosto de 1992, aprueba el proyecto “Modificación y entubamiento Quebrada La Carbonera”, que considera un entubamiento de 16 m³/s con una longitud de 879,38 metros. La franja de restricción corresponde en algunos casos a 12 metros, medidos a cada lado de la coronación de las obras, mientras que otros indican 25 metros a partir de la canalización existente. De acuerdo a lo estimado en el estudio hidrológico el caudal de 100 años de periodo de retorno superaría los 20 m³/s, valor que supera el anteriormente presentado, y lleva a optar por considerar adicionalmente el criterio geomorfológico para definir el posible trazado de la crecida.

v) El Gabino

La quebrada El Gabino corresponde a uno de los cauces con mayor intervención en la comuna. De acuerdo a lo presentado en el estudio de EIC (2004), existen sectores y/o obras con capacidad máxima para un periodo de retorno de 2 años. Existen cerca de 180 documentos asociados a resoluciones de modificaciones DGA, DOH u otras exclusivamente en la quebrada El Guindo. Debido al gran número de documentos, y a lo reconocido en terreno en relación a la escasa continuidad en las obras construidas, esta quebrada será analizada únicamente considerando el criterio geomorfológico, haciendo notar que un análisis específico requerirá de un estudio particular exclusivo para esta quebrada. En particular, se deben revisar los avances desarrollados producto del “Estudio de factibilidad y diseño definitivo del estero El Gabino. Lo Barnechea, Región Metropolitana”, realizado en 2007 por SIGA Consultores S.A. para la DOH

vi) Las Rosas

En el caso de la quebrada Las Rosas, también llamada El Manzano, la Base de Datos considera un total de 96 documentos asociados a modificaciones, restricciones o planos. En general, estos documentos indican franjas de restricción de entre 5 y 10 metros hacia cada borde de las obras ejecutadas. Debido a que existe un gran número de documentos, y a la dificultad de establecer una correcta relación entre cada obra realizada, se ha optado por considerar los resultados del análisis geomorfológico para determinar las áreas de riesgo asociadas.

vii) El Manzano

En el caso de la quebrada El Manzano, también llamada El Quisco, la Base de Datos considera un total de 127 documentos asociados a modificaciones, restricciones o planos. En general, estos documentos indican franjas de restricción de entre 5 y 15 metros hacia cada borde de las obras ejecutadas. Debido a que existe un gran número de documentos, y a la dificultad de establecer una correcta relación entre cada obra realizada, se ha optado por considerar los resultados del análisis geomorfológico para determinar las áreas de riesgo asociadas.

viii) El Guindo

En el caso de la quebrada El Guindo, la Base de Datos considera un total de 123 documentos asociados a modificaciones, restricciones o planos. De acuerdo con los antecedentes analizados, en esta quebrada, además de las modificaciones de entubamientos u otras obras, se tiene la particularidad de que se ha modificado su trazado, lo que dificulta enormemente el análisis de riesgo respectivo. En cuanto a las franjas de restricción, se indican disminuciones que llegan a entre 4 y 12 metros hacia cada borde de las obras ejecutadas. Debido a que existe un gran número de documentos, y a la dificultad de establecer una correcta relación entre cada obra realizada, se ha optado por considerar los resultados del análisis geomorfológico para determinar las áreas de riesgo asociadas.

c) **Modelos hidráulicos 1D**

Se presenta a continuación el desarrollo de los modelos hidráulicos 1D, que corresponden a la quebrada Las Zorras y Huallalolén.

i) Topografía

A partir del modelo de elevación de terreno se generan perfiles topográficos cada 50 metros, añadiendo perfiles en aquellos puntos singulares, de acuerdo a los requerimientos del modelo. En la Figura N° 8.4—1 se presentan los perfiles del modelo de la Qda. Las Zorras, destacando que existen dos cauces, cauce norte y cauce sur, los cuales confluyen generando una única quebrada hacia aguas abajo. En este sistema se reconocieron 3 alcantarillas durante la visita a terreno, las cuales fueron incorporadas de manera aproximada al modelo. La primera es una alcantarilla circular de 0,7 metros de diámetro y se ubica en un cruce del cauce norte (Figura N° 8.4—2), la segunda es una alcantarilla rectangular de 1,5 metros de ancho por 0,4 metros de alto (Figura N° 8.4—3) y la tercera es una alcantarilla cuadrada de 1,5 metros de ancho (Figura N° 8.4—4), estando estas dos últimas ubicadas aguas abajo de la confluencia de ambos cauces. Por otra parte, en la Figura N° 8.4—5 se presentan los perfiles del modelo de la Qda. Huallalolén. El trazado de esta quebrada no es muy claro en su punto más bajo (descarga hacia el estero Arrayán, y se observan cruces de caminos, sin embargo, no se contó con información para agregar mayor detalle a la modelación.

Figura N° 8.4—1: Perfiles Modelo Hidráulico Qda. Las Zorras

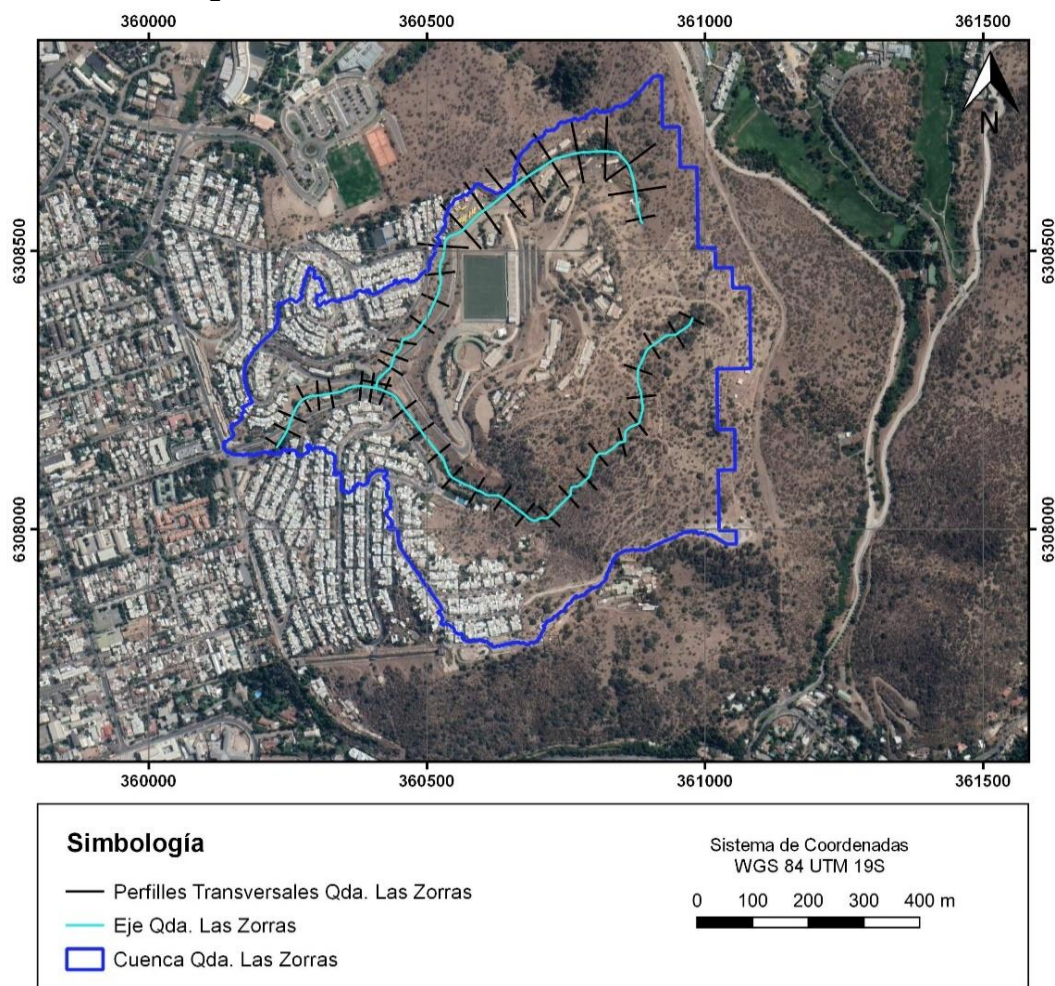
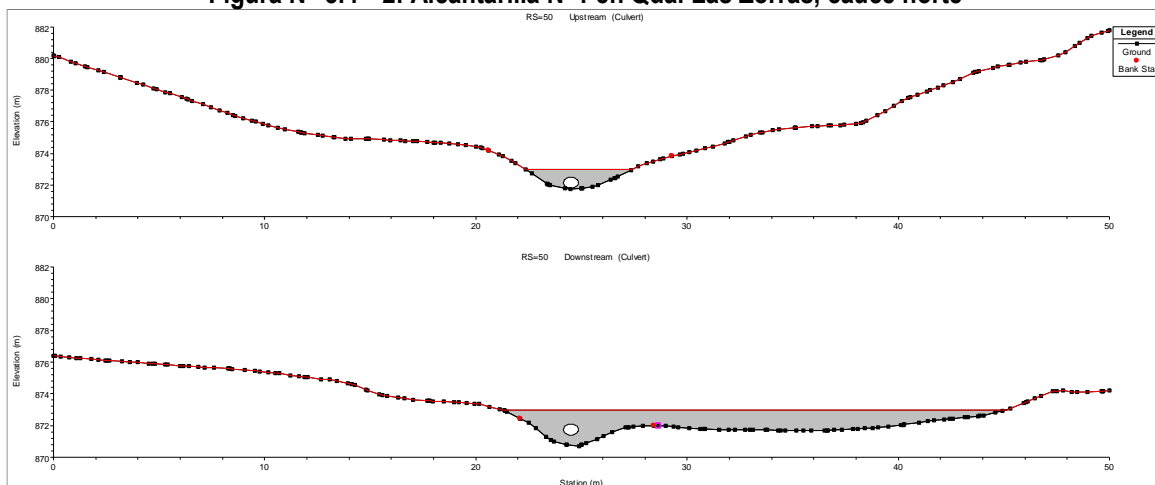
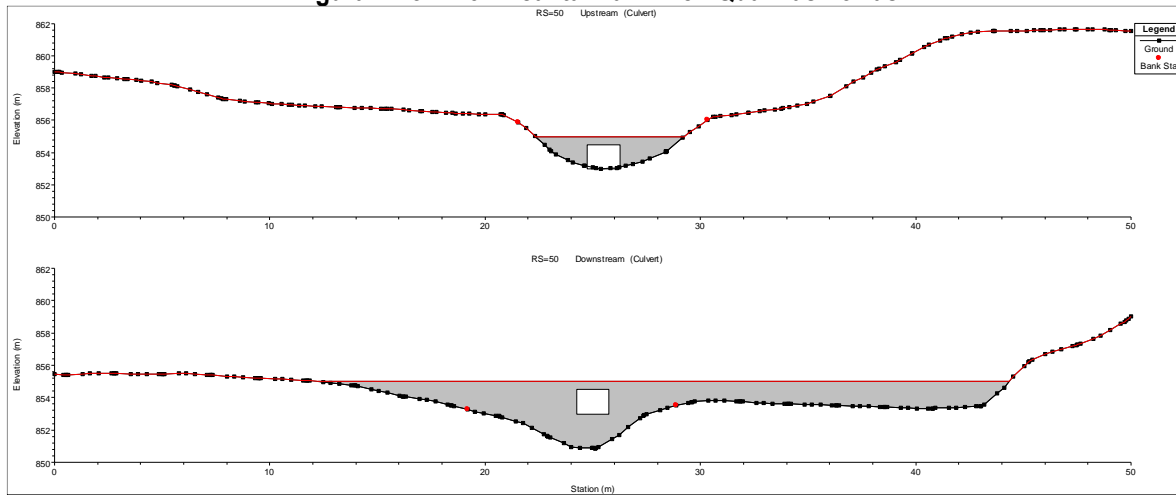


Figura N° 8.4—2: Alcantarilla N°1 en Qda. Las Zorras, cauce norte



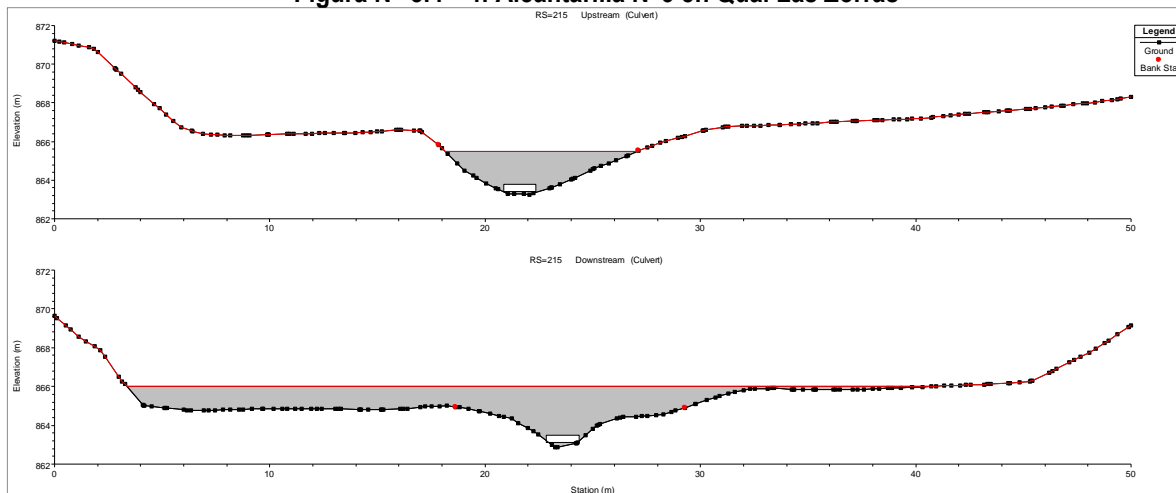
Fuente: Captura de pantalla (Software HEC-RAS, 2020)

Figura N° 8.4—3: Alcantarilla N°2 en Qda. Las Zorras

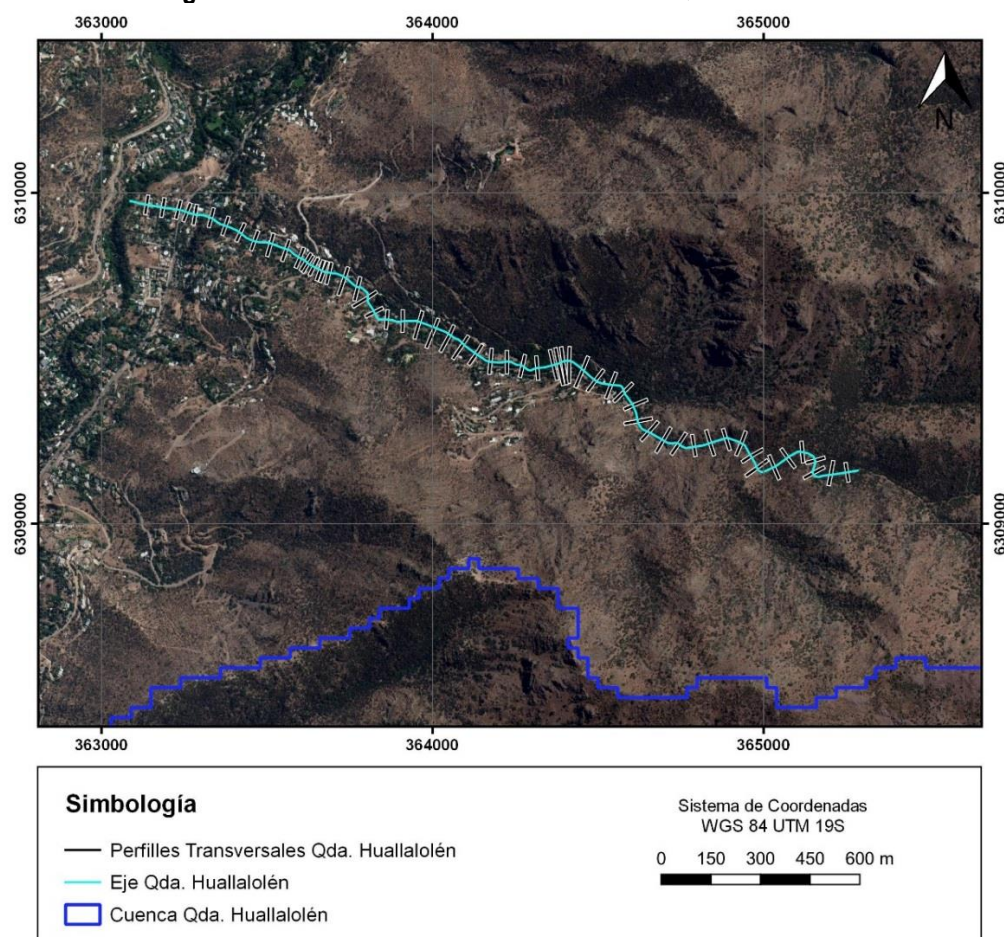


Fuente: Captura de pantalla (Software HEC-RAS, 2020)

Figura N° 8.4—4: Alcantarilla N°3 en Qda. Las Zorras



Fuente: Captura de pantalla (Software HEC-RAS, 2020)

Figura N° 8.4—5: Perfiles Modelo Hidráulico Qda. Huallalolén

Fuente: Elaboración propia (2021)

ii) Coeficiente de Rugosidad

Para determinar el valor del coeficiente de Manning, tanto para el modelo de la Qda. Las Zorras como de la Qda. Huallalolén se consideró lo observado durante la visita a terreno realizada en noviembre de 2019 y la fotografía aérea tomada el durante el levantamiento aerofotogramétrico. Los valores se ajustaron considerando tramos homogéneos tanto de la caja principal del cauce respectivo como de las planicies de inundación. Para ello se consideró la mayor o menor presencia de vegetación y construcciones, así como su tamaño con respecto a las alturas de flujo. Los valores fueron estimados utilizando la fórmula de Cowan. Los resultados obtenidos para cada grupo de perfiles de cada modelo se presentan en el Cuadro N° 8.4-2.

Cuadro N° 8.4-2: Estimación del coeficiente de Manning utilizando el método de Cowan, para los distintos grupos de perfiles en cada modelo.

Modelo	Perfiles	Coeficiente de Manning		
		Planicie Izquierda	Caja Principal	Planicie Derecha
Qda. Las Zorras	Cauce sur: 1142,04 – 250	0,089	0,078	0,089
	Cauce norte: 800 – 10,55			
	Aguas abajo confluencia: 206,3 – 2,53	0,08	0,062	0,08
Qda. Huallalolén	2600 – 50	0,07	0,055	0 07

Fuente: Elaboración propia (2020)

iii) Condiciones de Borde y Régimen de Flujo

Debido a que no se conoce a priori el régimen de flujo, se realizaron los modelos considerando un régimen mixto, disponible entre las opciones de modelación del software HEC-RAS. Una vez realizada la modelación se analizará el comportamiento de cada cauce. Por otra parte, las condiciones de borde se incluyen en el Cuadro N° 8.4-3. En el caso del modelo de la Qda. Las Zorras se consideró condición de borde de altura normal hacia aguas arriba (ambos cauces) y hacia aguas abajo. Sin embargo, se reconoce una canalización hacia aguas abajo y una posible zona de acumulación de agua, motivo por el cual los resultados en el tramo final deberán ser analizados con mayor detención. En el caso del modelo de la Qda. Huallalolén se consideró igualmente altura normal hacia aguas arriba y hacia aguas abajo, sin embargo, el tramo modelado desemboca en el estero Arrayán, de mayor flujo, motivo por el cual se podría estar despreciando el posible efecto desde dicho estero.

Cuadro N° 8.4-3: Condiciones de Borde

Modelo	Condición de Borde	
	Aguas Arriba	Aguas Abajo
Qda. Las Zorras	Cauce norte	Altura Normal Altura Normal Pendiente = 0,1
	Altura Normal	
	Pendiente = 0,2	
	Cauce sur	
	Altura Normal	
Qda. Huallalolén	Pendiente = 0,24	Altura Normal Pendiente = 0,19
	Altura Normal	
	Pendiente = 0,17	

Fuente: Elaboración propia (2021)

iv) Condiciones de flujo

Ambos modelos fueron ejecutados para caudales de 2, 10 y 100 años de periodo de retorno, buscando representar tres condiciones de flujo, y considerando que no existen grandes diferencias entre los periodos de retorno no considerados. En particular en el caso del modelo de la Qda. Las Zorras, y dado que el estudio hidrológico se desarrolló pensando en un único cauce, se consideró una situación más desfavorable, asignándole a cada brazo alrededor de un 70% del flujo del cauce principal. Los caudales considerados se detallan en el Cuadro N° 8.4-4.

Cuadro N° 8.4-4: Caudales de modelación (m³/s)

Modelo	Perfil	Descripción	Periodo de Retorno (años)		
			2	10	100
Qda. Las Zorras	800	Inicio Qda. Las Zorras, brazo norte	1,5	2	3,5
	1142,04	Inicio Qda. Las Zorras, brazo sur	1,5	2	3,5
	225,7	Qda. Las Zorras, aguas abajo de la confluencia de ambos brazos	2	3	5
Qda. Huallalolén	2600	Inicio Qda. Huallalolén en zona urbanizada	7,9	10,2	22,2

Fuente: Elaboración propia (2021)

v) Resultados

A continuación, se presentan los resultados de la modelación para 100 años de periodo de retorno, y la interpretación realizada considerando el levantamiento topográfico, tomando en cuenta que el trazado de los perfiles cada 50 metros puede no representar correctamente todas las irregularidades del cauce, y manteniendo en general los anchos y cotas de inundación observados en los resultados del modelo.

