



# INFORME ETAPA 4

## PROYECTO

### ESTUDIO ACTUALIZACIÓN PLAN REGULADOR COMUNAL DE PUTAENDO

**ESTUDIOS COMPLEMENTARIOS**

**ESTUDIO DE RIESGOS**

**VERSIÓN 03**

**SEPTIEMBRE 2022**





## ESTUDIO DE RIESGOS

### TABLA DE CONTENIDOS

I.- ESTUDIO DE AMENAZAS NATURALES.....	5
I.1    Introducción .....	5
I.2    Diagnóstico y alcances del estudio.....	6
I.3    Marco físico del medio natural.....	9
I.3.1.- Geología .....	9
I.3.2.- Clima.....	10
I.4    Geomorfología .....	15
I.5    Estudio de amenazas naturales .....	17
I.5.1.- Amenaza de inundación y aluviones.....	17
A.- Inundación por crecidas de cauces .....	18
A.1    Metodología .....	22
A.2    Resultados .....	22
A.3    Recomendaciones .....	23
B.- Aluviones e inundaciones aluvionales.....	24
B.1    Metodología .....	25
B.2    Resultado.....	29
B.3    Recomendaciones .....	36
C.- Definición de polígonos de riesgo .....	36
I.5.2.- Fallas activas y megadeslizamientos .....	37
A.- Metodología .....	37
B.- Resultados .....	37
C.- Recomendaciones .....	39
I.6    Conclusiones .....	40
I.7    Referencias bibliográficas .....	41



## I.- ESTUDIO DE AMENAZAS NATURALES

### I.1 Introducción

El presente estudio, tiene por objeto determinar las amenazas de desastres al que eventualmente los habitantes de la comuna de Putaendo se encuentran expuestos, y acotar el área de restricción en su zona urbana, a partir de la presencia o manifestación de un evento que ponga en riesgo a la población comunal, ya sea por factores naturales o antrópicos.

En virtud de esto, los instrumentos de planificación territorial deben tender a la reducción de los factores subyacentes del riesgo, conforme lo establecido en la Política Nacional para la Gestión de Riesgos de Desastre, en el cual se indica que la planificación debe abordar los factores físicos, ambientales, económicos y sociales asociados a riesgos. Por tal motivo, el presente estudio se orienta a acotar la exposición al riesgo de desastres en la zona urbana y de extensión urbana de la comuna de Putaendo, conforme a lo establecido en el Artículo 2.1.17 de la OGUC, referente a las Áreas Restringidas al Desarrollo Urbano, por constituir un peligro potencial para los asentamientos humanos.

Por áreas de riesgo se entenderán aquellos territorios en los cuales, previo estudio fundado que determine las acciones que deberán ejecutarse para su utilización, se limite las condiciones para su utilización por razones de seguridad contra desastres naturales u otros semejantes, que requieran la incorporación de obras de ingeniería o de otra índole suficientes para subsanar o mitigar tales efectos. Dichas áreas de riesgo se desglosan en:

- Áreas Inundables o potencialmente Inundables.
- Áreas Propensas a Remoción en masa de aluviones o rodados.
- Áreas de Peligro por actividad volcánica
- Áreas de riesgos generados por la actividad o intervención humana.
- Zonas No edificables

Para la delimitación de las áreas descritas, primero es necesario definir **el riesgo**. Desde un punto de vista metodológico, el presente estudio entiende al riesgo como la probabilidad de ocurrencia en un lugar dado y en un momento determinado, de un fenómeno natural o de índole antrópica potencialmente peligroso para la comunidad y susceptible de causar daño a las personas y a sus bienes. Intervienen en su desarrollo 2 aspectos distintos, la amenaza y la vulnerabilidad, los que se entienden como:

- a) **La amenaza o peligro** es entendido como un fenómeno natural o antrópico, cuya dinámica puede desbordar sus umbrales más frecuentes de intensidad, magnitud y localización, pudiendo ocasionar daños a las personas y a sus bienes.
- b) **La vulnerabilidad**, se entiende principalmente en relación a población o bienes afectados dentro del área de influencia de una zona de amenaza o peligro. Se vincula por lo tanto a la capacidad de respuesta de las construcciones humanas frente a la activación de una amenaza.

Los Riesgos son, por lo tanto, una función de las Amenazas y de las Vulnerabilidades del territorio. Evaluar el riesgo es relacionar las amenazas y las vulnerabilidades con el fin de asignar una calificación (cualitativa) anticipando con ello las eventuales consecuencias sociales, económicas y ambientales de un determinado evento.

De acuerdo al D.S 9 D.O 13.04.2011 las áreas de Riesgo dentro de los planes reguladores se entenderán como aquellos territorios en los cuales se limite determinado tipo de construcciones.