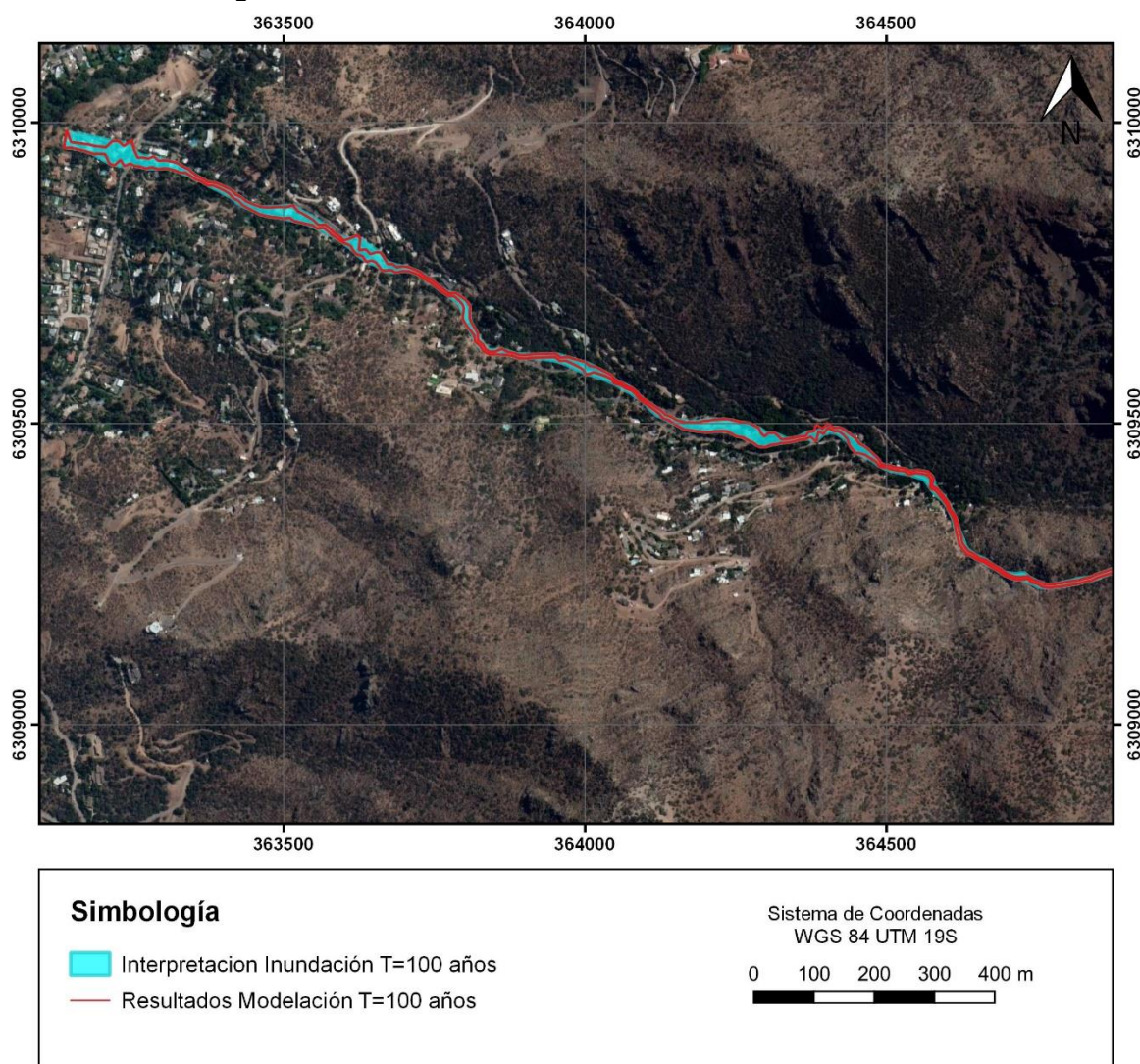
En la Figura N° 8.4—6 se presentan los resultados del modelo de la Qda. Las Zorras. Se destaca un mayor ancho de inundación en el cauce norte, producto de un menor grado de definición de la quebrada. Adicionalmente, la capacidad de la alcantarilla número 2 se ve superada para un periodo de retorno de 100 años, provocando que existe flujo por sobre la calle y un posible anegamiento en la zona de la confluencia de ambos cauces. En el cauce norte los anchos de inundación van entre los 20 y los 60 metros, mientras que en el cauce sur no superan los 15 metros. El modelo no representa correctamente la inundación en la zona del inicio del entubamiento (final del modelo)

En la Figura N° 8.4—7 se presentan los resultados del modelo de la Qda. Huallalolén. Los anchos de inundación varían entre 10 y 40 metros, estos últimos en las zonas de cruces de caminos o en la confluencia con el estero Arrayán que no quedan bien representadas, debido a la falta de antecedentes topográficos (obras de atravesio o entubamiento en la parte más baja del cauce).

Figura N° 8.4—6: Resultados modelo hidráulico Qda. Las Zorras



Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.4—7: Resultados modelo hidráulico Qda. Huallalolén

Fuente: Elaboración propia (2021)

d) Modelos hidráulicos 2D

La modelación del Estero Las Hualtatas se desarrolló para dos sectores de interés. De esta forma se construyeron los modelos norte y sur, para los tramos aguas arriba y aguas abajo de Av. José Alcalde Délano, respectivamente. El modelo norte representa un sector de una curva pronunciada, mientras que el modelo sur se enfoca en el sector de la Fundación CAZ, sector en el cual la quebrada no tiene mayor trabajo de limpieza, de acuerdo a lo señalado por la Autoridad. Se modeló separadamente por motivos de eficiencia, puesto que en el sector sur se realizó un análisis de sensibilidad con respecto a la rugosidad del cauce.

i) Topografía

El proceso de modelación se llevó a cabo en base al levantamiento aerofotogramétrico disponible para el área de estudio, con una resolución de 1m x 1m. Esta cartografía consiste en la elevación de superficie del terreno, por lo que no considera irregularidades como edificaciones y vegetación. Esto último es ideal para representar

correctamente el área de escurrimiento del Estero en el modelo Iber, sin embargo, en los casos donde este es desbordado, no se considera el boqueo que puedan ejercer las edificaciones al flujo de agua.

ii) Modelo Norte

23. Área de modelación

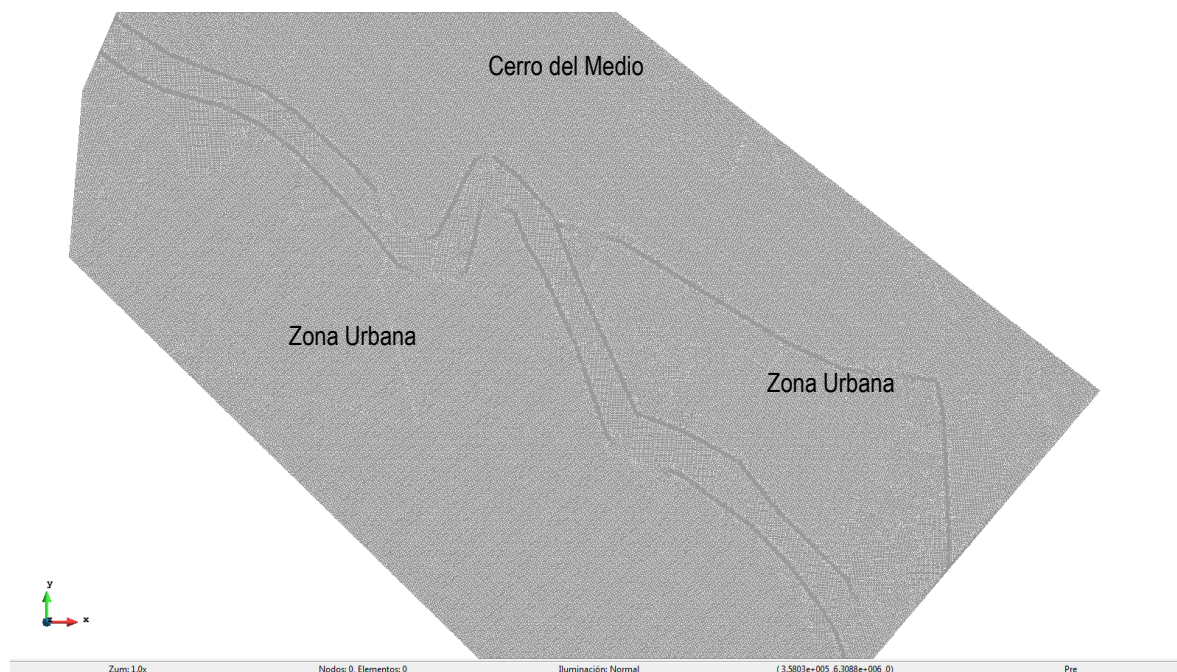
El modelo del sector norte comprende un tramo de 1,1 km del Estero Las Hualtatas entre las calles Los Peñascos y Av. José Alcalde Délano, mientras que en sus primeros 630 m de este tramo el Estero es bordeado por el Cerro del Medio por el Norte.

24. Malla de modelación

Por tratarse de un modelo pequeño, se asignó la misma discretización de la malla para toda el área de modelación con un valor de 2m. Este valor permite representar correctamente el Estero que cuenta con anchos de entre 15 y 30m. Así, la malla cuenta con 301.048 elementos y 151.278 nodos.

En la siguiente figura se observa el resultado del mallado. Cabe destacar que el área de modelación está dividida en 4 zonas de diferente rugosidad y en cuyas intersecciones el tamaño de los elementos es más pequeño. Por este motivo, es posible identificar en la Figura N° 8.4—8 la extensión del cauce y el borde entre el Cerro del Medio y la zona urbana.

Figura N° 8.4—8: Malla de modelación estero Las Hualtatas norte

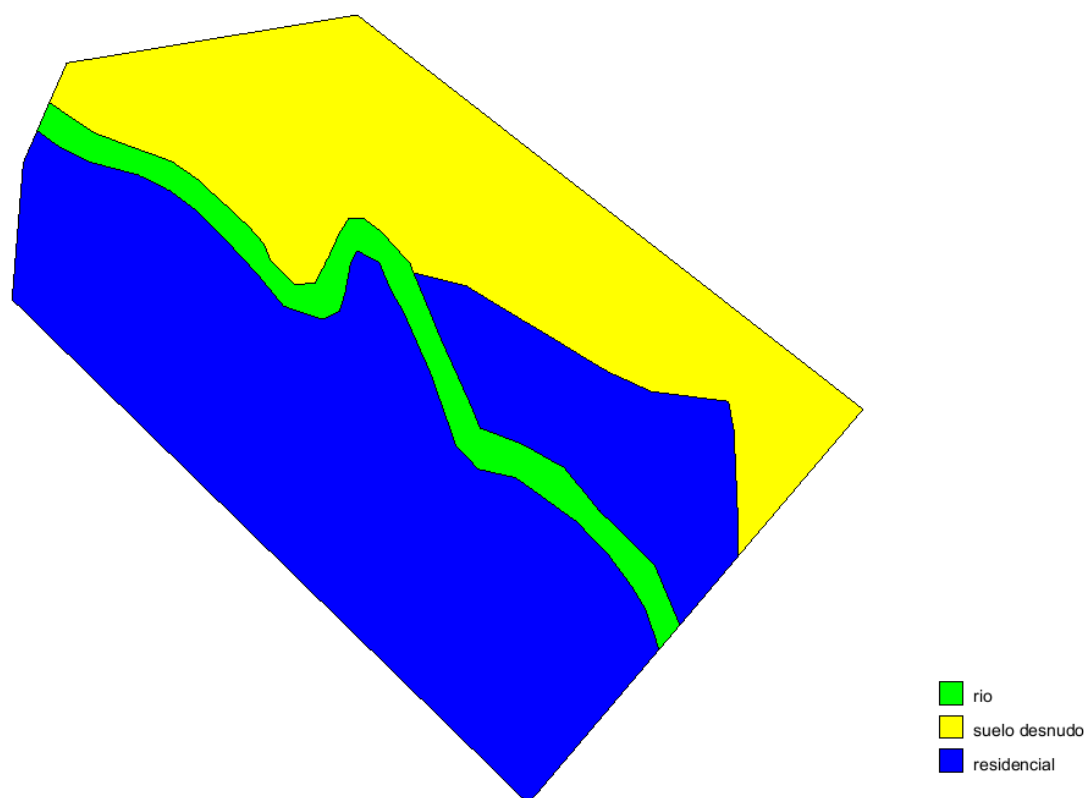


Fuente: Captura de pantalla (Software Iber, 2020)

25. Rugosidad

Se definieron 3 categorías de uso de suelo para asignar los coeficientes de rugosidad de Manning. En la Figura N° 8.4—9 se presentan las categorías utilizadas, donde es asignó un uso de suelo tipo “río” para el Estero, “residencial” para la zona urbana y “suelo desnudo” para el Cerro del Medio, cada uno con coeficientes de Manning de 0.04, 0.15 y 0.023 respectivamente.

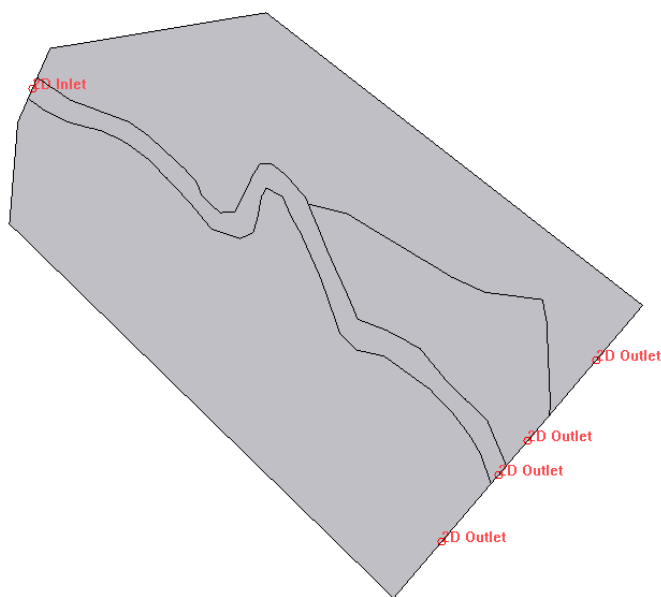
Figura N° 8.4—9: Coeficientes de rugosidad estero Las Hualtatas norte



Fuente: Captura de pantalla (Software Iber, 2020)

26. Condiciones de borde

Las condiciones de borde del modelo corresponden a las entradas y salidas hídricas identificadas en el área de modelación. En este caso se identifica una sola entrada correspondiente al hidrograma de la crecida del estero Las Hualtatas para periodo de retorno de 100 años, ubicada en el extremo noroeste modelo (Figura N° 8.4—10). La condición de borde de salida corresponde al sector donde el escurrimiento abandona el área de modelación, es decir, el extremo sureste del Estero, a lo cual se suma todo el borde sureste del modelo (Figura N° 8.4—10) para evitar posibles anegamientos artificiales en caso de que el río se desbordase.

Figura N° 8.4—10: Condiciones de borde estero Las Hualtatas norte

Fuente: Captura de pantalla (Software Iber, 2020)

27. Resultados

El modelo entrega como resultados las alturas y velocidades en cada elemento de la malla, y para cada paso de tiempo seleccionado. En la Figura N° 8.4—11 y Figura N° 8.4—12 se presentan gráficamente los valores máximos obtenidos de altura y velocidad respectivamente. Se observa que el sector donde el Estero forma una curva en forma de “S” se inunda con alturas inferiores a 1m. En este mismo sector las velocidades máximas son bajas, sin embargo, justo aguas debajo de la curva en “S” la velocidad aumenta considerablemente.

Figura N° 8.4—11: Máxima altura de inundación estero Las Hualtatas norte

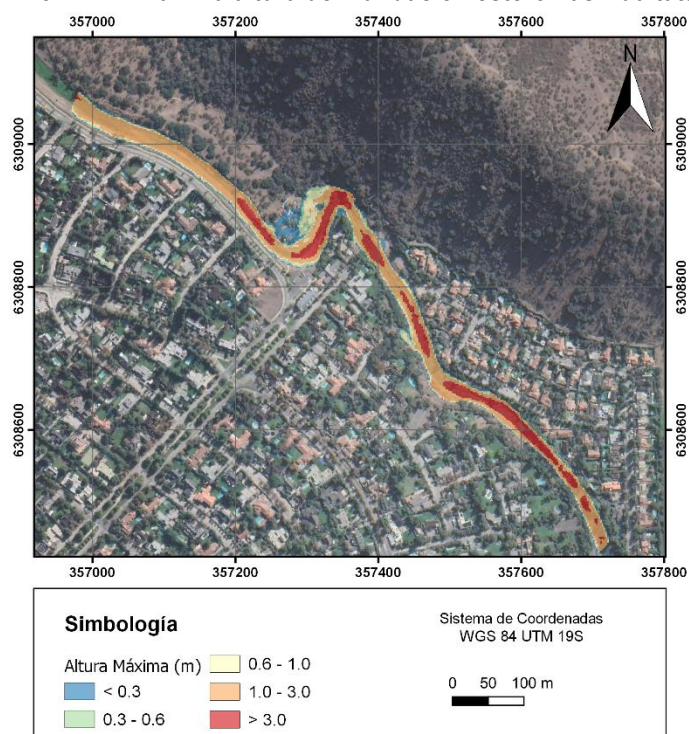
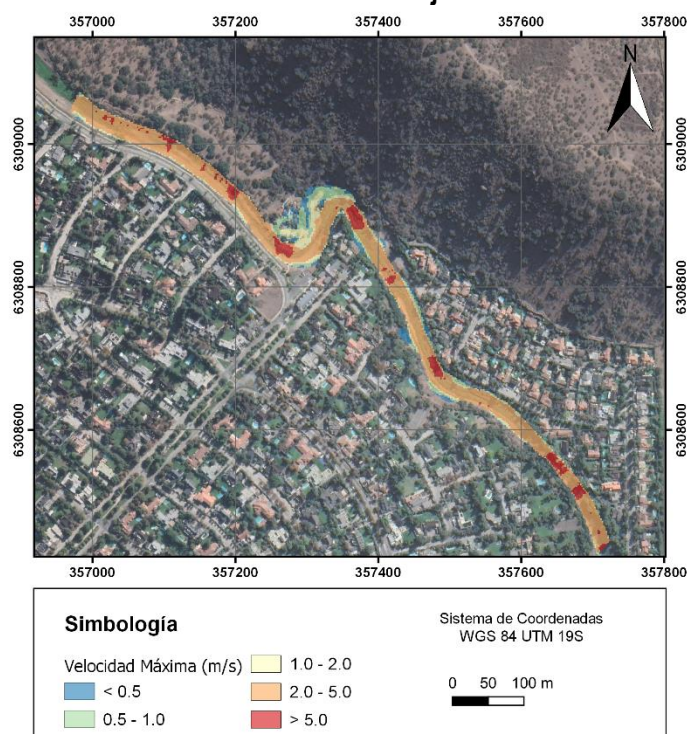


Figura N° 8.4—12: Máxima velocidad de flujo estero Las Hualtatas norte



Adicionalmente se identificaron 3 sectores en los cuales el Estero se desborda, los cuales se muestran en las siguientes figuras.

Figura N° 8.4—13: Zona de desborde 1 y 2 estero Las Hualtatas norte



Figura N° 8.4—14: Zona de desborde 3 estero Las Hualtatas norte



Fuente: Elaboración propia (2021)

iii) Modelo Sur

28. Área de modelación

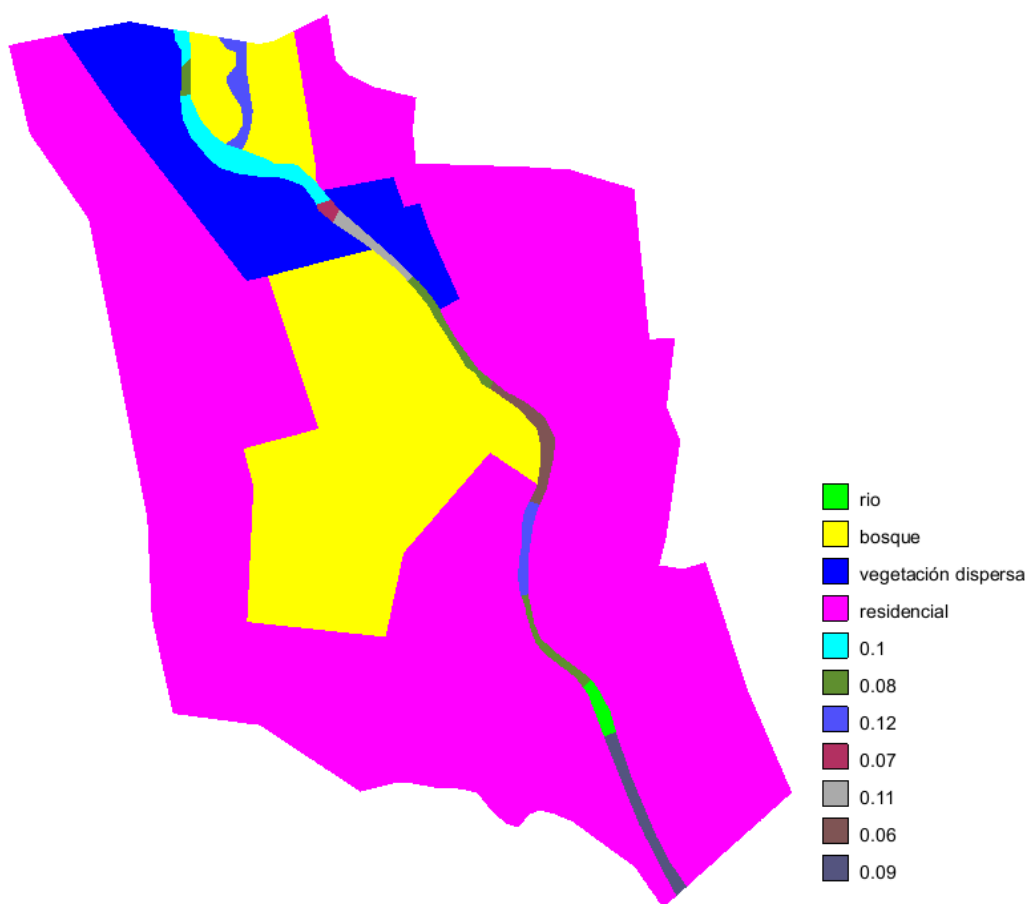
El modelo del sector sur comprende un tramo de 1,9 km del Estero Las Hualtatas entre Av. José Alcalde Délano y Av. Raúl Labbé. Este sector se caracteriza por bordear los terrenos de la Fundación Caz por su ribera sur en la primera mitad de su recorrido.

29. Malla de modelación

Por tratarse de un modelo pequeño, se asignó la misma discretización de la malla para toda el área de modelación con un valor de 2m. Este valor permite representar correctamente el Estero que cuenta con anchos de entre 8 y 25m. Así, la malla cuenta con 721.199 elementos y 362.626 nodos.

30. Rugosidad

En este tramo del Estero Las Hualtatas el cauce se caracteriza por presentar abundante vegetación, la cual aumenta el coeficiente de rugosidad y por lo tanto aumenta la susceptibilidad a generar inundaciones. Para representar estas condiciones se considera una rugosidad actual del Estero con valores de uso de suelo que van desde tipo “río” con coeficiente de Manning de 0.025, hasta uso de suelo tipo “bosque” con Manning de 0.12. La distribución de tipos de suelo y coeficientes de rugosidad se muestra en la Figura N° 8.4—15. El tipo de suelo “vegetación dispersa” tiene un Manning de 0.08.

Figura N° 8.4—15: Coeficientes de rugosidad estero Las Hualtatas sur

Fuente: Captura de pantalla (Software Iber, 2020)

31. Condiciones de borde

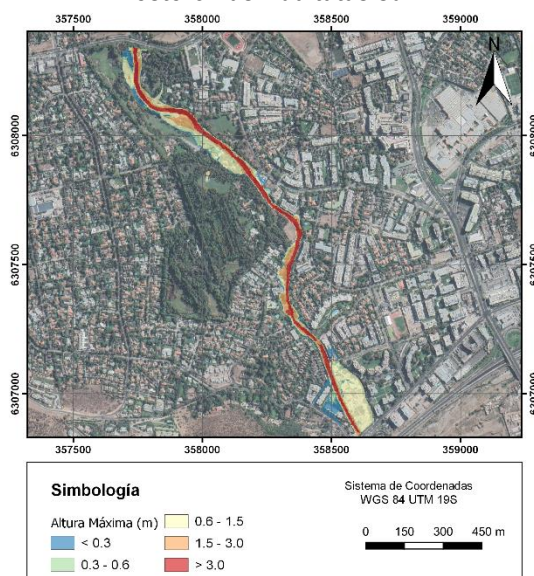
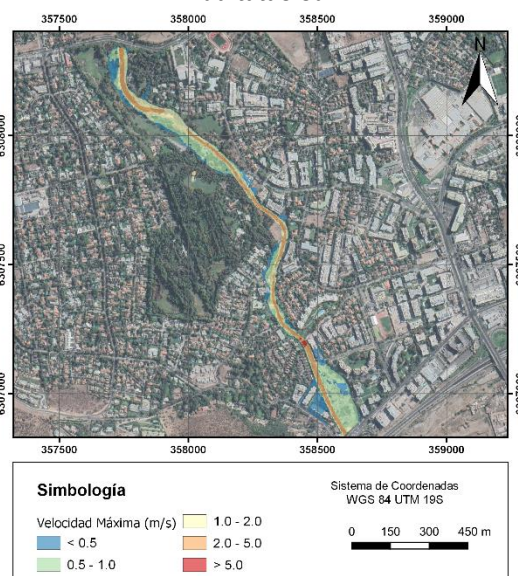
Al igual que en el sector norte, se identifica una sola entrada correspondiente al hidrograma de la crecida del estero Las Hualtatas para periodo de retorno de 100 años, ubicada en el extremo noroeste modelo. La condición de borde de salida corresponde al sector donde el escurrimiento abandona el área de modelación, es decir, el extremo sureste del Estero, a lo cual se suma todo el borde sureste del modelo (Figura N° 8.4—16) para evitar posibles anegamientos artificiales en caso de que el río se desbordase. Las condiciones de borde son las mismas para el escenario a y b.

Figura N° 8.4—16: Condiciones de borde estero Las Hualtatas sur


Fuente: Captura de pantalla (Software Iber, 2020)

32. Resultados

Se identificaron diversas zonas susceptibles de ser inundadas. En la Figura N° 8.4—17 se observa una inundación de hasta 1m en la ribera derecha del Estero en todo el sector de la Fundación Caz. En la Figura N° 8.4—18 se presentan los valores de velocidad máxima alcanzados.

Figura N° 8.4—17: Máxima altura de inundación estero Las Hualtatas sur

Figura N° 8.4—18: Máxima velocidad estero Las Hualtatas sur


Algunos sectores en los cuales el Estero se desbordase identifican en las siguientes figuras. Se destaca que se presentan los mismos sectores para diferentes pasos de tiempo de la modelación, identificados como t1 y t2.

Figura N° 8.4—19: Zona de desborde 1 estero Las Hualtatas sur (t1)



Figura N° 8.4—20: Zona de desborde 1 estero Las Hualtatas sur (t2)



Figura N° 8.4—21: Zona de desborde 2 estero Las Hualtatas sur (t1)

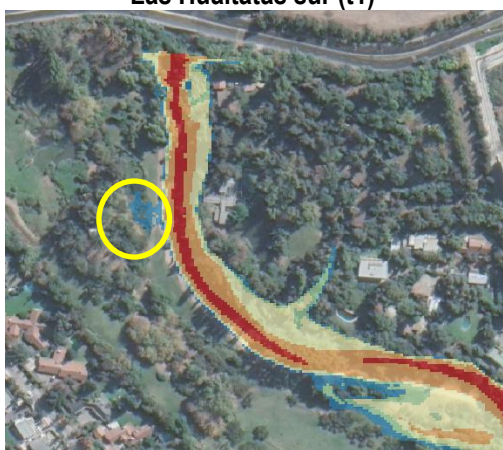


Figura N° 8.4—22: Zona de desborde 2 estero Las Hualtatas sur (t2)



Figura N° 8.4—23: Zona de desborde 3 estero Las Hualtatas sur (t1)

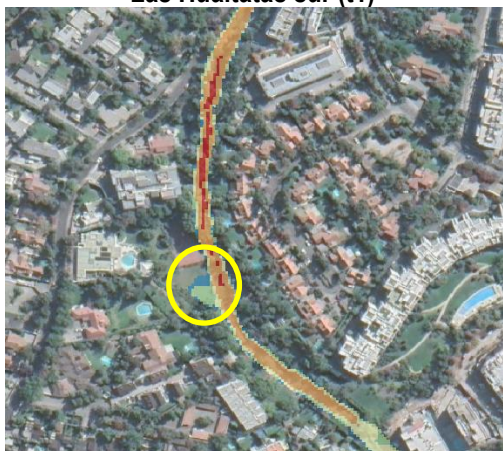
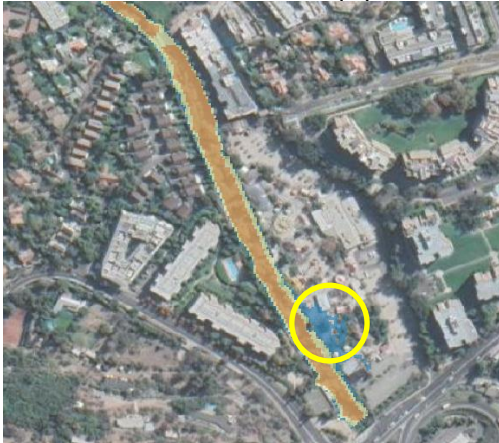


Figura N° 8.4—24: Zona de desborde 3 estero Las Hualtatas sur (t2)



**Figura N° 8.4—25: Zona de desborde 4 estero
Las Hualtatas sur (t1)**



**Figura N° 8.4—26: Zona de desborde 4 estero
Las Hualtatas sur (t2)**



**Figura N° 8.4—27: Zona de desborde 4 estero
Las Hualtatas sur (t3)**



**Figura N° 8.4—28: Zona de desborde 4 estero
Las Hualtatas sur (t4)**



Fuente: Elaboración propia (2021)

e) Resultados Digitales Modelos 1D (apéndice digital)

En este apéndice (formato digital) se incorporan los resultados obtenidos para los modelos 1D, correspondientes a la Quebrada Las Zorras y al estero Huallalolén. El modelo 1D se realiza en base a perfiles transversales del cauce, por lo cual los resultados se entregan para cada uno de ellos. De esta forma, se incluye en este anexo:

- i. Archivos modelos HEC-RAS.
- ii. Perfil Longitudinal: Corresponde a la altura máxima de inundación en cada cauce, donde cada punto representa la altura de agua en cada perfil, para periodos de retorno de 10 y 100 años.
- iii. Tabla resumen resultados por perfil: En esta tabla se incluye, para cada perfil, su número de identificación, el caudal total pasante, la altura máxima, la velocidad promedio en el perfil, el área de flujo, el ancho superficial y el número de Froude. Adicionalmente se incluyen los valores mínimos y máximos para cada cauce de las variables altura máxima, velocidad y ancho superficial.
- iv. Perfiles Transversales: Corresponde a la altura de inundación en cada perfil, identificando tanto el nivel de terreno como la cota de agua, para periodos de retorno de 10 y 100 años

- v. Resultados SHP: Fuera de texto, se incluye una carpeta con los resultados de la modelación hidráulica respecto de las áreas de inundación.

f) Resultados Digitales Modelos 2D (apéndice digital)

En este apéndice (formato digital) se incorporan los resultados obtenidos para los modelos 2D, correspondientes al Estero Las Hualtatas, Modelo Norte y Modelo Sur. El modelo 2D se realiza en base a un modelo de elevación de superficie del terreno, en formato raster, con una grilla triangular de ancho máximo 2m, lo que permite obtener los resultados igualmente en formato grilla, para elementos cuadrados de 2m de ancho.

De esta forma, se incluyen en este anexo los siguientes archivos:

- i. Modelos hidráulicos Iber: “Modelo_Hualtatas_Norte” y “Modelo_Hualtatas_Sur”
- ii. Resultados de alturas y velocidades máximas de inundación en formato raster/tif.
- iii. Resultados de alturas y áreas de Inundación formato kmz: Permiten visualizar para diferentes pasos de tiempo los valores de altura y las áreas bajo inundación, utilizando el programa Google Earth.

8.4.2 Modelos de flujos de barro y/o detritos

a) Software RAMMS

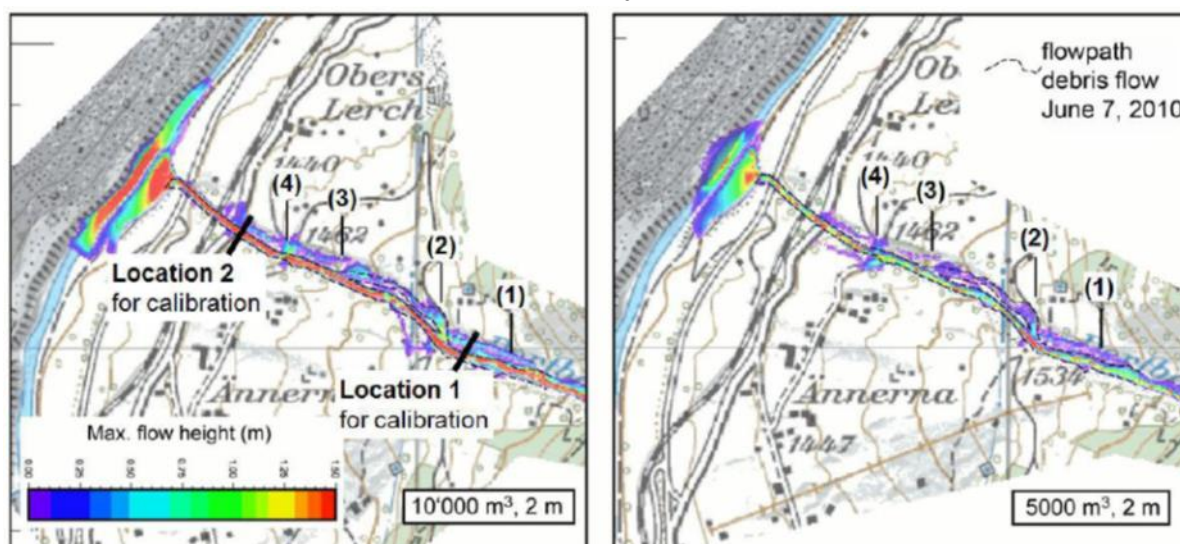
Para determinar el comportamiento hidráulico de los aluviones en las quebradas de Lo Barnechea, se utilizó el software RAMMS-DF v1.7.20, el cual realiza una simulación numérica bidimensional de remociones de tipo flujo y permite conocer, en cada punto del flujo, la velocidad, altura y energía de impacto, además de permitir la definición de zonas de inundación.

RAMMS-DF v1.7.20 es un software desarrollado por el Instituto de investigación suizo de nieve y avalanchas (WSL/SLF) y está físicamente basado en un modelo dinámico que utiliza un volumen finito para resolver ecuaciones bidimensionales de aguas someras (Schneider, Huggel, Cochachin, Guillén, & García, 2014). El modelo responde a la ley de resistencia friccional de Voellmy (S), la cual considera una reología de fluido viscoso-turbulento (Voellmy, 1955; Salm, Burkard, & Gubler, 1990; Salm, 1993).

$$S = \mu N + \frac{\rho g u^2}{\xi} [Pa], \quad \text{con } N = \rho g h \cos(\phi)$$

Donde ρ corresponde a la densidad del flujo; μ es la fricción seca de Coulomb; g la aceleración de gravedad; ξ es la fricción viscosa-turbulenta; h la altura del flujo; ϕ el ángulo del talud; y u es la velocidad del flujo. Los coeficientes de fricción del modelo permiten simular el comportamiento del evento de manera que queden correctamente representadas las etapas de fluencia y de detención del flujo. En la siguiente figura se presenta un ejemplo de salida gráfica del software RAMMS-DF v1.7.20.

Figura N° 8.4—29: Ejemplo de salida gráfica de resultados de simulación numérica con RAMMS-DF v1.7.20



Fuente: Manual RAMMS-DF v1.7.20

RAMMS-DF v1.7.20 cuenta con módulos de cohesión, incorporación de material, efecto de zonas curvas, y además, con la opción de agregar zonas con características diferentes a las del cauce para generar resultados cada vez más realistas. El programa también cuenta con herramientas para la modificación del modelo de elevación digital, acondicionados para la simulación de flujos sucesivos o la evaluación de obras para la mitigación de estos eventos, atributos que hacen de este programa una de las herramientas con mayores ventajas respecto a otros modelos numéricos de remociones de tipo flujo.

Una correcta representación de los fenómenos a través de RAMMS-DF v1.7.20 depende en mayor medida de la información topográfica existente y, sobre todo de la calibración de los parámetros del modelo, en el Cuadro N° 8.4-5 se presenta una recopilación con los coeficientes de fricción y viscosidad utilizados en distintas simulaciones numéricas de diversos tipos de remociones de tipo flujo. La determinación de las áreas de peligro aluvional se realizó en base a eventos asociados a los distintos periodos de retorno definidos para la zona de estudio. La mayor incertidumbre en los resultados de las inundaciones se asocia a los caudales y a los volúmenes de ingreso al modelo.

Cuadro N° 8.4-5: Recopilación de coeficientes de fricción y viscosidad.

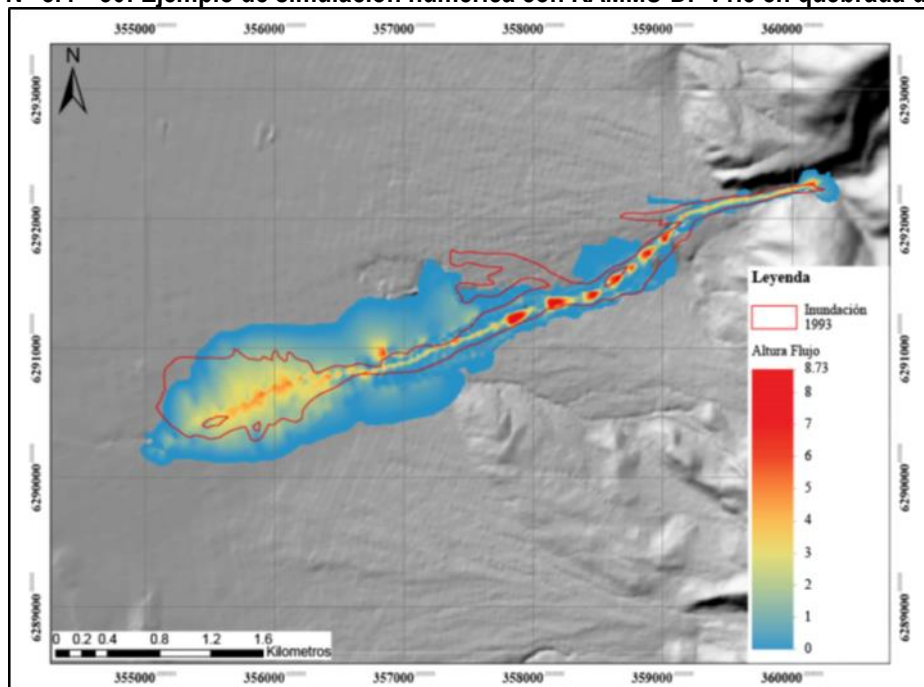
Referencia	Flujo granular		Flujo viscoso		Flujo Hiperconcentrado		Inundación de detritos	
	μ	ξ [m/s ²]	μ	ξ [m/s ²]	μ	ξ [m/s ²]	μ	ξ [m/s ²]
Hungr y Evans (1996)	-	-	0,1	500	-	-	-	-
Scheuner et al. (2011)	0,15	125	-	-	-	-	-	-
Hussin et al. (2012)	-	-	0,06	500	-	-	-	-
Deubelbeiss y Graf (2013)	0,225	130	-	-	-	-	-	-
WSL (2017)	0,05-0,4	100-200	0,05-0,4	200-1000	-	-	-	-
Schneider et al. (2014)	0,16	500	0,08	500	0,04	500	0,01	500
Schraml et al. (2015)	0,07-0,11	200-300	-	-	-	-	-	-

Fuente: Modificado de Celis (2018)

Se analizaron los procesos aluvionales en las quebradas Huallalolén y del Ñilhue. El procedimiento para la construcción del modelo es el siguiente:

- Preparación de la información topográfica: Se ingresó la información cartográfica disponible, a partir de la cual se construyó la malla de modelación. Debido a la superficie de las quebradas y al tiempo de modelación requerido por el modelo y el alcance de los flujos, se utilizó una resolución de la celda de 5 m.
- Definición del dominio del modelo: Se delimitó el dominio de la modelación en base al área que se requería simular. Esta incluyó los sectores cercanos a cauces para una adecuada representación de los efectos reales del flujo en el área de estudio.
- Determinación de parámetros de entrada: En base a la información hidrológica, análisis granulométricos e información geológica y geomorfológica levantada en este estudio se procedió a evaluar los parámetros de entrada del modelo. En este punto se determinaron los datos de entrada concernientes a zonas de inicio de los eventos aluvionales, volúmenes y caudales iniciales.
- Calibración del modelo: Como no se cuenta con una descripción detallada de los eventos registrados en el área, se utilizaron los coeficientes del modelo obtenidos en las quebradas de Macul y San Ramón en Celis (2018), debido a la similitud de las quebradas del frente cordillerano de Santiago con las de la Comuna de Lo Barnechea.
- Simulación de eventos: Se simularon los caudales de crecida y volúmenes definidos para cada período de retorno determinado.
- Extracción de resultados: Para cada simulación se obtuvo un ráster con información de la velocidad y altura para cada elemento definido en la malla. Con esto se definió el mapa de intensidad de flujos de detritos, orientado a complementar la información geomorfológica y el catastro de la zona de estudio, en la evaluación de susceptibilidad de flujos de barro y/o detritos.

En la Figura N° 8.4—30 se presenta un ejemplo del resultado de una simulación realizada en la quebrada de Macul con RAMMS-DF v1.5, en donde se puede apreciar la distribución de alturas máximas alcanzadas por un evento aluvional en un modelo de elevación digital con una resolución espacial de 9 m (Celis, 2018). Es importante mencionar que las nuevas versiones del modelo numérico añaden nuevos coeficientes que aumentan la confiabilidad de los resultados obtenidos, al abordar más aristas de estos complejos fenómenos.

Figura N° 8.4—30: Ejemplo de simulación numérica con RAMMS-DF v1.5 en quebrada de Macul.

Fuente: Celis (2018)

b) Estimación de Parámetros de entrada**i) Estimación de los caudales**

En el 8.3.5 se estimaron los caudales máximos líquidos para las quebradas Huallalolén y del Ñilhue los cuales se presentan en el Cuadro N° 8.4-6. Como se puede observar, las diferencias entre los caudales para los distintos periodos de retorno consecutivos contienen un aumento que fluctúa entre un 15% a un 30% aproximadamente. Para efectos de entender el comportamiento de distintos eventos, se analizaron los caudales asociados a periodos de retorno de 100 y 25 años, con el fin de visualizar las magnitudes de un evento de baja ocurrencia (100 años) respecto a un evento de mayor recurrencia (25 años).

A partir de la ecuación propuesta por Armanini y Gregoretti (2000) se estimó el caudal de un posible evento aluvional para cada una de las quebradas, en donde Q_p representa el caudal máximo total del flujo de detritos, Q_w el caudal máximo líquido estimado a partir de un evento meteorológico, C_v la concentración volumétrica de sólidos y C^* la concentración máxima de los sólidos (o concentración de empaquetamiento), la que generalmente toma valores del orden del 65%. Como los eventos catastrados no poseen información certera sobre la concentración volumétrica de sedimentos aproximada, se calculan los caudales máximos para cuatro concentraciones de sedimentos posibles, que varían entre un evento de flujo de detritos a un evento de inundación de detritos.

$$Q_p = Q_w * \frac{C^*}{C^* - C_v}$$

Cuadro N° 8.4-6: Cálculo de caudales totales para flujos de detritos a partir de caudales líquidos máximos estimados en la quebradas Huallalolén y del Ñilhue

Quebrada	T [años]	Caudal Líquido Máximo (Q_w) [m^3/s]	Concentración volumétrica (C_v) [%]	Caudal Máximo Total (Q_p) [m^3/s]
Huallalolén	100	22,2	50	96,2
			40	57,7
			30	41,2
			20	36,1
	25	17,9	50	77,5
			40	46,5
			30	33,2
			20	25,8
Del Ñilhue	100	17,0	50	73,7
			40	44,2
			30	31,6
			20	24,6
	25	12,5	50	54,2
			40	32,5
			30	23,2
			20	18,1

Fuente: Elaboración propia (2021)

ii) Estimación de los volúmenes de flujos

A partir de los caudales máximos totales estimados con los caudales líquidos, se calculó el volumen de los flujos de detritos mediante las fórmulas empíricas expresadas por Mizuyama et al. (1992), Jitousono et al. (1996), Bovis y Jakob (1999) y Rickenmann (1999), las que se presentan en el Cuadro N° 8.4-7 junto con los volúmenes estimados para cada caudal y concentración de cada quebrada.