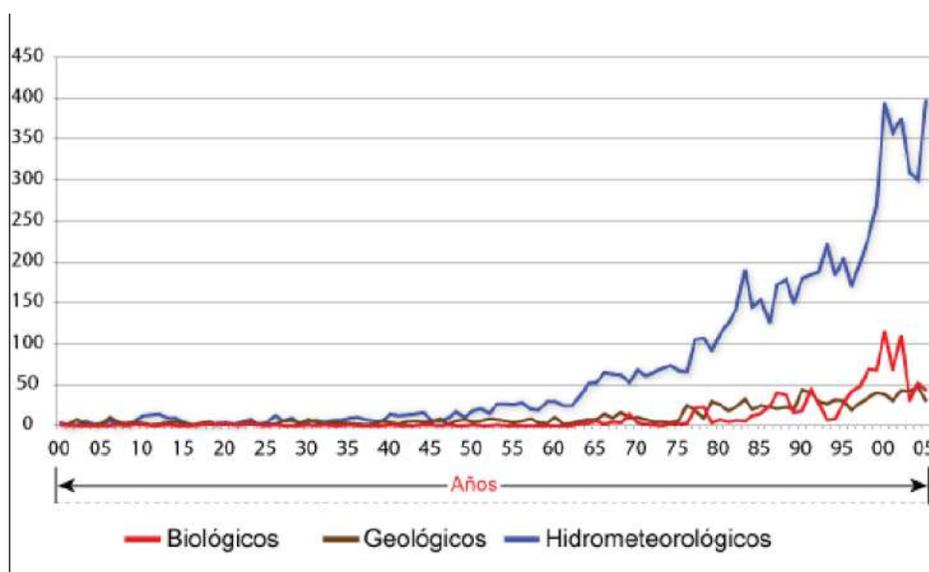
Estas áreas de riesgo se determinarán en base a cuatro características:

- a) Zonas inundables o potencialmente inundables (tsunamis, proximidad de lagos, ríos, esteros, quebradas, cursos de agua no canalizados, napas o pantanos). Aquí aplica lo correspondiente a zonas inundables por proximidad de ríos y quebradas.
- b) Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas.
- c) Zonas con peligro de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas.
- d) Zonas o terrenos con riesgos generados por la actividad o intervención humana.

Tal como se señala más adelante, a escala comunal se identifican dos tipos de amenazas por procesos naturales para la población de la zona objetivo cuales son **Inundaciones y aluviones, y fallas activas y megadeslizamientos**, También se expone la metodología aplicada y correspondiente a cada amenaza.

## **I.2 Diagnóstico y alcances del estudio**

Los Andes es una cordillera donde procesos naturales catastróficos generan gran exposición, peligro y riesgo para la población. Ello, sumado con las condiciones de vulnerabilidad de los países andinos, ha determinado cuantiosas pérdidas de vidas y dinero ante desastres naturales, condicionando muchas veces los rendimientos económicos durante años a escala regional, e incluso nacional. Según la base de datos EM-DAT [2006] (<https://www.emdat.be/>), existe un notable incremento en la cantidad de desastres naturales, en particular eventos hidrometeorológicos, posteriores a la revolución industrial (**Grafico III-1**), hecho que marca el inicio del incremento de emisiones de CO<sub>2</sub> que contribuyen al cambio climático [Molina, 2019]. Desde entonces, el crecimiento de las redes de monitoreo e información de desastres a nivel mundial ha permitido registrar y atribuir posibles causas a dicho incremento.

**Grafico III-1.** Número de desastres naturales registrados en EM-DAT entre 1995 – 2005.

Fuente: Molina, 2019.

Las zonas cordilleranas de Chile representan una escarpada y estrecha franja paralela al borde con el Océano Pacífico. Esta franja constituye la vertiente occidental de los Andes hacia el Océano Pacífico. Dada su orientación norte-sur, esta franja cruza variados climas y paisajes en aproximadamente 4.000 km entre los 18-55°S, involucrando desde el árido Desierto de Atacama y el Altiplano Andino Subtropical en el norte, hasta climas subpolares del sur de Patagonia y Magallanes. Lo anterior conlleva a la presencia de amenazas hidrometeorológicas variopintas, cuya variedad en origen y procesos condicionantes y forzantes cambian dependiendo de la zona andina. En esta franja cordillerana de Sudamérica, se distribuyen cuencas orientación E-W que entre cabecera y desembocadura cruzan diversas unidades fisiográficas de orientación norte-sur. Los valles son esencialmente rocosos y montañosos, asociados a ríos relativamente cortos y empinados si los comparados a otros del resto de Sudamérica.

Aunque esporádicos, y no necesariamente de manera estacional, eventos de crecidas que involucran inundaciones y aluviones ligados a tormentas de gran magnitud se suceden en las diversas condiciones climáticas de Chile. En la zona central de Chile, donde se enmarca el estudio, se ha registrado un periodo de sequía durante la última década, con escasa precipitación y que ha implicado la disminución de las tasa de precipitaciones anuales, sin embargo, un estudio indica que para la zona semiárida de Chile, tormentas de gran magnitud esporádicas y que generan crecidas torrenciales, inundaciones repentinas y aluviones, se incrementan junto con la condición climática que determina la sequía de los últimos años (Ortega et al., 2019; Molina, 2019). Los aluviones representan el tipo de remociones en masa que ha causado mayores desastres en Chile.

En cuanto a los procesos endógenos, el peligro volcánico, es quizás, la amenaza más evidente que se puede identificar al revisar el paisaje de Chile. Chile representa una de las zonas vulcanogénicas más activas del mundo, con la presencia de grandes edificios volcánicos a lo largo de su territorio. Sin embargo, la actividad volcánica está distribuida según la madures del orógeno andino y los procesos geodinámicos en la interplaca de

subducción de la Placa Pacífica-Antártica por debajo de la Placa Sudamericana. Así es como zonas con lagunas de actividad volcánica se han identificado, dado que no tienen registro de actividad volcánica histórica, el paisaje no muestra edificios volcánicos recientes y las dataciones indican que ellos no han estado presentes a escala de miles de años. En particular la franja andina que se encuentra entre la Comuna de Alto el Carmen por el norte, hasta la Comuna de Los Andes por el sur, se ha definido como una zona de laguna, debido a la conjunción de todas estas características, abarcando a la zona donde se enmarca este estudio.