En términos de flujos aluvionales en la zona central de Chile, los cuales usualmente corresponden a flujos hiperconcentrados con concentraciones volumétricas de sedimentos en torno al 30% y 40%, las fórmulas de Mizuyama et al. (1992), Bovis y Jakob (1999) y Rickenmann (1999) tienden a subestimar los volúmenes al ser calibrados en zonas donde se producen eventos aluvionales con concentraciones de sólidos mayores a un 50%. Las fórmulas generadas por Jitousono et al. (1996), estimadas para flujos de detritos de origen volcánico, generan volúmenes más acordes a los eventos de la zona central al ser más hiperconcentrados, por lo tanto, los volúmenes que se presentan a continuación, en el Cuadro N° 8.4-8 corresponden a un promedio de las dos fórmulas empíricas determinadas para este tipo de flujo.

Cuadro N° 8.4-7: Estimación de volúmenes de flujos de detritos mediante fórmulas empíricas.

Quebrada	Caudal Líquido (Q _p) [m³/s]	Referencia	Fórmula	Volumen (V) [m³]			
				Cv 50%	Cv 40%	Cv 30%	Cv 20%
Huallalolén	22,2	Mizuyama et al. (1992)	$Q_p = 0.135V^{0.78}$	4.541,9	2.359,5	1.532,8	1.110,6
		Mizuyama et al. (1992)	$Q_p = 0.019V^{0.79}$	49.512,0	25.935,2	16.940,2	12.324,2
		Jitousono et al. (1996)	$Q_p = 0.006V^{0.83}$	125.281,9	67.752,0	45.193,5	33.399,1
		Jitousono et al. (1996)	$Q_p = 0.001V^{0.87}$	378.227,9	210.259,2	142.820,9	106.988,8
		Bovis y Jakob (1999)	$Q_p = 0.04V^{0.90}$	5.709,2	3.236,5	2.227,0	1.684,4
		Bovis y Jakob (1999)	$Q_p = 0.003V^{1.01}$	28.923,2	17.441,9	12.500,1	9.746,5
		Rickenmann (1999)	$Q_p = 0.1V^{0.83}$	3.926,0	2.121,6	1.414,5	1.045,0
		Promedio		251.754,9	139.005,6	94.007,2	70.194,0
Huallalolén	17,9	Mizuyama et al. (1992)	$Q_p = 0.135V^{0.78}$	3.443,5	1.788,8	1.162,1	842,0
		Mizuyama et al. (1992)	$Q_p = 0.019V^{0.79}$	37.669,5	19.731,9	12.888,3	9.376,5
		Jitousono et al. (1996)	$Q_p = 0.006V^{0.83}$	96.610,6	52.246,7	34.850,8	25.755,6
		Jitousono et al. (1996)	$Q_p = 0.001V^{0.87}$	295.086,4	164.040,3	111.426,2	83.470,7
		Bovis y Jakob (1999)	$Q_p = 0.04V^{0.90}$	4.491,2	2.546,1	1.751,9	1.325,0
		Bovis y Jakob (1999)	$Q_p = 0.003V^{1.01}$	23.355,2	14.084,2	10.093,7	7.870,2
		Rickenmann (1999)	$Q_p = 0.1V^{0.83}$	3.026,6	1.635,5	1.090,5	805,6
		Promedio		195.848,5	108.143,5	73.138,5	54.613,1
Del Ñilhue	17,0	Mizuyama et al. (1992)	$Q_p = 0.135V^{0.78}$	3.227,7	1.676,8	1.089,3	789,2
		Mizuyama et al. (1992)	$Q_p = 0.019V^{0.79}$	35.338,2	18.510,7	12.090,7	8.796,2
		Jitousono et al. (1996)	$Q_p = 0.006V^{0.83}$	90.917,7	49.168,0	32.797,2	24.237,9
		Jitousono et al. (1996)	$Q_p = 0.001V^{0.87}$	278.455,3	154.795,0	105.146,2	78.766,3
		Bovis y Jakob (1999)	$Q_p = 0.04V^{0.90}$	4.246,3	2.407,2	1.656,3	1.252,8
		Bovis y Jakob (1999)	$Q_p = 0.003V^{1.01}$	22.216,9	13.397,7	9.601,7	7.486,6
		Rickenmann (1999)	$Q_p = 0.1V^{0.83}$	2.848,0	1.539,1	1.026,1	758,1
		Promedio		184.686,5	101.981,5	68.971,7	51.502,1
Del Ñilhue	12,5	Mizuyama et al. (1992)	$Q_p = 0.135V^{0.78}$	2.176,2	1.130,5	734,4	532,1
		Mizuyama et al. (1992)	$Q_p = 0.019V^{0.79}$	23.944,6	12.542,6	8.192,5	5.960,1
		Jitousono et al. (1996)	$Q_p = 0.006V^{0.83}$	62.798,9	33.961,4	22.653,7	16.741,7
		Jitousono et al. (1996)	$Q_p = 0.001V^{0.87}$	195.552,1	108.708,6	73.841,5	55.315,5
		Bovis y Jakob (1999)	$Q_p = 0.04V^{0.90}$	3.017,4	1.710,6	1.177,0	890,2
		Bovis y Jakob (1999)	$Q_p = 0.003V^{1.01}$	16.385,7	9.881,3	7.081,6	5.521,6
		Rickenmann (1999)	$Q_p = 0.1V^{0.83}$	1.966,3	1.062,6	708,4	523,4
		Promedio		129.175,5	71.335,0	48.247,6	36.028,6

Fuente: Elaboración propia (2021)

iii) Estimación de velocidades

Para estimar la velocidad de los eventos aluvionales se consideró la fórmula para flujos newtonianos turbulentos de Manning-Strickler y una fórmula empírica (Rickenmann, 1999), las cuales han sido utilizadas satisfactoriamente en flujos hiperconcentrados (PWRI, 1988) y pulsos inestables de flujos de detritos (Koch, 1998). Las ecuaciones involucran H (m) el espesor máximo del flujo, S la pendiente promedio del cauce, además de coeficientes dependientes del caudal total del flujo (Q_p): n el coeficiente de flujo turbulento de Manning y C₁ [m^{0.7}/s] un coeficiente empírico.

$$V = \frac{1}{n} * H^{2/3} * S^{1/2} \quad \text{Ecuación de Manning-Strickler}$$

$$V = C_1 * H^{0.3} * S^{0.5} \quad \text{Ecuación Empírica}$$

$$n = 0,077 * Q_p^{1/15} \quad \text{Coeficiente de Manning-Strickler}$$

$$C_1 = 10 * Q_p^{2/25} \quad \text{Coeficiente de Manning-Strickler}$$

Para la estimación de la pendiente promedio S y las alturas máximas de flujo H se generaron perfiles longitudinales y transversales en el ápice de ambas quebradas. Las ubicaciones en los perfiles se pueden observar en la Figura N° 8.4-31 para la quebrada de Huallalolén y en la Figura N° 8.4—34 para la quebrada del Ñilhue, en esta última se puede apreciar que existen dos tributarios que confluyen en el ápice de la quebrada.

Mediante la topografía de la zona se obtuvo el perfil longitudinal (Figura N° 8.4—32) y transversal (Figura N° 8.4-33) de la quebrada Huallalolén, desde donde se calculó una pendiente promedio de 0,31 y una altura máxima que fluctúa entre 2,9 m en eventos menores y 4,8 m en eventos de mayores proporciones.

Paralelamente, mediante la topografía de la zona se obtuvieron los perfiles longitudinales del tributario oriental (Figura N° 8.4—35) y del tributario occidental (Figura N° 8.4—36), junto con el perfil transversal del ápice de la quebrada del Ñilhue (Figura N° 8.4—37). Desde donde se calcula que la pendiente promedio corresponde a 0,34, considerando la máxima pendiente entre ambos tributarios, y la altura máxima fluctúa entre una altura de 2,4 m en eventos menores donde la quebrada admite un 50% aproximado de área transversal y 4,3 m en eventos de mayores proporciones donde se alcanza un 100% de la capacidad total de la quebrada.

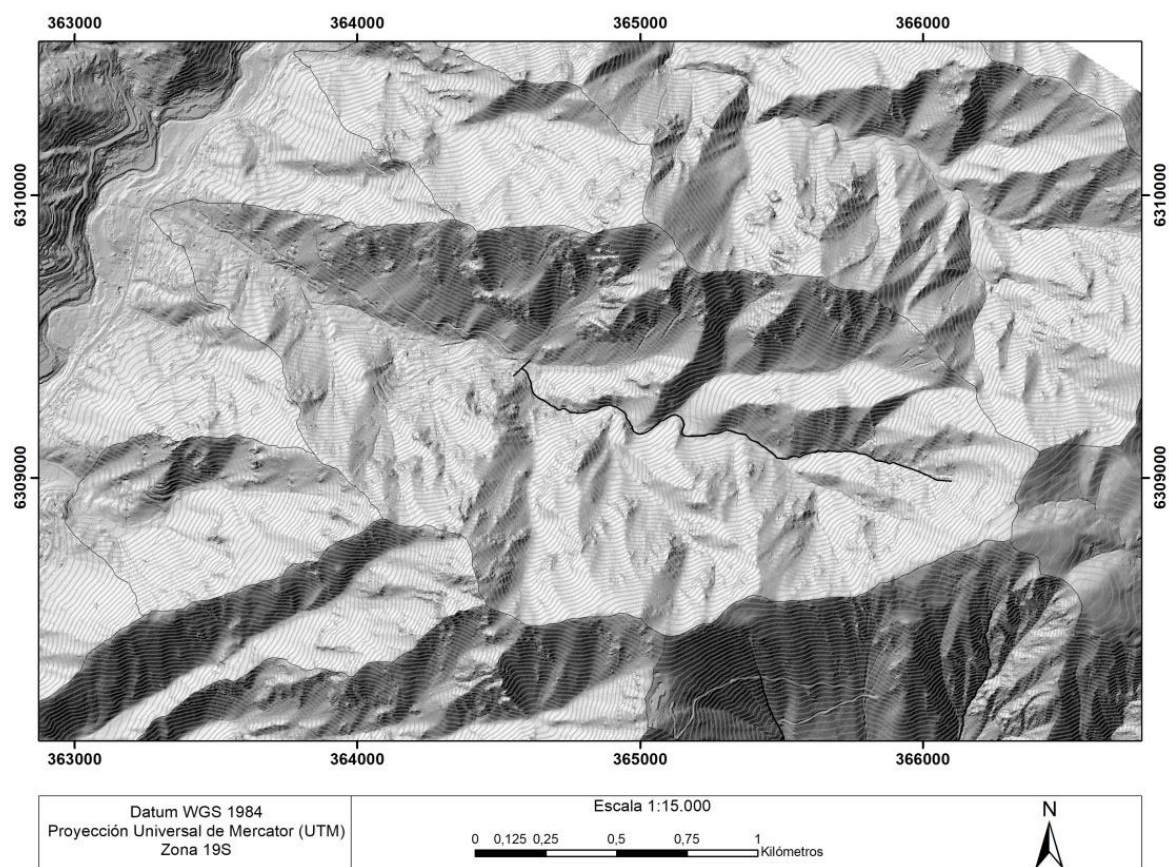
Los valores asociados a ambas ecuaciones y sus coeficientes se presentan en el siguiente cuadro. Se puede apreciar que la velocidad no varía, en estos casos, con las concentraciones ni con los distintos caudales en una misma quebrada.

Cuadro N° 8.4-8: Estimación de velocidades de flujos de detritos mediante fórmulas empíricas.

Quebrada	Caudal Líquido (Q_p) [m³/s]	Fórmula	Valor	Concentración volumétrica C_v			
				50%	40%	30%	20%
Huallalolén	22,2	Manning-Strickler	n	0,1	0,1	0,1	0,1
			v [m/s]	13,1	13,6	13,9	14,1
		Ecuación Empírica	n	14,1	13,8	13,5	13,2
			v [m/s]	12,0	11,5	11,2	11,0
		Promedio	v [m/s]	12,6	12,6	12,6	12,6
Huallalolén	17,9	Manning-Strickler	n	0,1	0,1	0,1	0,1
			v [m/s]	13,3	13,8	14,1	14,3
		Ecuación Empírica	n	14,2	13,6	13,2	13,0
			v [m/s]	11,8	11,3	11,0	10,8
		Promedio	v [m/s]	12,6	12,6	12,6	12,6
Del Ñilhue	17,0	Manning-Strickler	n	0,1	0,1	0,1	0,1
			v [m/s]	12,5	12,9	13,2	13,4
		Ecuación Empírica	n	14,1	13,5	13,2	12,9
			v [m/s]	11,6	11,2	10,9	10,7
		Promedio	v [m/s]	12,1	12,1	12,1	12,1
Del Ñilhue	12,5	Manning-Strickler	n	0,1	0,1	0,1	0,1
			v [m/s]	12,8	13,2	13,5	13,7
		Ecuación Empírica	n	13,8	13,2	12,9	12,6
			v [m/s]	11,1	10,9	10,6	10,4
		Promedio	v [m/s]	12,1	12,1	12,1	12,1

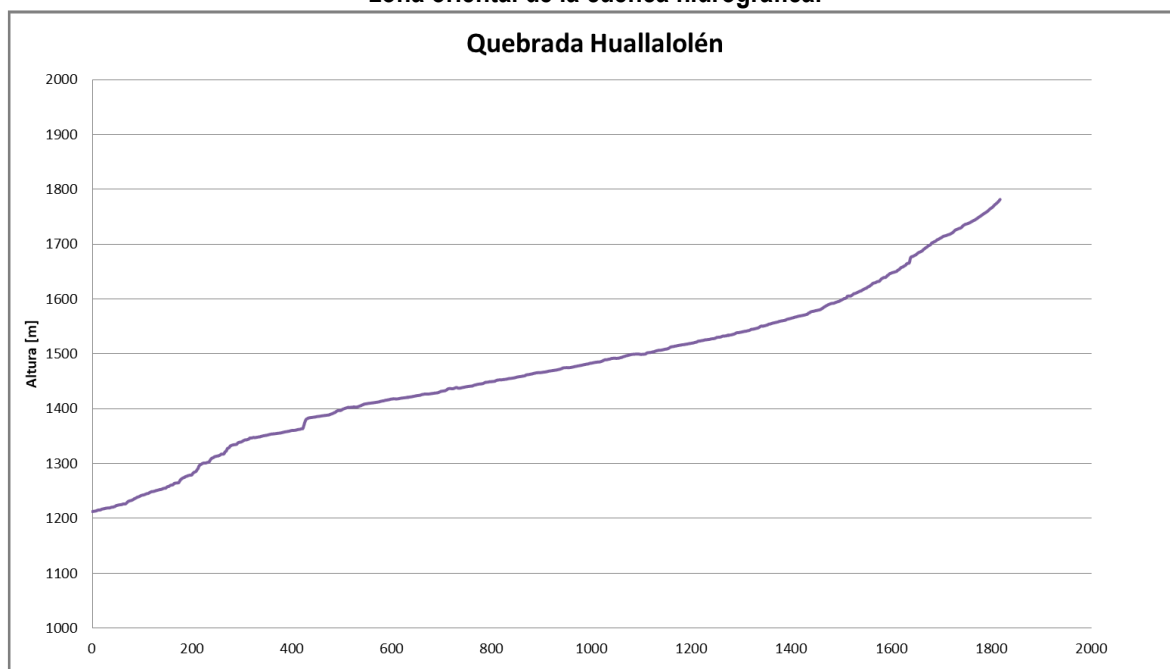
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.4—31: Ubicación de perfiles longitudinales y transversales en Quebrada Huallalolén



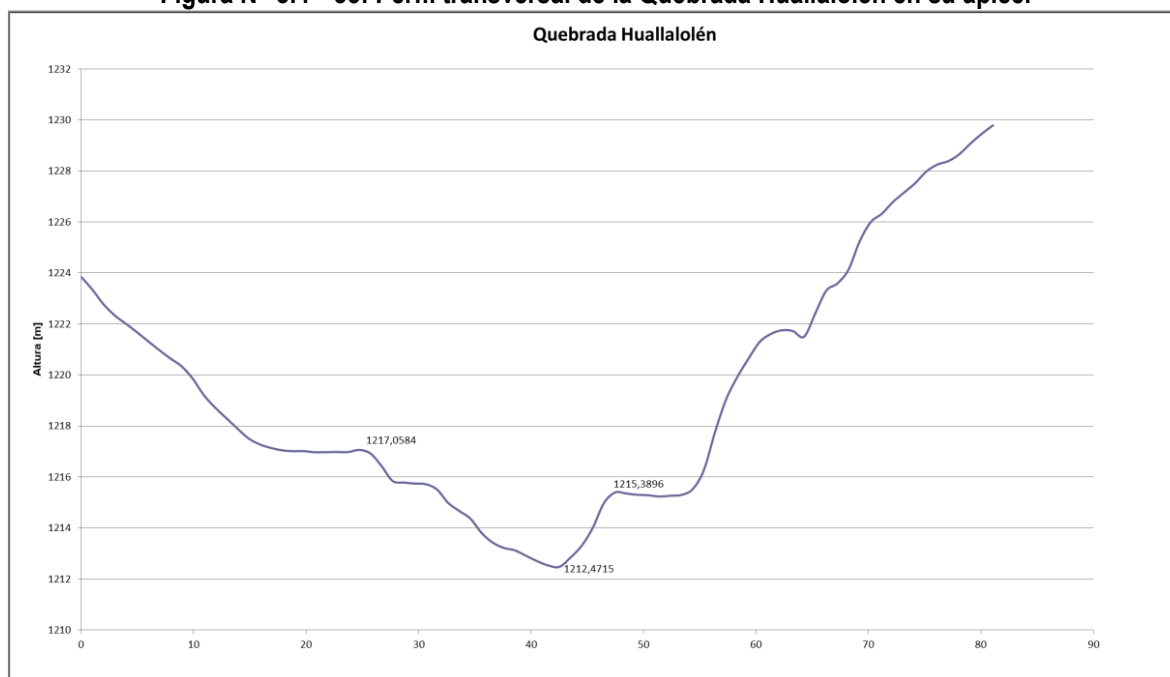
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.4—32: Perfil longitudinal de la Quebrada Huallalolén desde el ápice a su nacimiento en la zona oriental de la cuenca hidrográfica.



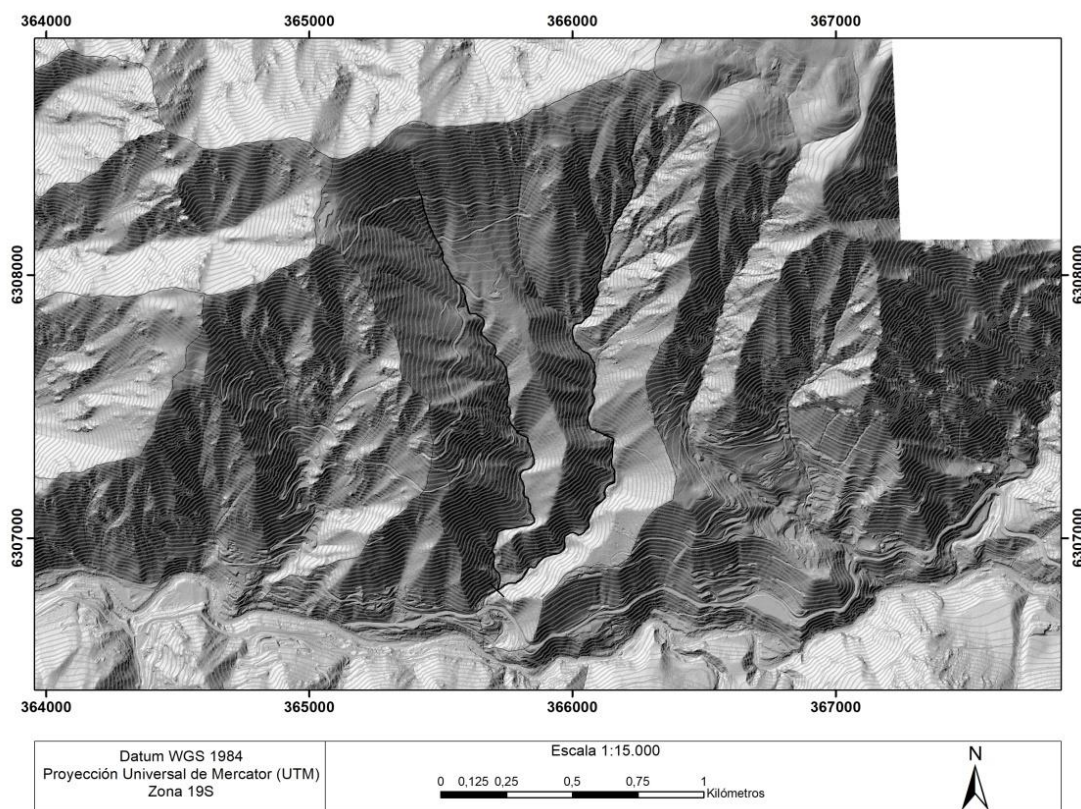
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.4—33: Perfil transversal de la Quebrada Huallalolén en su ápice.



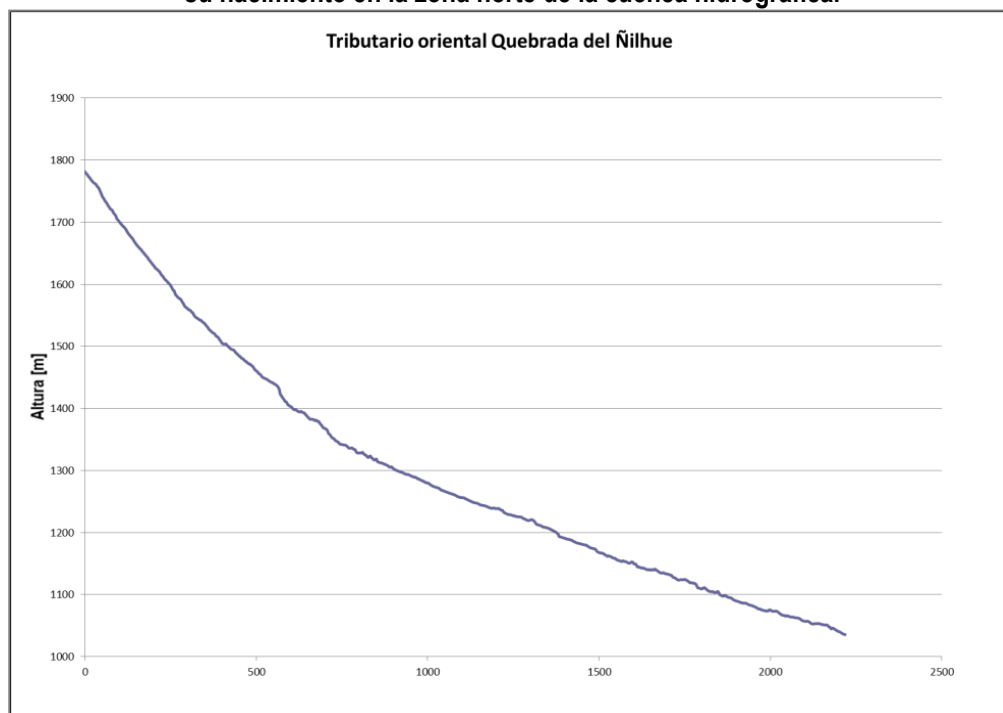
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.4—34: Ubicación de perfiles longitudinales y transversales en Quebrada Del Ñilhue.



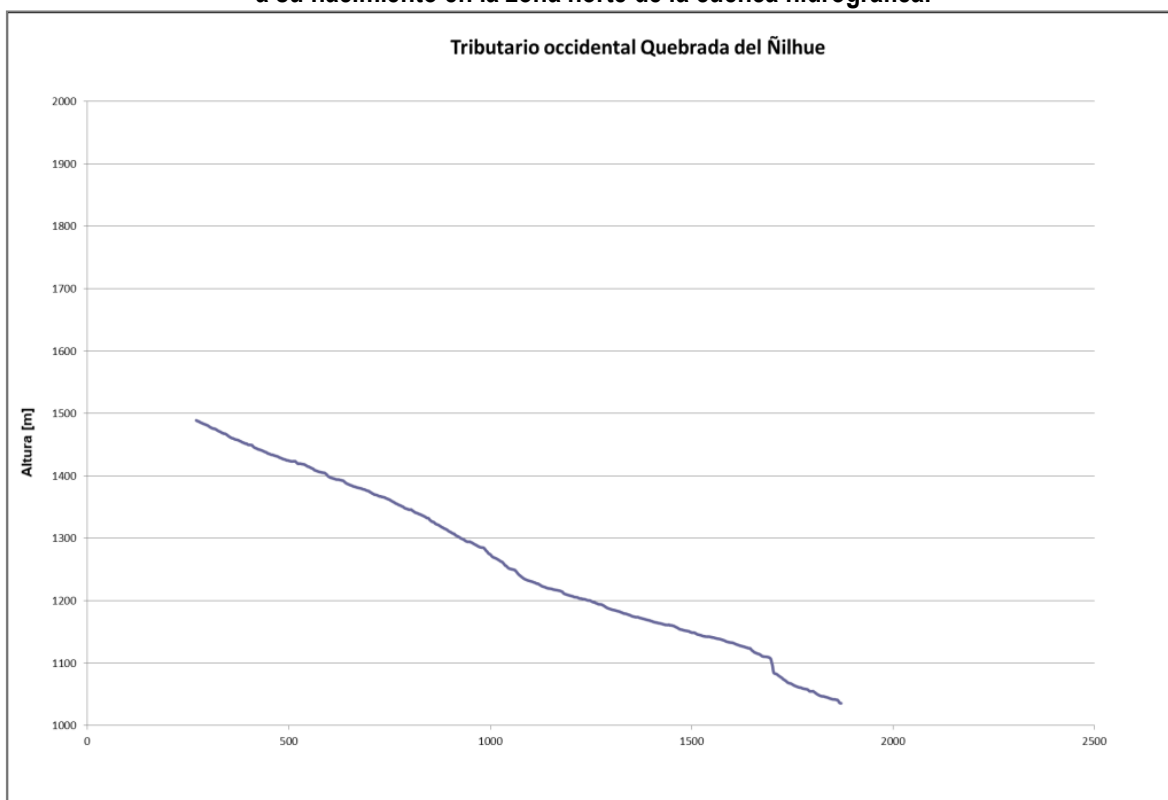
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.4—35: Perfil longitudinal del tributario oriental de la Quebrada del Ñilhue desde el ápice a su nacimiento en la zona norte de la cuenca hidrográfica.



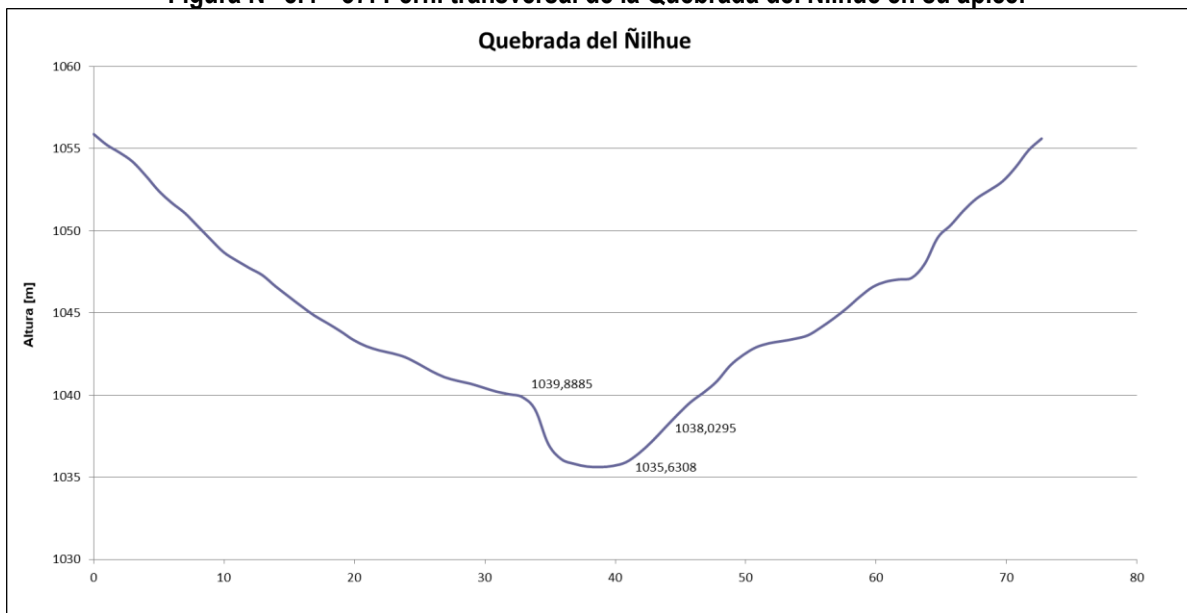
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.4—36: Perfil longitudinal del tributario occidental de la Quebrada del Ñilhue desde el ápice a su nacimiento en la zona norte de la cuenca hidrográfica.



Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.4—37: Perfil transversal de la Quebrada del Ñilhue en su ápice.



Fuente: Elaboración propia (2021)

iv) Estimación de la densidad

Para la correcta simulación de los eventos de flujos de detritos, además, es necesario conocer la densidad de cada evento, este parámetro es dependiente de la concentración volumétrica de sedimentos. Usualmente para flujos de detritos con concentraciones superiores a 50% la densidad puede alcanzar valores superiores a 1,8 - 2,3 g/cm³ y para concentraciones entre 20% a 50 %, la densidad fluctúa entre 1,33 - 1,8 g/cm³ (Sepúlveda S. , 1998). En el Cuadro N° 8.4-9 se presenta una aproximación lineal de las densidades utilizando estos parámetros.

Cuadro N° 8.4-9: Estimación de densidades de flujos de detritos a partir de concentraciones volumétricas de sedimentos.

Concentración volumétrica (C _v) [%]	Densidad (ρ) [kg/m ³]
50	1.801,7
40	1.644,7
30	1487,7
20	1330,7

Fuente: Elaboración propia (2021)

v) Coeficientes de fricción

Finalmente, dadas las similitudes de estas quebradas con las del frente cordillerano de Santiago, se utilizarán los coeficientes de fricción de las quebradas de Macul y San Ramón (Celis, 2018). Estos al igual que la densidad, dependen de la concentración volumétrica de los flujos de detritos, por lo cual, se realiza una estimación del parámetro de fricción de Coulomb μ (Cuadro N° 8.4-10), entendiendo que mientras menor sea la concentración, el comportamiento del flujo será cada vez más similar a un flujo de agua, el parámetro de fricción turbulenta se fija en el valor estándar de $\xi = 250 \text{ m/s}^2$.

Cuadro N° 8.4-10: Estimación de coeficiente de fricción de Coulomb μ a partir de concentraciones volumétricas de sedimentos.

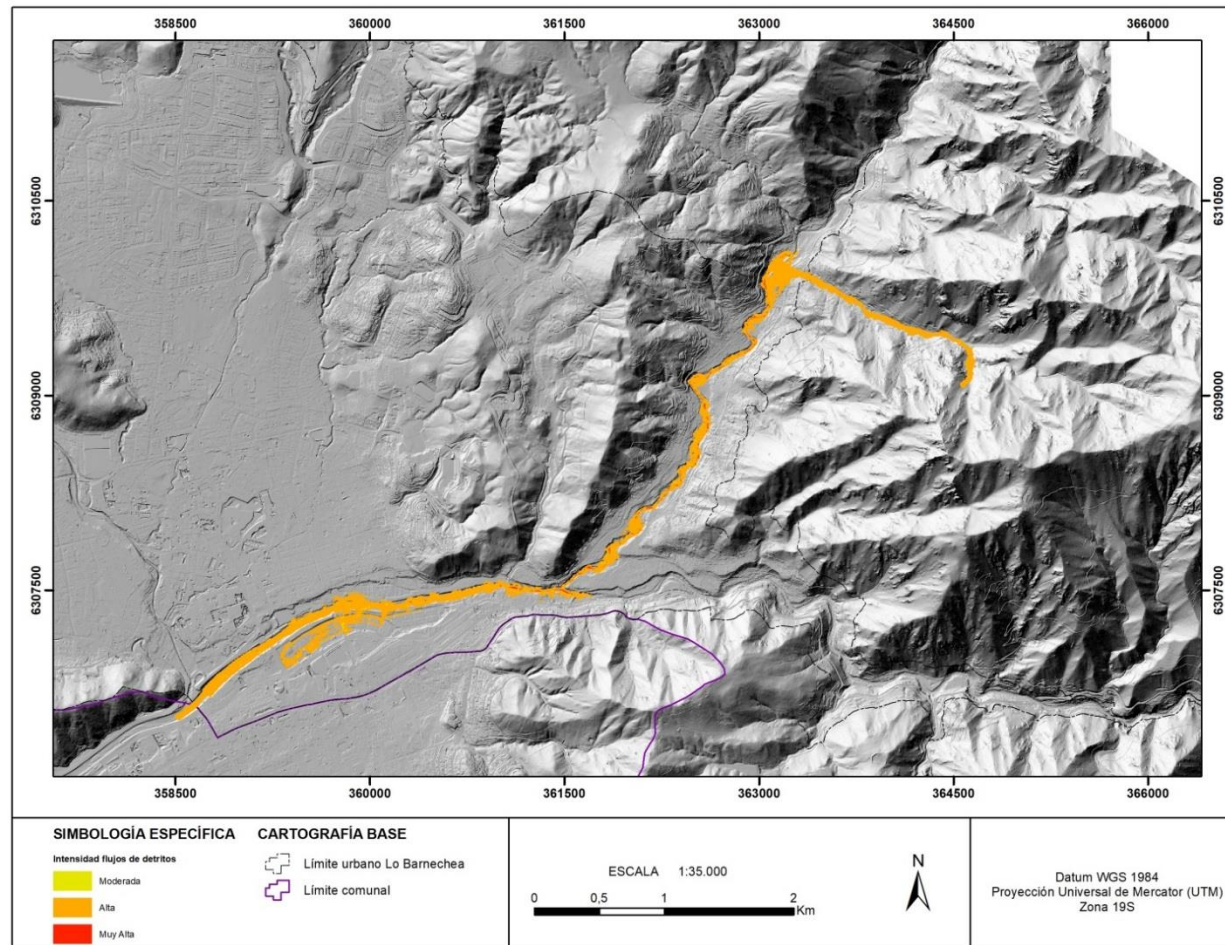
Concentración volumétrica (C _v) [%]	Coeficiente de fricción de Coulomb (μ)
50	0,15
40	0,05
30	0,01
20	0,001

Fuente: Elaboración propia (2021)

c) **Resultados de simulaciones**

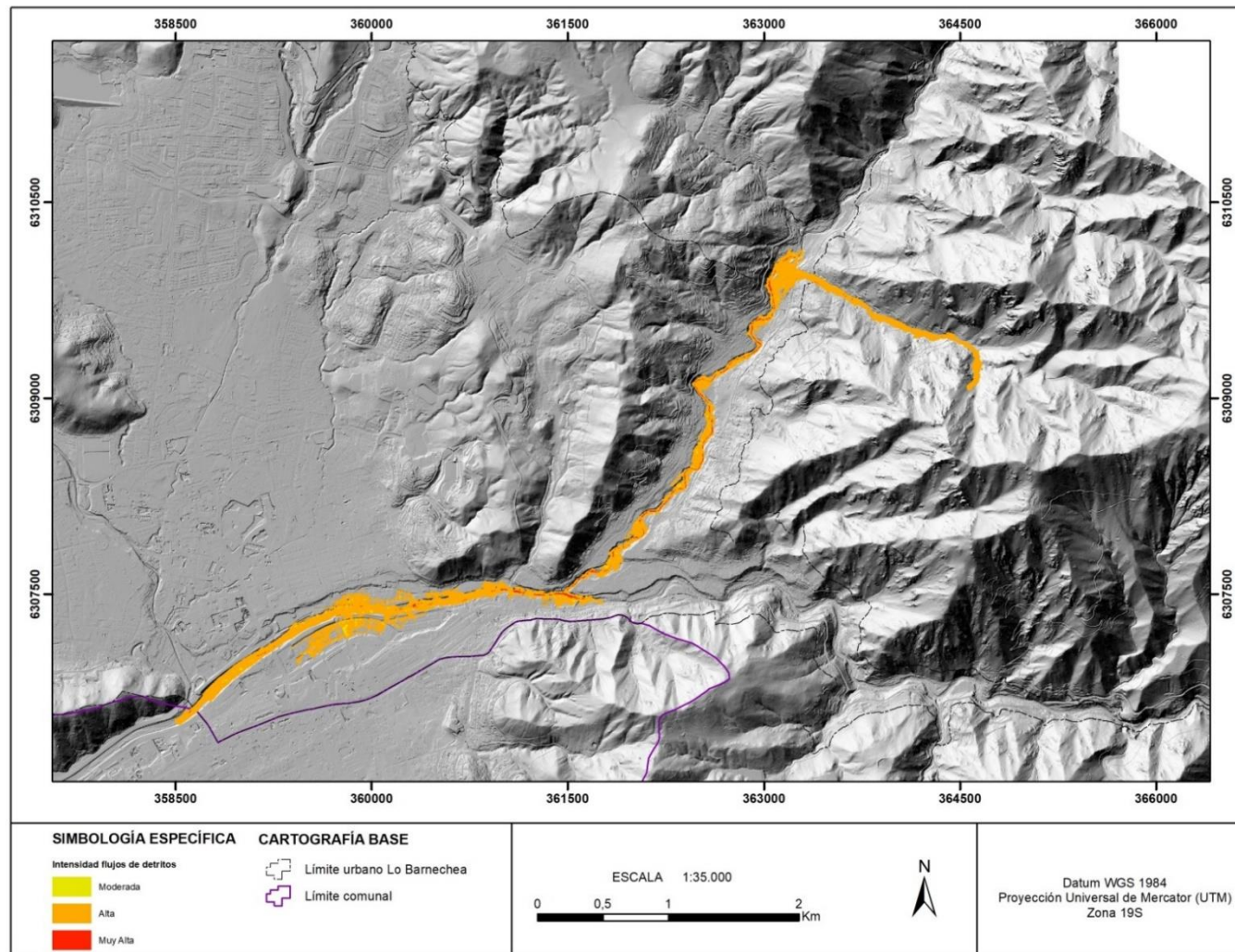
i) Quebrada Huallalolén

Figura N° 8.4—38: Mapa intensidad de flujos quebrada Huallalolén, T = 25 años, Cv = 20%



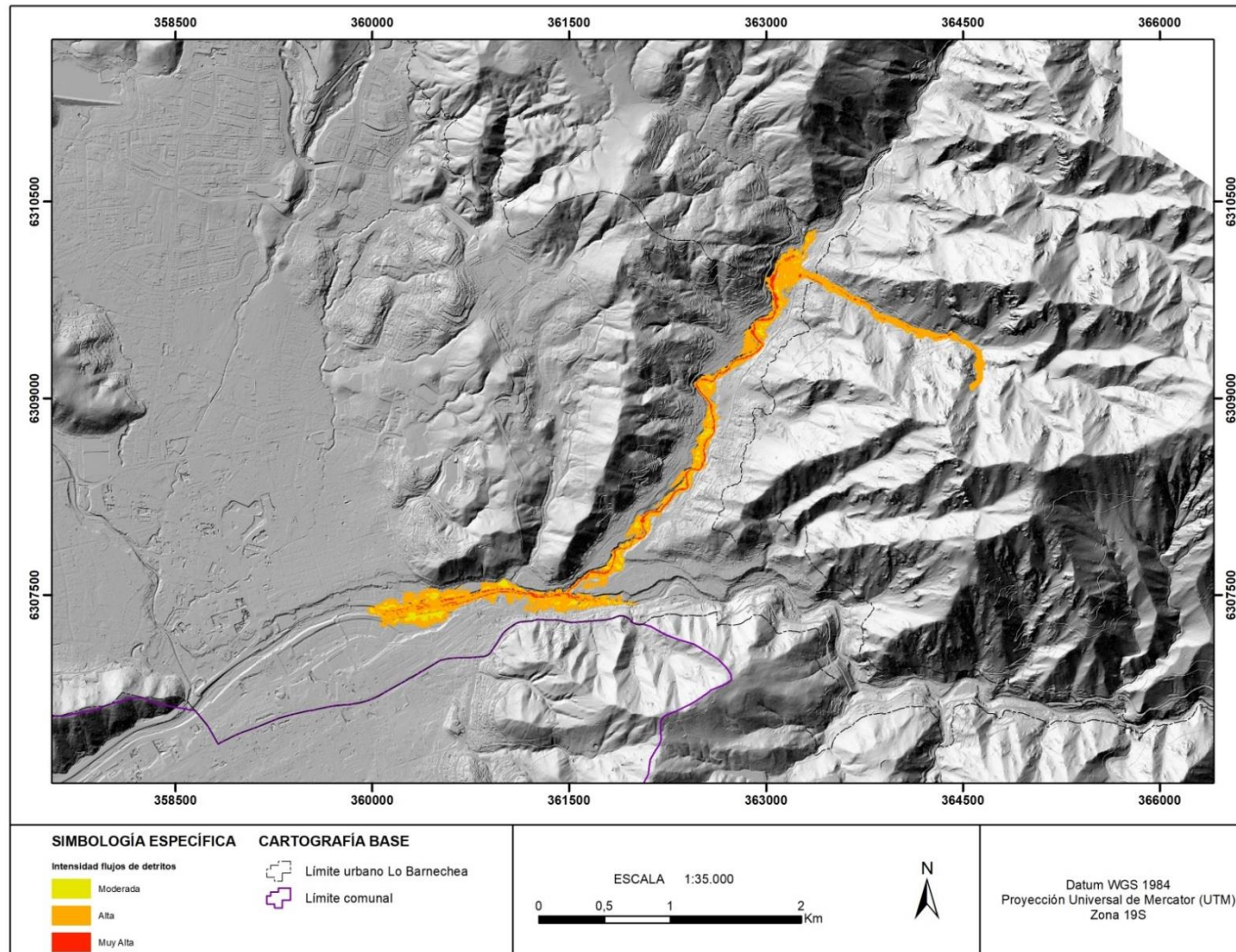
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.4—39: Mapa intensidad de flujos quebrada Huallalolén, T = 25 años, Cv = 30%