Trabajos recientes han indicado que sistemas de fallas podrían haber estado activas durante los últimos miles de años en la zona de estudio, similares a aquellas que se han reportado en el piedemonte a la latitud de Santiago con el Sistema de Falla Pucuro y San Ramón (Estay, 2019). Sin embargo, se debe considerar que hasta la fecha los periodos de retorno que se han podido calcular son del orden de varios cientos de años. Si bien, parece una escala de tiempo bastante larga, se debe considerar que la intensidad de un sismo asociado a la ruptura de uno de estos segmentos de fallas puede implicar intensidades de hasta 7 grados Richter, lo que sumado a la poca profundidad de los hipocentros de este tipo de sismos intracorticales, pueden implicar catastróficos resultados para la población asentada en torno a la traza de una de estas fallas. Por otra parte, los peligros sismogénicos asociados a sismos de subducción, y que se suceden a tiempos de retorno de solo siglos, deben ser tratados a escala regional y no comunal como es el caso de un Plan Regulador Comunal.

Depósitos de megadeslizamientos se identifican a escala comunal en el diagnóstico. Ante las características morfométricas del relieve estos procesos se han sucedido en la historia geológica reciente en varios valles de la zona central de Chile. Un reciente trabajo compila los registros de estos deslizamientos en la zona de estudio, así como las cicatrices dejadas por el desprendimiento en las laderas. Una fuente sismogénica ha sido planteada para estos procesos, sustentada en la conjunción de estas morfologías con la traza de fallas. Sin embargo esto también se puede generar por procesos erosivos en masa que socaban el sustento de las laderas generando inestabilidad en zonas con litologías menos competentes ante la erosión. En este caso, sismos de subducción de fuente lejana, e incluso la falla de superficies de despegue de suelos y rocas producto de procesos exógenos pueden forzar la ocurrencia de deslizamientos.

Considerando que la comuna está localizada en una zona de laguna volcánica, es decir sin activada reciente de los edificios volcánicos a escala de miles de años, el diagnóstico a escala comunal identifico dos tipos de amenazas por procesos naturales para la población de la zona objetivo. **1.** Inundaciones repentinas de gran magnitud que se pueden suceder a escala interanual, e incluso ocasionalmente estacional, incluyendo entre ellas a los aluviones, usualmente incluidas en estudios de este tipo como remociones en masa; **2.** Actividad de fallas sismotectónicas que se desencadenan a escala de miles de años, es decir cuyos rasgos morfológicos permiten reconocer actividad neotectónica, como por ejemplo la presencia de megadeslizamientos, que se distribuyen en laderas empinadas e inestables desde el punto de vista geológico y que pueden ser gatilladas por sismos. Si bien, evidentemente un sismo de subducción es un proceso natural que puede causar gran afcción a la población, son solo estas tres mencionadas las que dada su ubicación espacial y temporal tienen alcance y relevancia para un estudio a escala comunal como el ofrecido según las bases y contratos relacionados al desarrollo del Plan Regulador Comunal.

En base a estas directrices se realizó para el Plan Regulador Comunal de Putaendo un estudio de amenazas de origen hidro-meteorológico, con énfasis en Amenaza de inundaciones y aluviones que se suceden a escala de décadas, una actualización del catastro de Fallas Activas geológicas cuyas características indiquen una potencial actividad sismogénica y amenaza para la población a escala de varios cientos de años, y un inventario de depósitos de Remoción en Masa, que incluye la localización de las zonas de posible amenaza por desprendimiento y megadeslizamientos gravitacionales. Con estos antecedentes se confeccionaron mapas de amenazas naturales, que junto con la exposición y vulnerabilidad determinan el riesgo. Con el objetivo de exponer estos resultados, las amenazas fueron clasificadas en: **1. Inundaciones y aluviones, 2. fallas activas y megadeslizamientos**. Para fines de este trabajo multidisciplinario se expone la metodología ocupada en la sección correspondiente a cada amenaza.

### **I.3 Marco físico del medio natural**

Los procesos naturales suelen dividirse en dos grandes grupos. Aquellos que se producen por fuentes exógenas, es decir procesos que se desarrollan desde la interacción de la superficie de la corteza con agentes externos, tanto atmosféricos como cósmicos, y los de fuentes endógenas, que incluyen procesos sismotectónicos internos como volcanismo y rupturas litosféricas generadoras de sismos (ej. fallas). Es por ello, que los dos grandes factores condicionantes y forzantes de amenazas están ligados a la geología y el clima de la zona, que constituyen un marco físico del medio natural. Si bien, el contexto geológico y climático de la zona ya fue expuesto en otros capítulos de este estudio, aquí se hace un pequeño resumen de los aspectos que son más relevantes para el estudio de amenazas naturales.