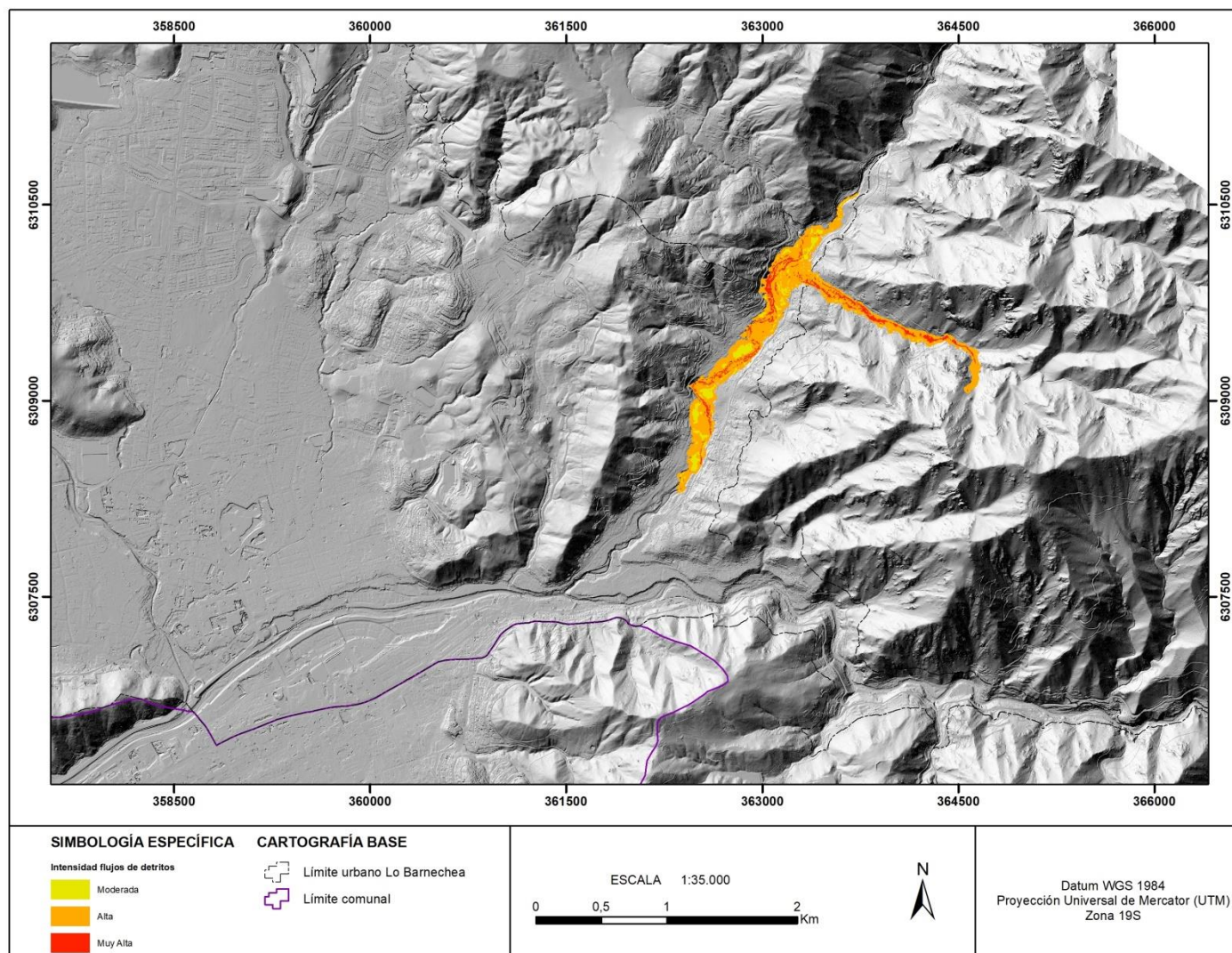
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.4—40: Mapa intensidad de flujos quebrada Huallalolén, T = 25 años, Cv = 40%



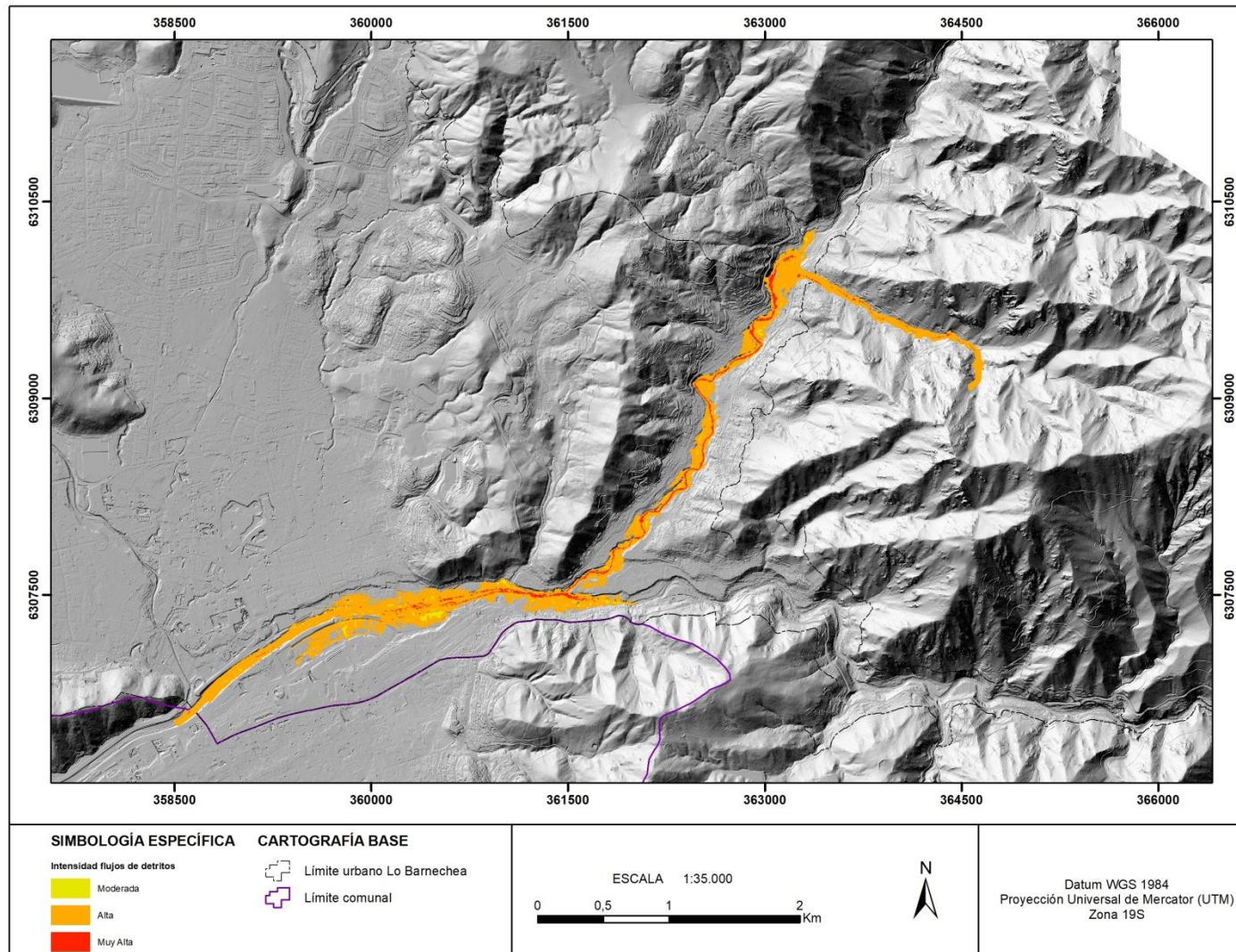
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.4—41: Mapa intensidad de flujos quebrada Huallalolén, T = 25 años, Cv = 50%



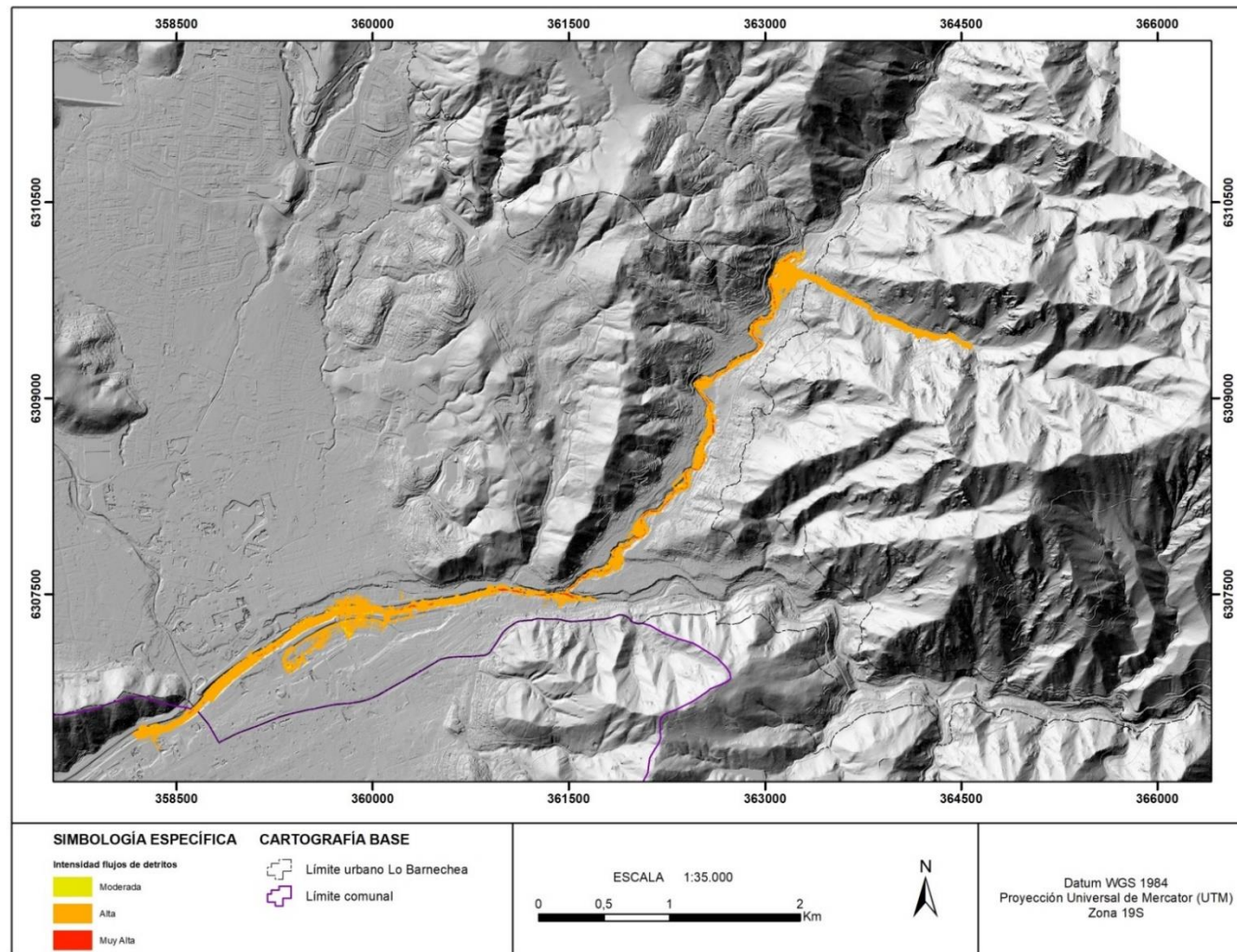
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.4—42: Mapa intensidad flujos quebrada Huallalolén, T = 25 años Final, concentraciones de 30% y 40%



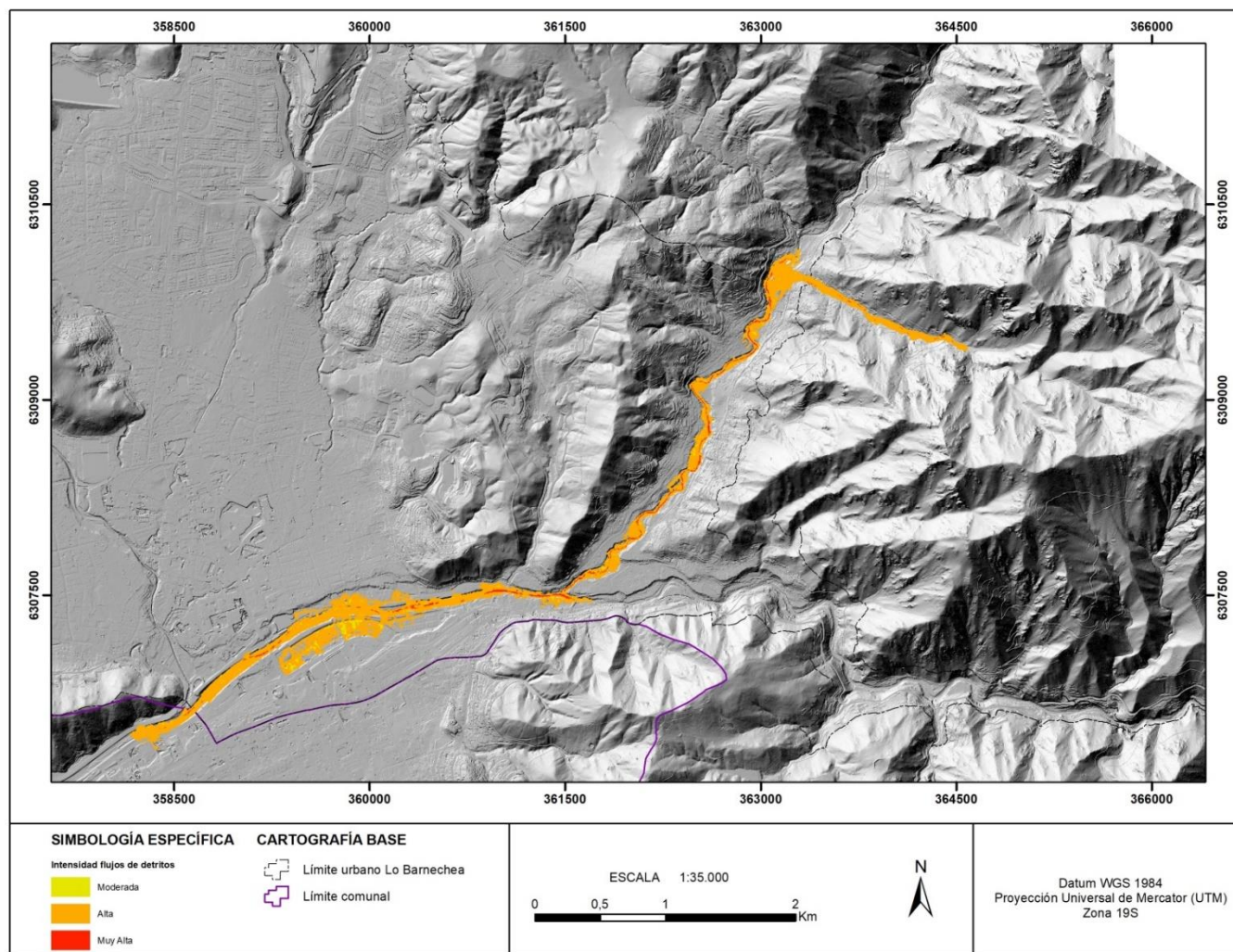
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.4—43: Mapa intensidad de flujos quebrada Huallalolén, T = 100 años, Cv = 20%.



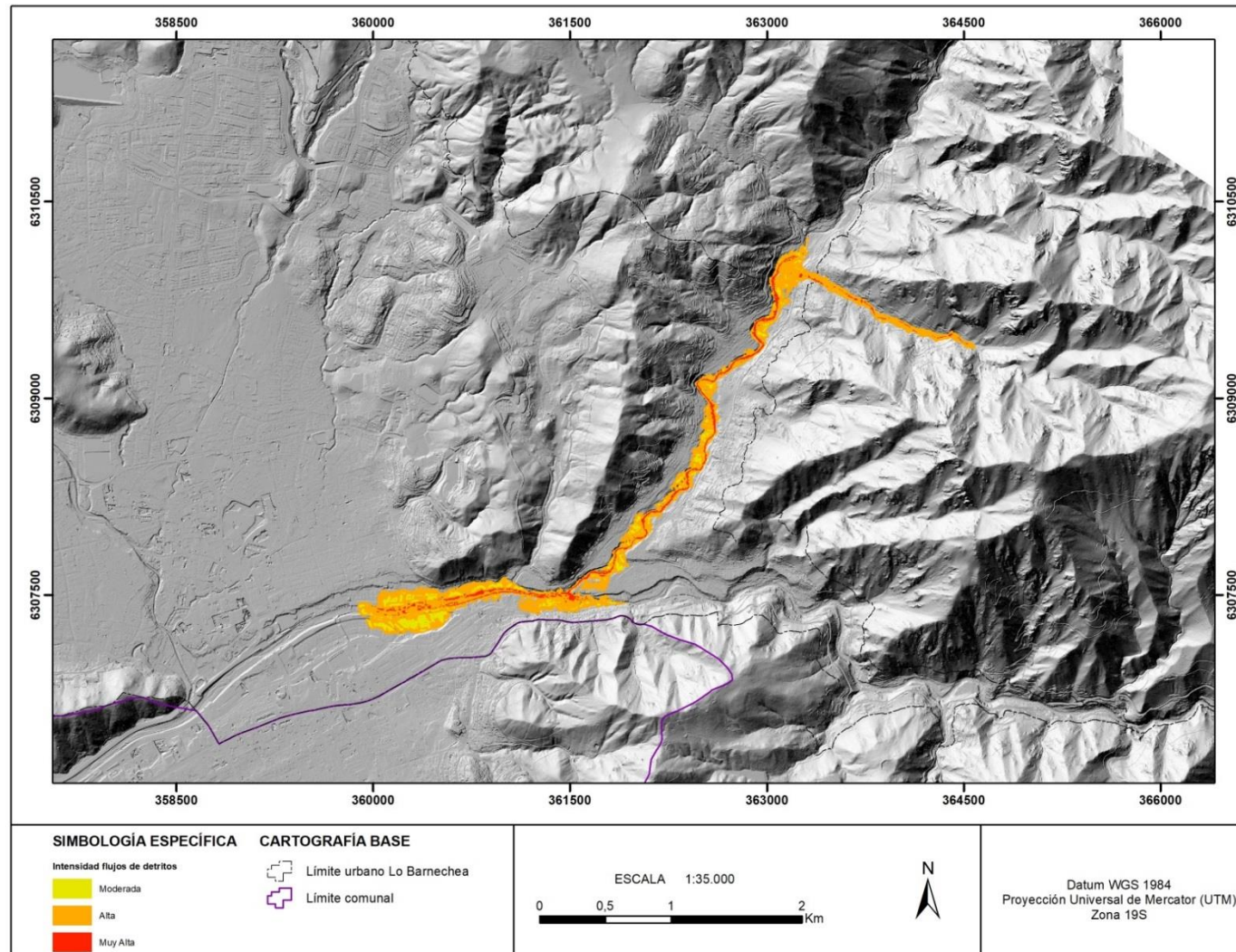
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.4—44: Mapa intensidad de flujos quebrada Huallalolén, T = 100 años, Cv = 30%.



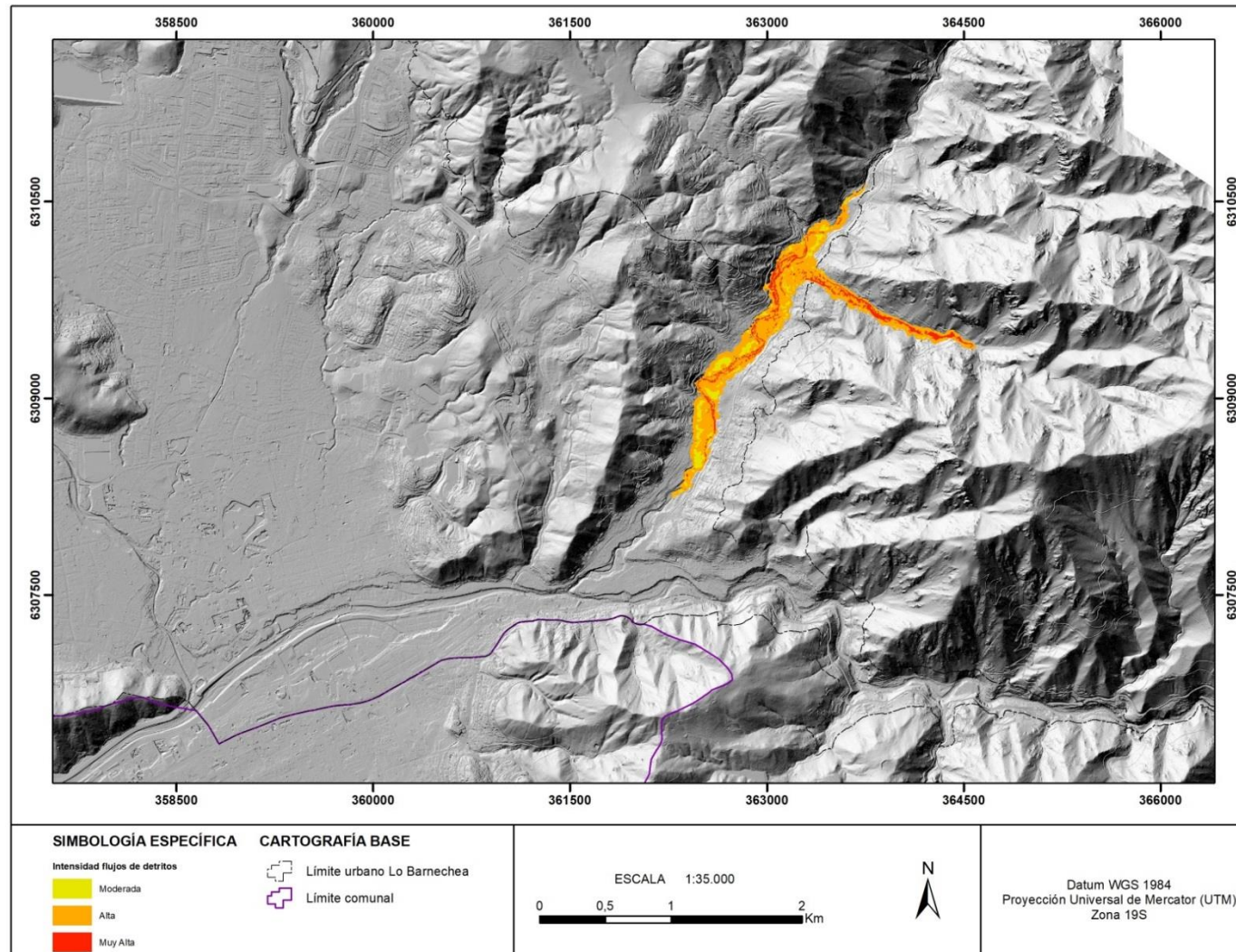
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.4—45: Mapa intensidad de flujos quebrada Huallalolén, T = 100 años, Cv = 40%