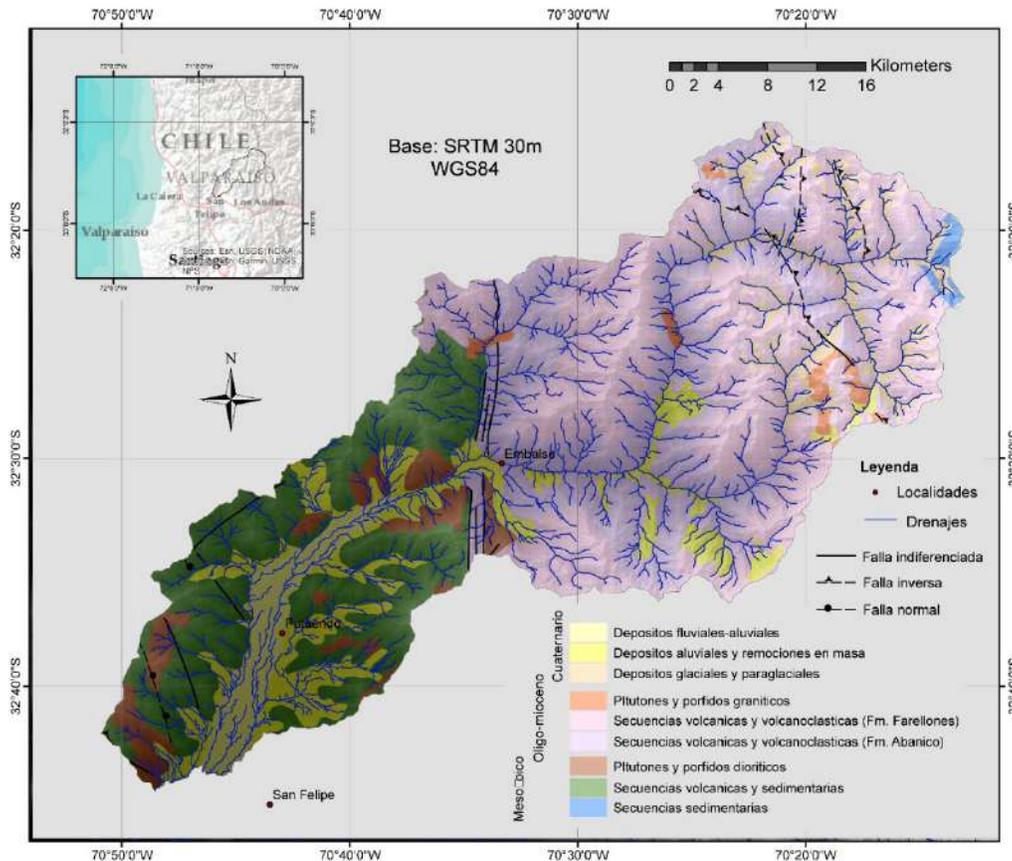
#### **I.3.1.- Geología**

La geología de la Cuenca del Río Putaendo está constituida por diversas unidades rocosas que incluyen distintos tipos litológicos y edades (**Cartografía III-1**). En su segmento occidental las rocas dominantes están agrupadas en secuencias estratigráficas volcánicas y sedimentarias del Mesozoico. Las rocas son principalmente las secuencias volcánicas andesíticas y las sedimentarias de ambiente continental. Estas rocas estratificadas representan la roca caja de las unidades plutónicas del mesozoico, constituidas por rocas de composición principalmente dioríticas. Hacia el Este, y separada por un importante sistema de falla denominado Sistema de Fallas Pocuro (SFP; descrito más adelante en extenso), se distribuyen secuencias volcánicas y volcano-clásticas cenozoicas que se agrupan en la Fm. Abanico del Oligoceno y Fm. Farellones del Mioceno. Las rocas de estas formaciones son de composición predominantemente andesítica. Es en estas rocas donde se emplazan plutones miocenos con rocas de composiciones principalmente graníticas. El área urbana de la Comuna de Putaendo que es el objeto de este estudio, se encuentra emplazada sobre las primeras, es decir en las secuencias estratigráficas volcánicas y sedimentarias del Mesozoico.

A lo largo y ancho de los valles fluviales, sedimentos no consolidados se distribuyen en canales y laderas. Cabe destacar que los mapas consultados del Sernageomin son a una escala que no permite obtener coberturas de alta resolución, por lo que estos elementos suelen no estar diferenciados. Estos elementos hidrogeomórficos son determinantes para un análisis del riesgo natural ya que determinan la disponibilidad de sedimentos para crecidas torrenciales y entregan información del alcance y magnitud de dichas crecidas en

el pasado, así como también de las remociones en masa. Debido a aquello, para este estudio se confecciono un mapa de geomorfológico de detalle para la zona. La presentación del mapa y la descripción de las unidades geomorfológicas se desarrollan en la siguiente sección.

Cartografía III-1 Geología de la cuenca del Río Putaendo.

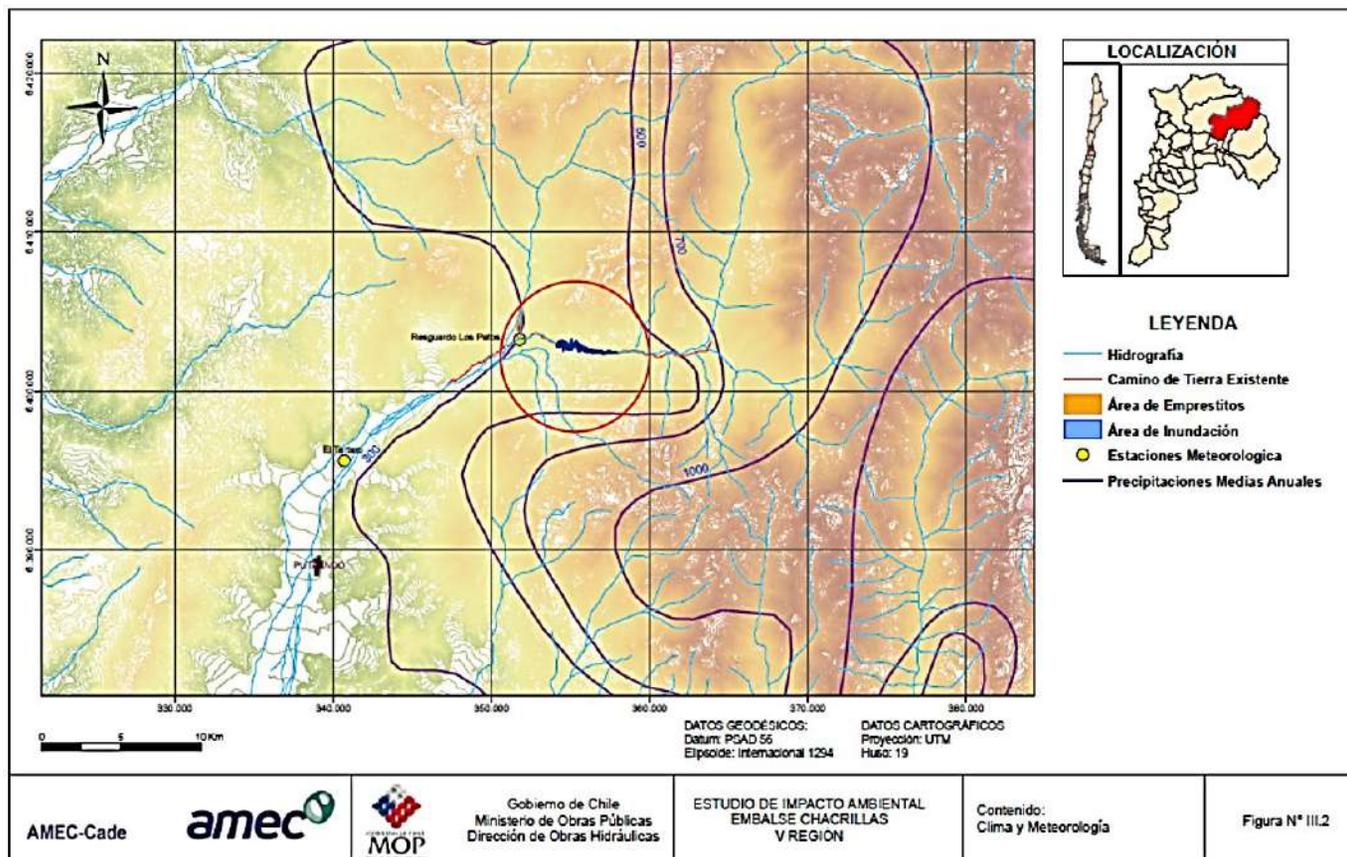


Fuente: Modificada del mapa geológico escala 1:1.000.000 del Servicio Nacional de geología y Minería (Sernageomin, 2003)

### I.3.2.- Clima

El área de estudio se encuentra en la zona central de Chile a los pies de la Cordillera de los Andes. El clima de la zona está fuertemente influenciado por el relieve cordillerano. Así por ejemplo, se observa el fuerte control topográfico de las precipitaciones, siendo más abundantes las precipitaciones en cordillera (>300 mm/año) que en los valles (<300 mm/año) como se observa con las isoyetas de la **Cartografía III-2**. En la cartografía se incluye la localización de dos estaciones meteorológicas que presentan una ventana temporal de varias décadas de la Dirección General de Aguas (DGA): Resguardo Los Patos y El Tártaro. Con el objetivo de evaluar el impacto del cambio climático en la zona de estudio se realizó un análisis de los datos. Se dispone de la estadística pluviométrica que se extiende entre 2002 y 2017 en Resguardo de Los Patos, y desde 1990 a 2017 en El Tártaro, lo que está representado en tablas (**III-1 y III-2**) y gráficos (**III-2 y III-3**).

**Cartografía III-2.** Isoyetas de precipitación media anual para la zona cordillerana y localización de las estaciones Resguardo Los Patos y El Tártaro



Fuente: Ministerio de Obras Publica

Resguardo Los Patos. Se aprecian las tendencias típicas del cambio climático, con una clara tendencia decreciente de 12,5 mm/año en las precipitaciones anuales y gran disparidad, y acompañada de una tendencia más moderada en las intensidades máximas en 24 horas, del orden de 1,2 mm. Como referencia, la información histórica de Los Andes (DGA, 2017) señala 261 mm/año en precipitaciones frente a 226 mm/año entre 2002 y 2017; la intensidad máxima diaria histórica de Los Andes, con 83,3 mm/24 horas ([Grafico III-4](#)), es comparable con el valor extremo puntual de 82,8 mm/24 horas, pero es prácticamente el doble del promedio de estos 16 años, con solo 44 mm/24 horas.

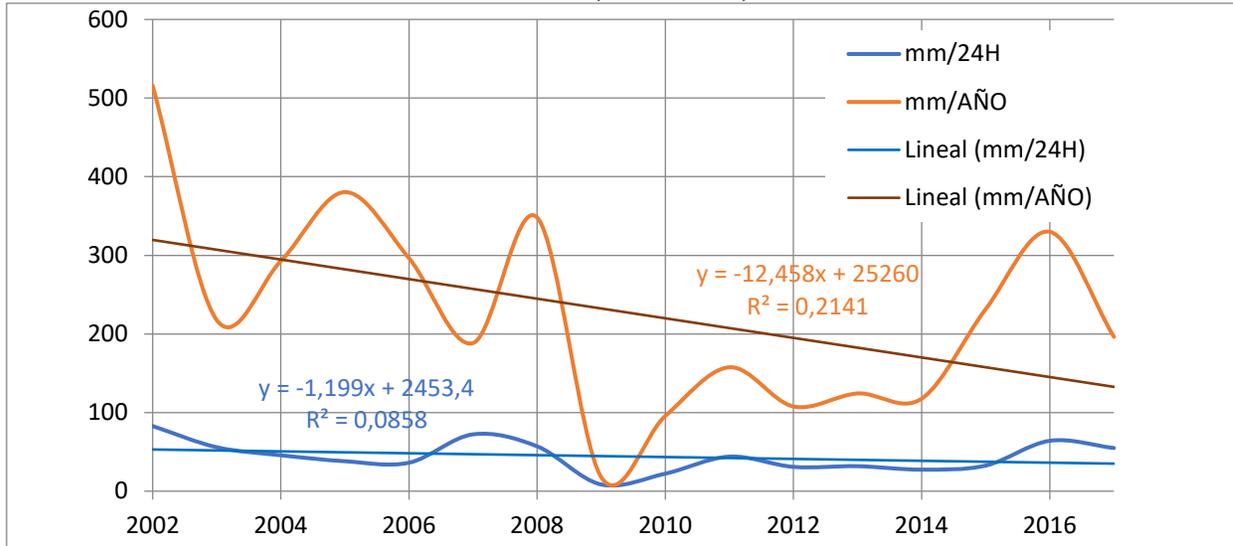
El Tártaro. Esta estación pluviométrica presenta una mayor extensión de observaciones, pero refleja igualmente los efectos del cambio climático. Las precipitaciones anuales a lo largo de 28 años muestran una disminución anual de 1,9 mm/año, pero la tendencia de las precipitaciones máximas en 24 horas apunta a un crecimiento de 0,5 mm/año; sin embargo, el análisis desde 2002 a 2017 confirma lo verificado en Resguardo Los Patos, con una disminución de 10,4 mm/año en precipitaciones anuales y 0,5 mm/24 horas en intensidades máximas diarias.