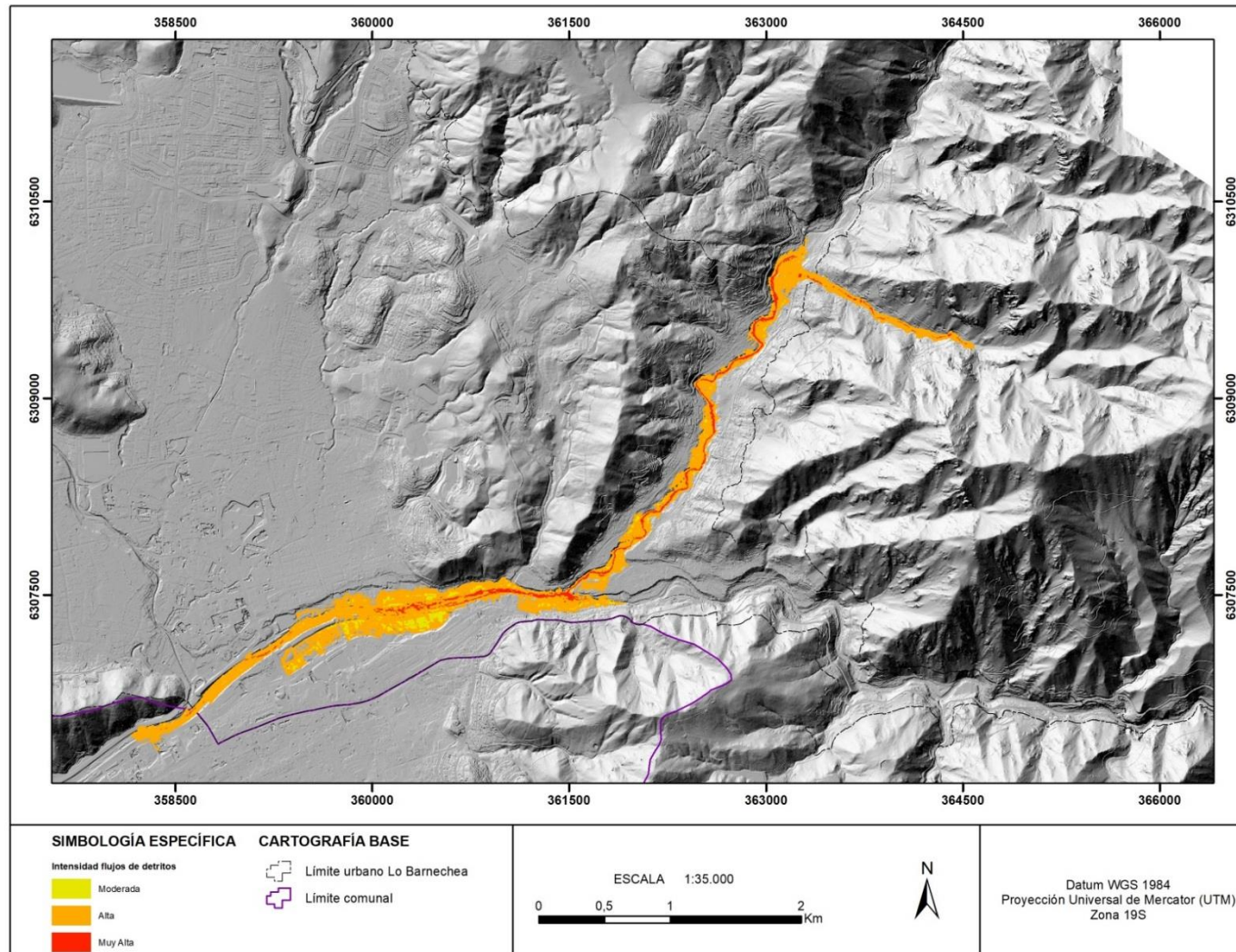
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.4—46: Mapa intensidad de flujos quebrada Huallalolén, T = 100 años, Cv = 50%



Fuente: Elaboración propia (2021)

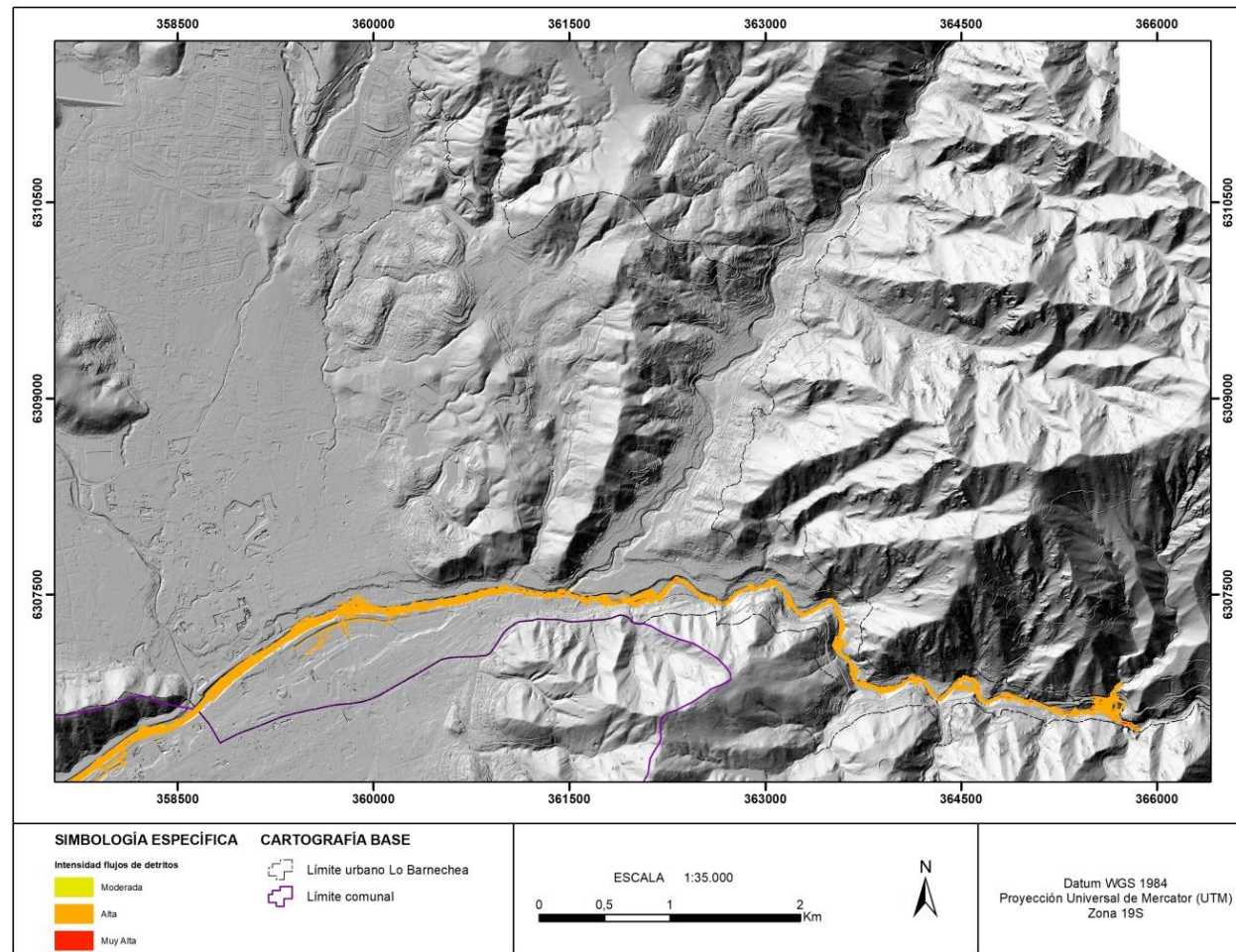
Figura N° 8.4—47: Mapa intensidad de flujos quebrada Huallalolén, T = 100 años Final, concentraciones de 30% y 40%.



Fuente: Elaboración propia (2021)

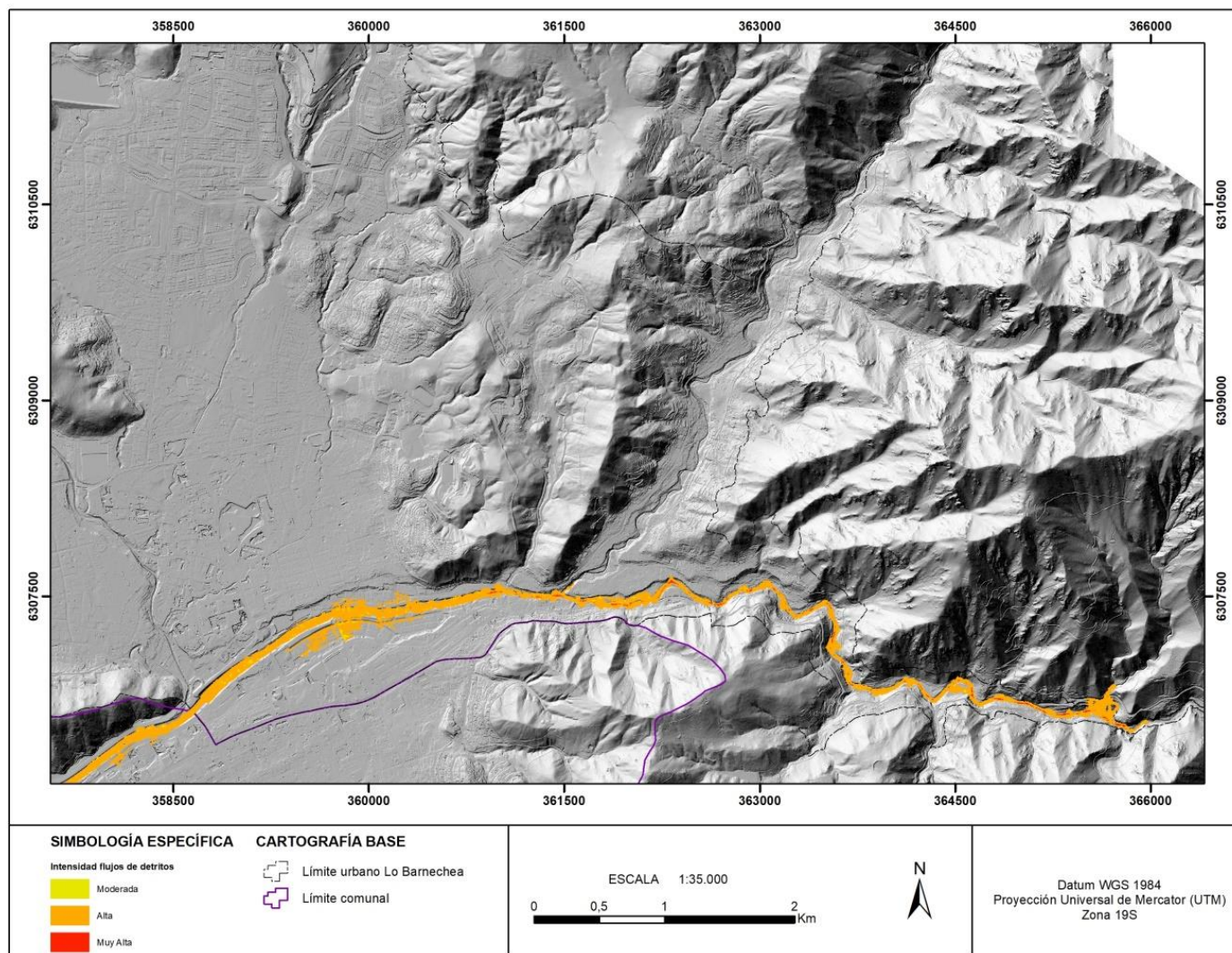
ii) Quebrada del Ñilhue

Figura N° 8.4—48: Mapa intensidad de flujos quebrada Ñilhue, T = 25 años, Cv = 20%.



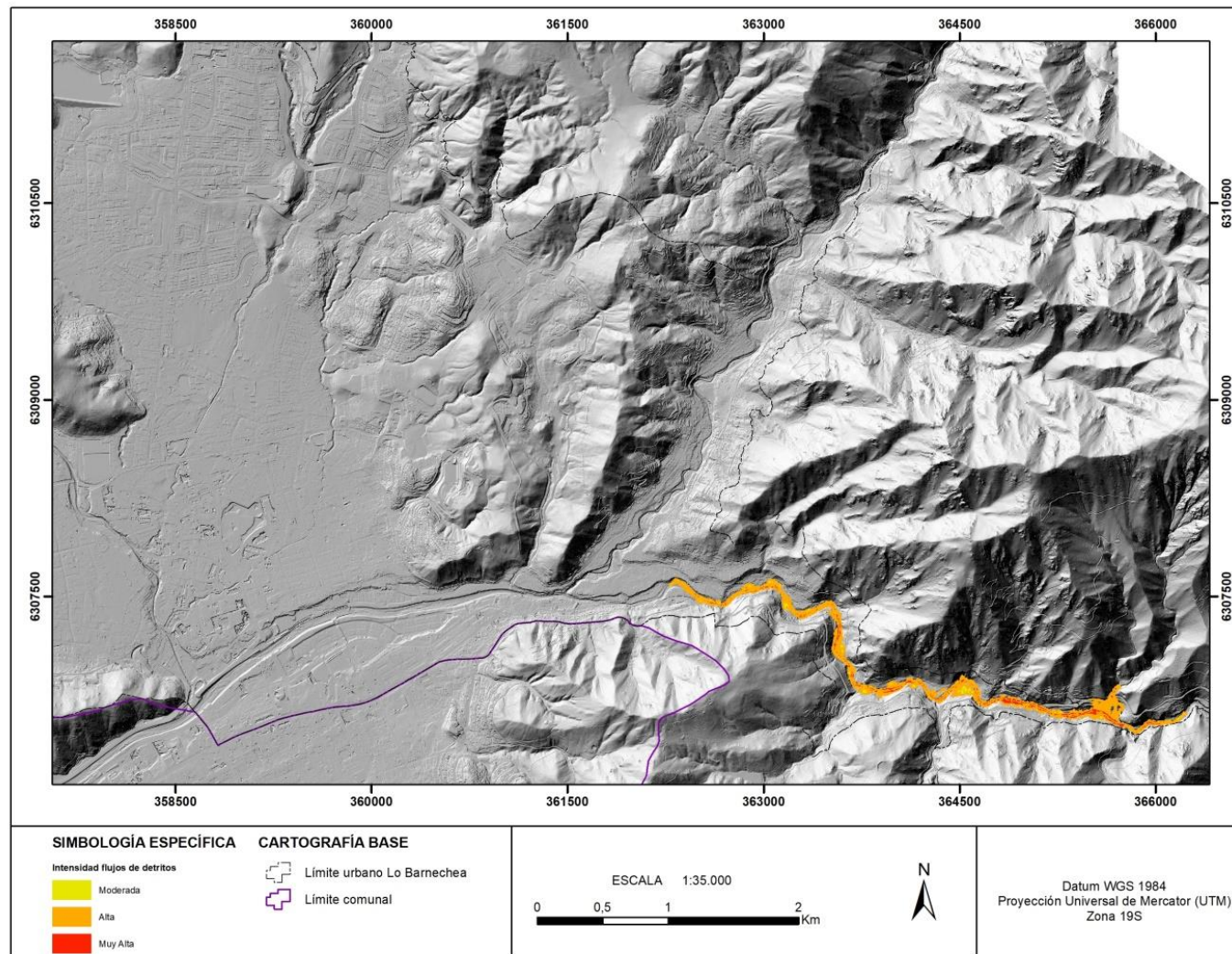
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.4—49: Mapa intensidad de flujos quebrada del Ñilhue, T = 25 años, Cv = 30%



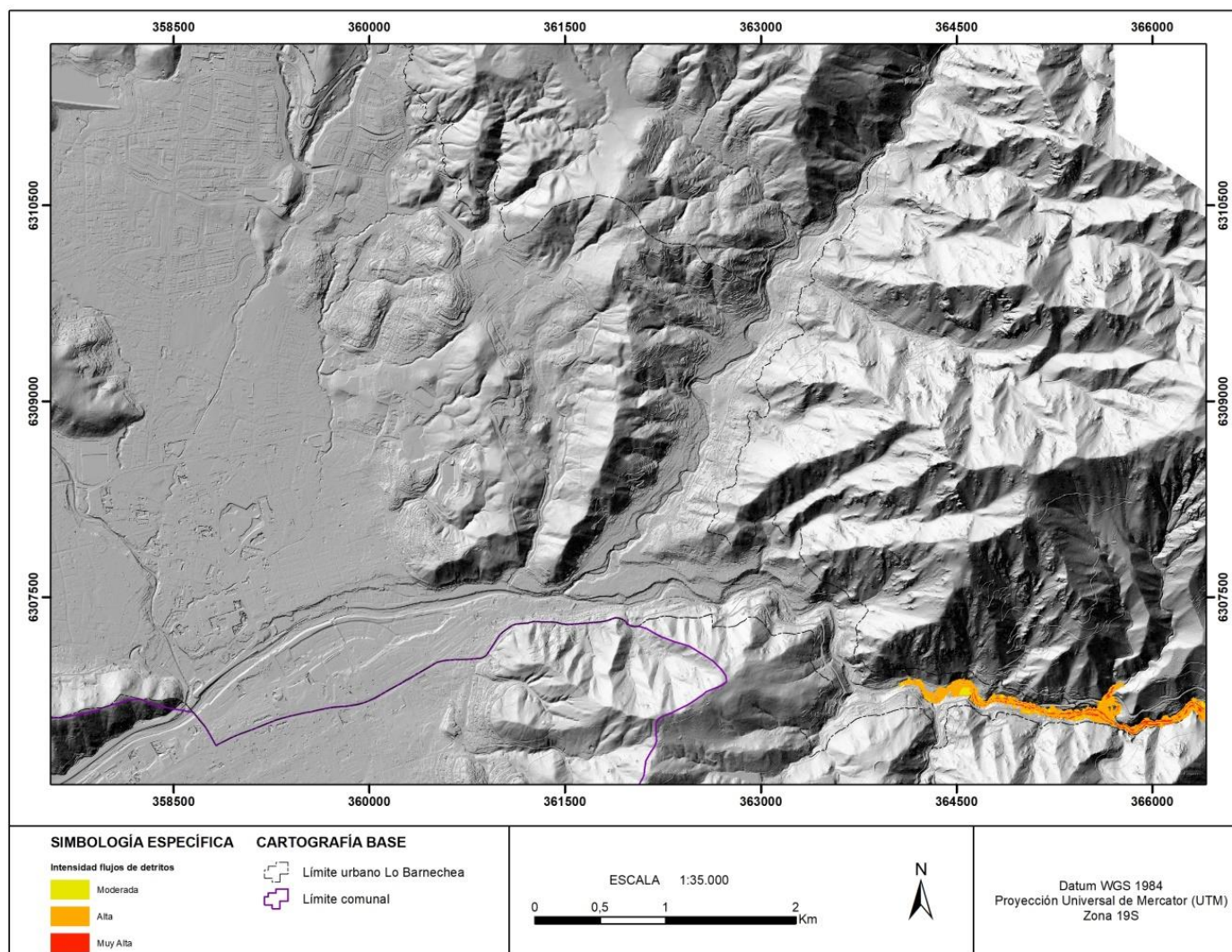
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.4—50: Mapa intensidad de flujos quebrada del Ñilhue, T = 25 años, Cv = 40%



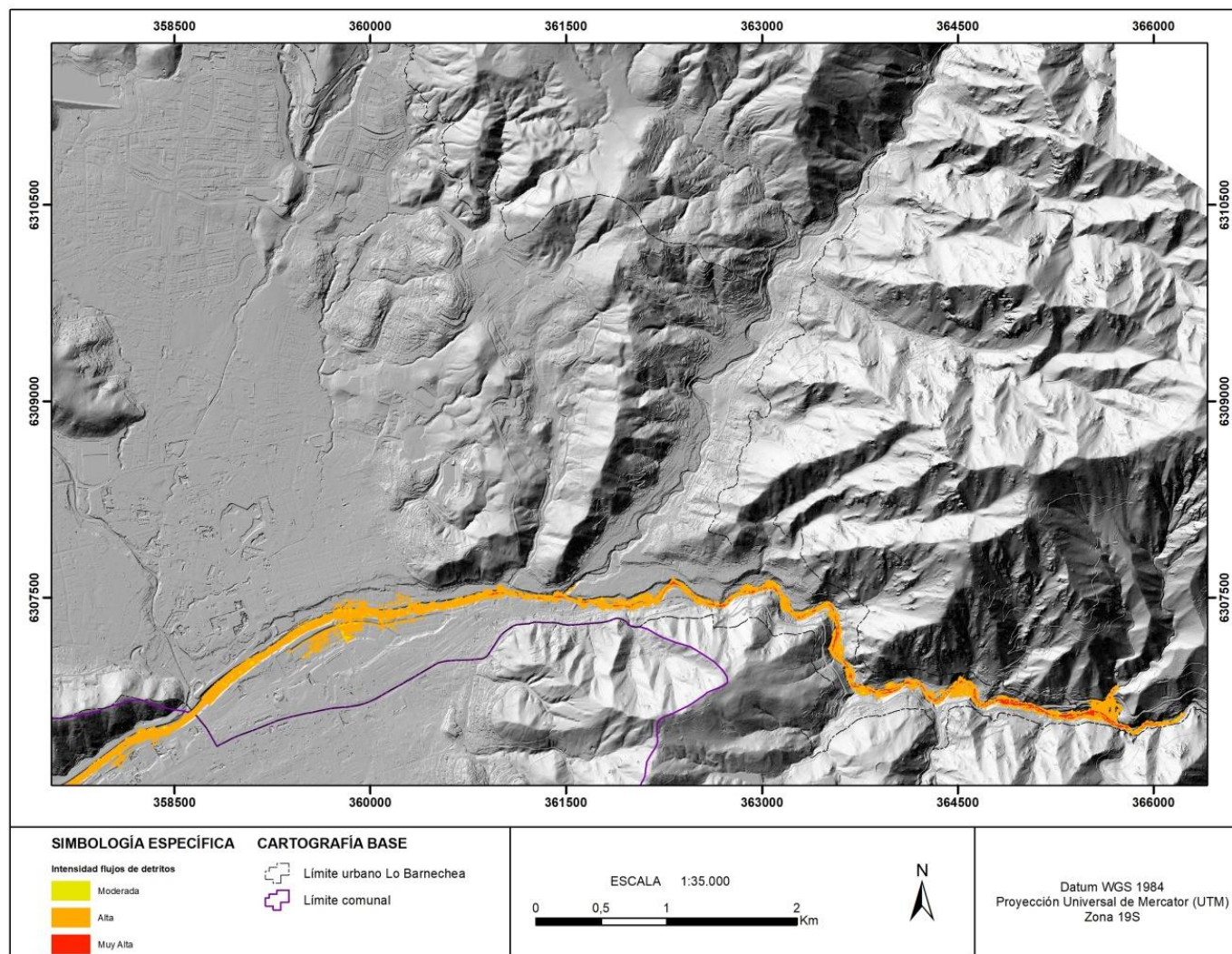
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.4—51: Mapa intensidad de flujos quebrada del Ñilhue, T = 25 años, Cv = 50%