**Tabla III-1:** Precipitación anual acumulada y máxima diaria para la estación Resguardo de los Patos.

AÑO	mm/24H	mm/AÑO
2002	82,8	515,9
2003	55,9	217,6
2004	45,7	292,7
2005	38,1	380,4
2006	36,2	296,3
2007	72,3	188,4
2008	57	348
2009	8,5	17,8
2010	22,3	95,7
2011	44	157,6
2012	30,9	107,7
2013	31,8	124,3
2014	27,4	117,7
2015	32,6	231,6
2016	64,1	329,9
2017	54,9	196,3
Promedio	44,03	226
Máximo	82,8	515,9
Mínimo	8,5	17,8

Fuente: Dirección General de Aguas

**Grafico III-2:** Precipitación anual acumulada y máxima diaria para la estación Resguardo de los Patos (2002-2017).



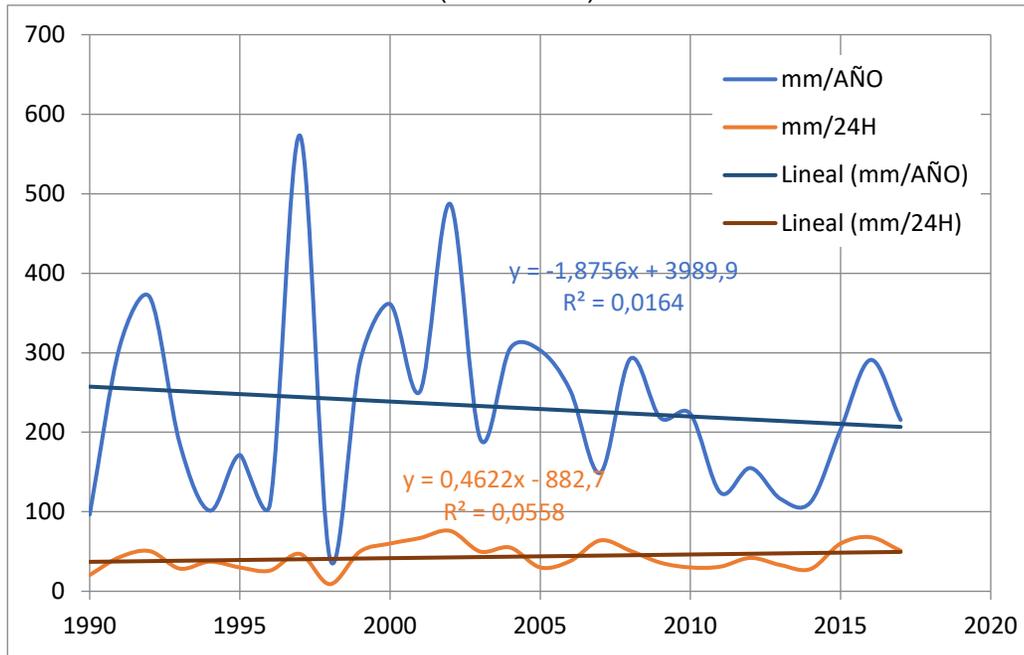
Fuente: Dirección General de Aguas

**Tabla III-3:** Precipitación anual acumulada y máxima diaria para la estación El Tártaro.

AÑO	MM/24H	MM/AÑO	AÑO	MM/24H	MM/AÑO
1990	20,5	96,5	2006	38	252,5
1991	43	308	2007	64	149
1992	50,5	369,9	2008	51	292,5
1993	28,5	185,5	2009	36	218
1994	37,3	101,4	2010	30	223
1995	30	171,5	2011	31	124
1996	26	109,5	2012	42	155
1997	47	573,2	2013	33	116,2
1998	9	41	2014	28	112
1999	50	288,5	2015	60	203,5
2000	60	361,2	2016	68	291
2001	67	251,5	2017	51	215,5
2002	76	487,2			
2003	50	192	Promedio	43,3	232
2004	55	305,5	Máximo	76	573,2
2005	30	303	Mínimo	9	41

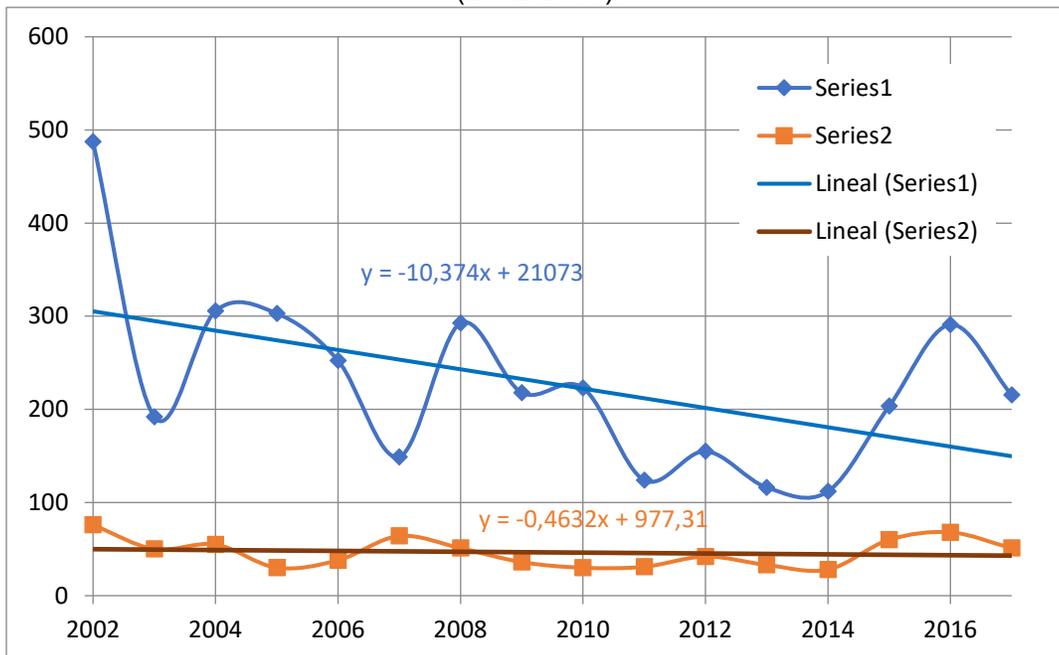
Fuente: Dirección General de Aguas

**Grafico III-3:** Precipitación anual acumulada y máxima diaria para la estación El Tártaro (1990-2017).



Fuente: Dirección General de Aguas

**Grafico III-4:** Precipitación anual acumulada y máxima diaria para la estación Los Andes (2002-2017).



Fuente: Dirección General de Aguas

#### I.4 Geomorfología

La geomorfología dinámica es aquella sub-rama de la geomorfología que estudia los procesos geomórficos activos a una escala relativamente reciente, en la que intervienen tanto procesos exógenos como endógenos. Esta rama de la geomorfología resulta crítica al momento de definir y evaluar las amenazas naturales ya que usualmente se centra en los procesos geomórficos recientes y las geoformas resultantes, y que eventualmente afectan a la sociedad y medio natural circundante. Dado lo anterior, es que se realizó una cartografía geomorfológica de detalle de la cuenca del Río Putaendo, en donde se enmarca la zona de estudio. Las unidades geomorfológicas que se distinguen en la zona de estudio representan en general a un sistema fluvial de cordillera, característico para un contexto de geodinámica activa, como es el caso del orógeno andino en estas latitudes (**Cartografía Anexa III-1**). A continuación, se describen las principales unidades geomorfológicas identificadas en la zona occidental de la cuenca del Río Putaendo.

**Canal fluvial activo (Afc):** Corresponde al lecho en el que se localiza y fluye actualmente el curso de los ríos, principales el río Putaendo, río Rocín y algunos esteros (estero Seco y estero Chalaco). En este canal es común encontrar depósitos con morfología de barra dejados por inundaciones, las que son observadas mayormente en el río Putaendo y, en menor medida, en el estero Seco.

**Barras fluviales (Qyw):** Se reconocen como depósitos no consolidados semi-permanentes en forma de islas o barras formadas por la acumulación de arena o grava, estas presentan una forma alargada y se disponen paralelamente a la ribera de un río. Este material tiende a formarse bajo condiciones de alta energía, encontrándose sumergidas en periodos de alto caudal y parcialmente emergidas en periodos de bajo caudal. En el área, estas barras presentan superficies irregulares en las que se puede distinguir el paso de antiguas inundaciones y parches discontinuos de suelo (Estay, 2019). En general, estas morfologías fluviales se encuentran a lo largo del río Putaendo, tanto en la parte central como lateral de los canales, sin embargo, también se evidencian barras laterales que cubren una menor extensión en el estero Seco y al sur del estero Chalaco.

**Coluvio (Qc):** Son depósitos de carácter local acumulados en la base de ladera y que han sufrido un escaso transporte. Estos se encuentran asociados a zonas de cambios bruscos de pendiente como quebradas, principalmente relacionados a movimientos por erosión y fuerza de gravedad, depositando el material ladera abajo en lugares donde alcanza la estabilidad. En general, estos depósitos son de sedimentos mal seleccionados (desde arcillas a grava) y una moderada a alta porosidad. Los depósitos coluviales que se encuentran mapeados en el área no presentan grandes dimensiones, a excepción de un depósito considerable que se localiza al noreste de la comuna de Putaendo. Por otra parte, estos presentan morfologías cónicas y/o radiales y, se distribuyen principalmente a los pies de las laderas y en algunos casos proveen material a abanicos aluviales que se encuentran interconectados al río Putaendo. Cabe destacar que hacia el sector sur de la cuenca, gran parte de estos depósitos se encuentran mayormente asociados a las cuencas tributarias del río Putaendo, mientras que, hacia el norte, se encuentran mayormente al NNW del estero Chalaco, en la ladera occidental de la cuenca.