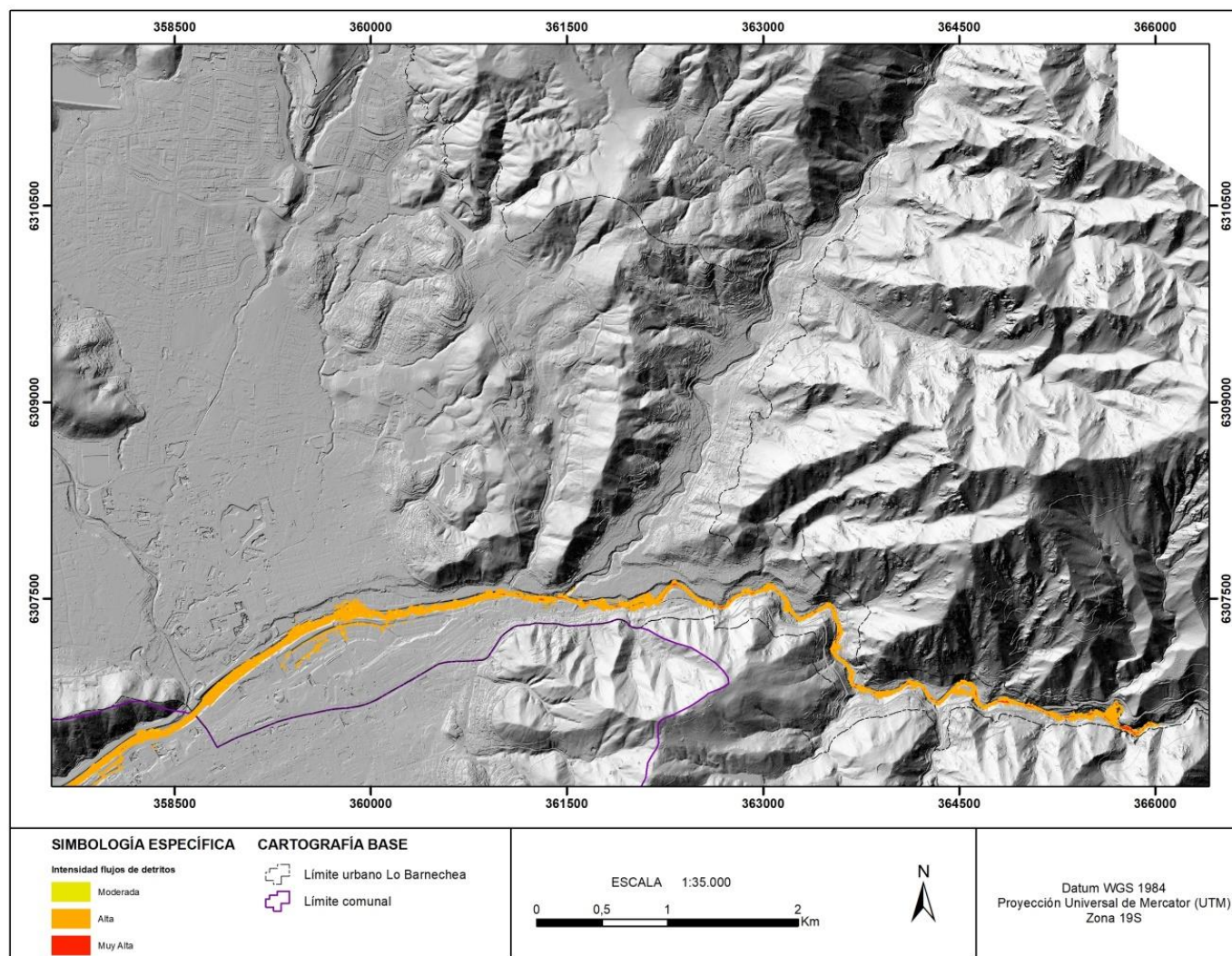
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.4—52: Mapa intensidad de flujos quebrada del Ñilhue, T = 25 años Final, concentraciones de 30% y 40%



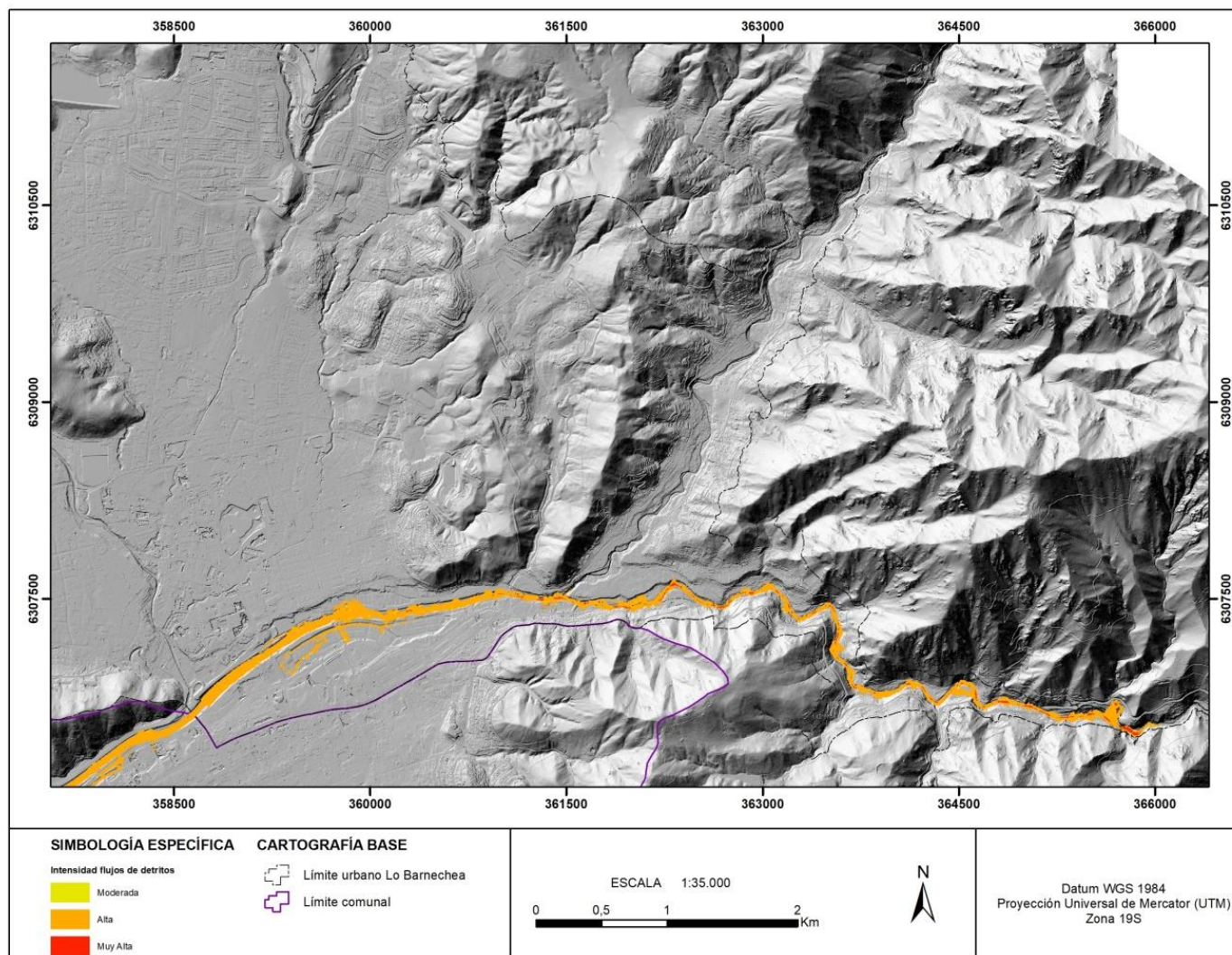
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.4—53: Mapa intensidad de flujos quebrada del Ñilhue, T = 100 años, Cv = 20%



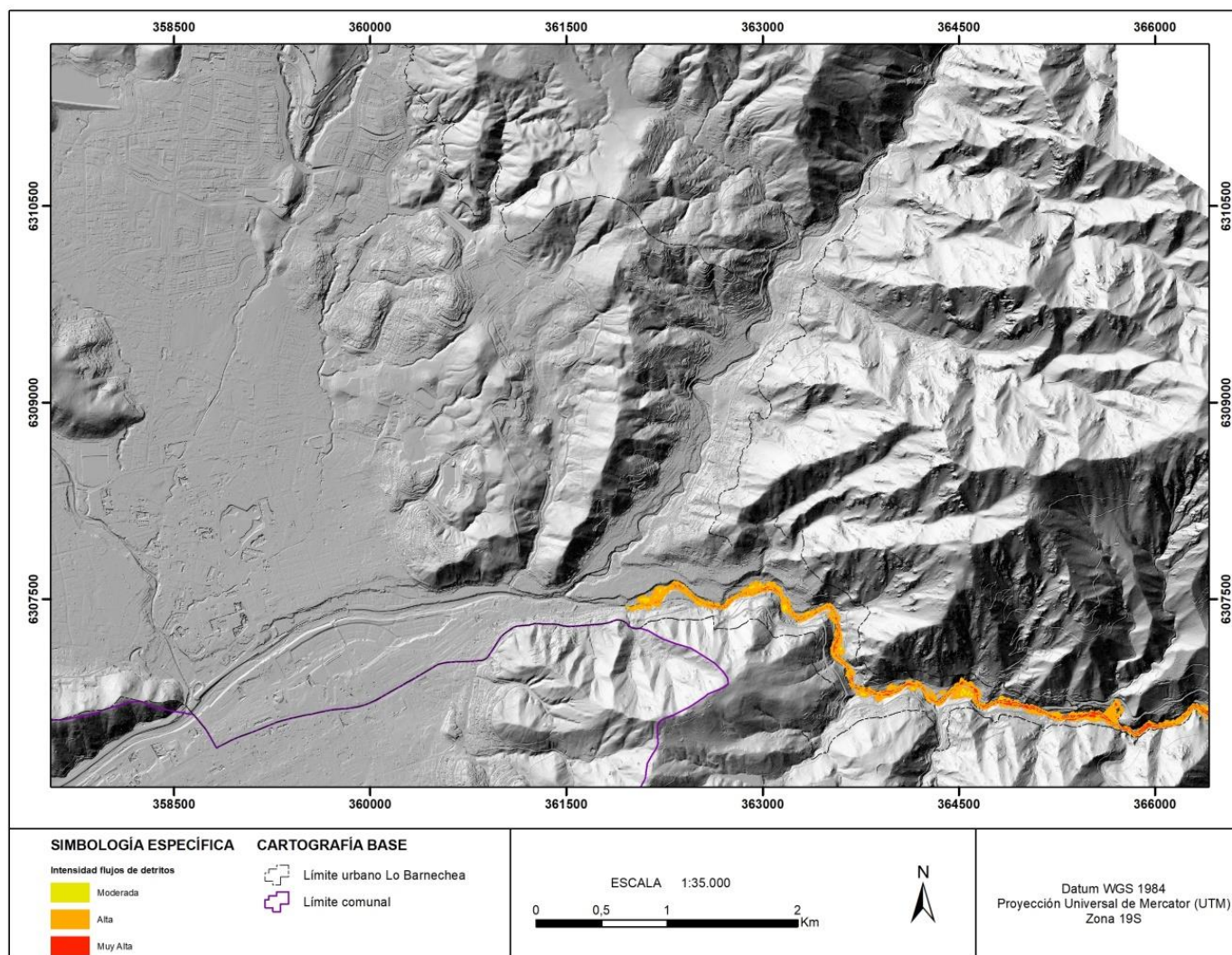
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.4—54: Mapa intensidad de flujos quebrada del Ñilhue, T = 100 años, Cv = 30%



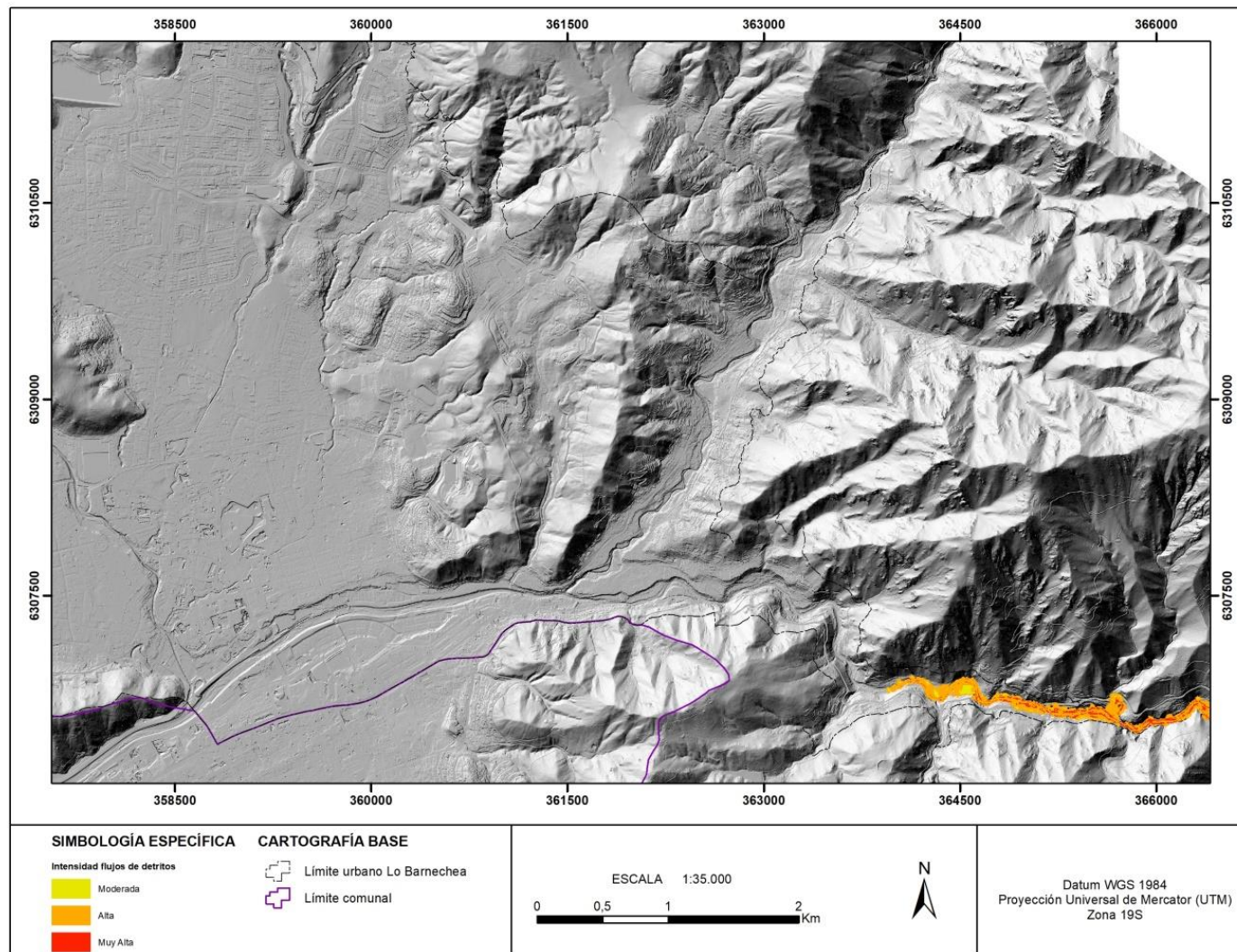
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.4—55: Mapa intensidad de flujos quebrada del Ñilhue, T = 100 años, Cv = 40%



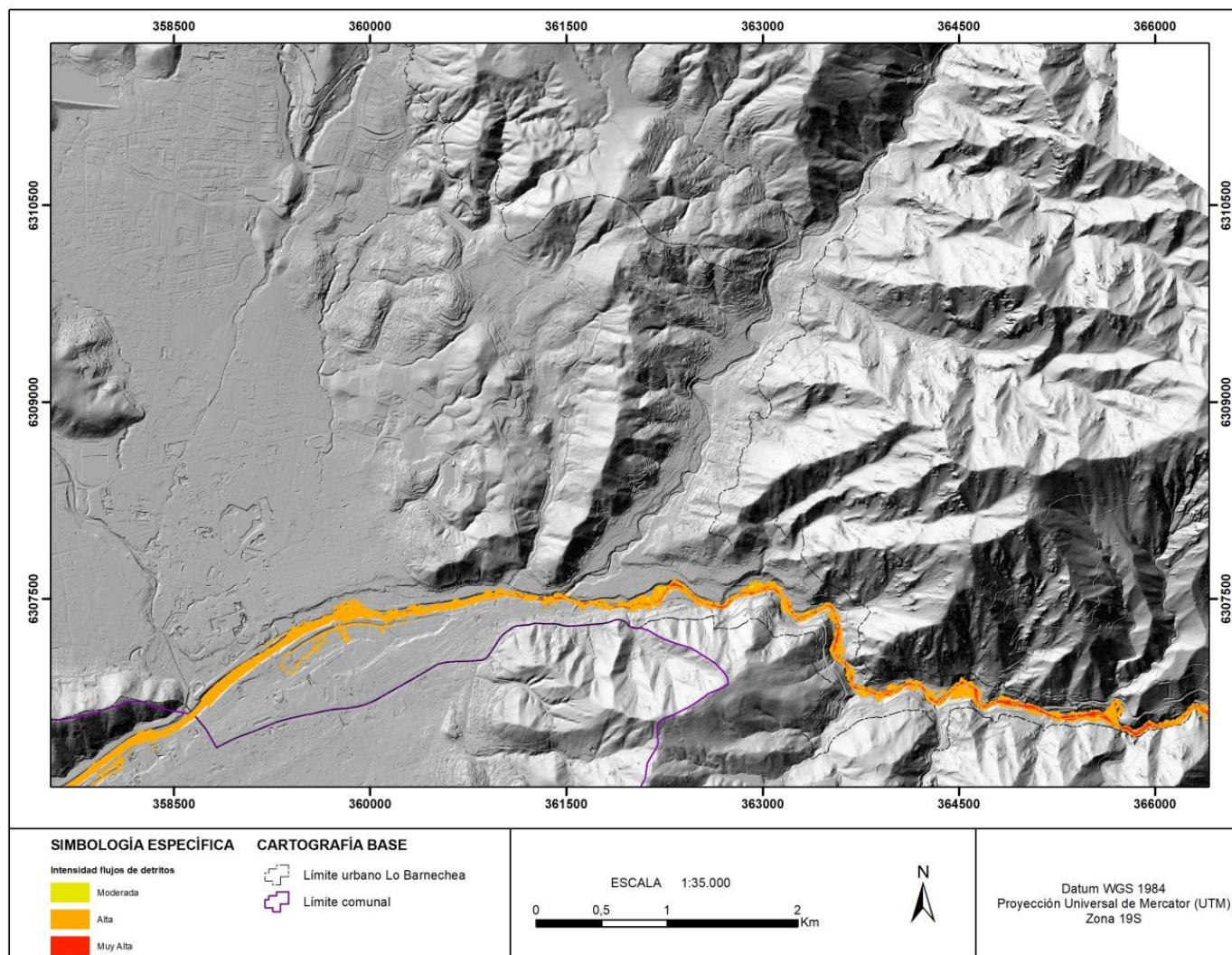
Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.4—56: Mapa intensidad de flujos quebrada del Ñilhue, T = 100 años, Cv = 50%.



Fuente: Elaboración propia (2021)

Figura N° 8.4—57: Mapa intensidad de flujos quebrada del Ñilhue, T = 100 años Final, concentraciones de 30% y 40%.



Fuente: Elaboración propia (2021)

d) Resultados del modelo (apéndice digital)

Este apéndice (formato digital) contiene la información necesaria para ejecutar el modelo y los resultados en formato digital.

La información necesaria para ejecutar el modelo es la siguiente:

- Archivos input: Documento de texto que contiene los parámetros de entrada para la simulación realizada en ambas quebradas.
- Dominios: Archivos en formato .shp con los límites del dominio de simulación para ambas quebradas.
- Release Áreas: Archivos en formato .shp con las zonas de inicio de los flujos para ambas quebradas.

Los resultados de los modelos son los siguientes:

- Archivos log output: Documentos de texto generados por el programa con los resultados obtenidos en cada punto de simulación, para ambas quebradas y en todos los escenarios.
- Archivos extraídos: Archivos en formato .shp y ráster con los resultados de los modelos (velocidades, alturas y presiones máximas) en cada punto para las simulaciones con las distintas concentraciones escogidas, en cada quebrada y para los períodos de retorno de 25 y 100 años.
- Shapes intensidad: Contiene todas las coberturas de intensidad mediante la matriz de peligro (altura versus velocidad) para todos los casos simulados, el total por período de retorno y la intensidad final para cada quebrada.