**Abanico aluvial (Qyf, Qf, Qof):** Corresponden a depósitos de sedimentos en forma de cono o abanico que son resultantes de procesos de erosión y depositación de los sedimentos por acción de cursos de agua, los que se localizan en las confluencias de valles de ríos, esteros y quebradas. En general, estos depósitos presentan diferente tamaño de granos, siendo

principalmente arcillas en zonas más distales y bolones en zonas proximales del abanico. En general, estos depósitos son poco consolidados, que incluyen arcillas y arenas con buena estratificación, junto con gravas y bolones mal estratificados, desde zonas distales a proximales, respectivamente (Rivano, 1996). Los abanicos aluviales fueron clasificados por temporalidad de acuerdo a su relación de corte, identificándose desde los jóvenes hasta los antiguos (Qyf, Qf, Qof), distinguiendo en algunos casos abanicos antiguos que cortan abanicos más jóvenes, lo cual se observa al oeste del estero Seco y sureste de la comuna Putaendo. En general, los abanicos identificados en la ladera occidental de la cuenca del río Putaendo presentan morfologías radiales y se encuentran desembocando en zonas aledañas al estero Seco, mientras que los abanicos de la zona oriental en algunos casos difieren de esta morfología radial, sin embargo, presentan un mayor alargamiento.

*Terrazas y superficies pedimentadas (Tr)*: Las terrazas corresponden superficies planas e inactivas, que se encuentran en niveles superiores a la del curso actual del río, estas son producidas tanto por la depositación de sedimentos como también por erosión, lo cual se encuentra controlado por el equilibrio entre la erosión y el alzamiento tectónico. Por otro lado, las superficies pedimentadas se definen como superficies erosionadas y levemente inclinadas que se encuentran sobre rocas del basamento o antiguos depósitos no consolidados (Dohrenwend y Parsons, 2009). Estas superficies corresponden a geoformas antiguas a escala de decenas a centenas de miles de años, asociados principalmente a una baja o nula actividad tectónica. A escala de cuenca, se identificaron al menos dos niveles de terrazas y superficies pedimentadas, siendo las de menor altitud (800-950 m s.n.m) las que se encuentran restringidas a la ladera oriental de la zona de estudio, en zonas proximales al río Putaendo. Por otra parte, las superficies pedimentadas de mayor altitud (1100-1400 m s.n.m) se encuentran en ambas laderas de la zona de estudio, tanto al este como al norte de la comuna de Putaendo, siendo en este último donde se destaca la presencia de una superficie levemente inclinada de mayor extensión, la cual se encuentra sobre rocas graníticas.

*Drenaje colgado*: Corresponde al drenaje que se encuentra aislado y desconectado de la red de drenaje principal, resultante de una ruptura o cambio abrupto en la pendiente (knickpoint). Al noroeste del estero Las Minillas se observa la mayor distribución de estas geoformas, ubicadas principalmente en las cuencas tributarias del río Putaendo.

*Megadeslizamientos (Qls, Qyls, Qols, Qvols)*: Son depósitos de grandes remociones en masa que incluyen grandes volúmenes de depósitos de avalanchas y deslizamientos de roca, los cuales son resultantes del colapso de una ladera. En general, estos depósitos se encuentran moderadamente consolidados a no consolidados, no presentan estratificación y son de gran diversidad litológica (polimíctico). Estay (2019) de acuerdo a su trabajo realizado en la zona subdivide estos depósitos cronológicamente en depósitos de Megadeslizamientos actuales (Qls), jóvenes (Qyls), antiguos (Qols) y muy antiguos (Qvols). En cuanto a su distribución, gran parte de los megadeslizamientos se encuentra a lo largo del valle del río Rocín, caracterizado por presentar un alto relieve y pendientes que, en la ladera norte, se expresan como acantilados subverticales de cientos de metros de altitud. Uno de los megadeslizamientos antiguos importantes en la zona corresponde al depósito de avalancha de roca Los Maquis, que se encuentra a lo largo del estero Los Maquis y contiguo al Embalse Chacrillas, extendiéndose por aproximadamente 11 km, dejando al descubierto cicatrices de deslizamiento de longitud considerable. Por otro lado, al este de la comuna de Putaendo también es posible observar estos megadeslizamientos, sin embargo, corresponden a eventos localizados y que cubren una menor área.

**Cicatriz de deslizamiento:** Consisten en escarpes o desniveles arqueados que muestran un cambio abrupto de la pendiente, generado por un deslizamiento de ladera. Estas morfologías se encuentran presentes en la cabecera de la mayoría de los depósitos de megadeslizamientos, destacándose los extensos escarpes del antiguo depósito de avalancha de roca Los Maquis, en la cabecera de la ladera.

El área de estudio es un sector con fuerte intervención antrópica y por ello se identificaron un conjunto de unidades de origen antrópico (**Cartografía Anexa III-1**). Las unidades que se describen a continuación representan las más significativas en términos geomorfológicos.

**Llanura aluvial antropizada (app):** Corresponden a superficies adyacentes al canal fluvial activo y que eventualmente pueden estar sujetas a inundaciones. En general, gran parte de la superficie corresponden a depósitos aluviales que se encuentran ocupados y/o perturbados por actividad antrópica como agricultura, caminos, canales y localidades. Esta unidad cubre un área considerable del valle principal de la cuenca del río Putaendo, encontrándose en sectores contiguos a lo largo del río Putaendo, estero Seco, estero Las Minillas y, en menor medida, en el valle del río Rocín.

**Relleno artificial (af):** Corresponden a superficies que se encuentran cubiertas por materiales no consolidados a moderadamente consolidados, resultantes de actividad antrópica. En general, las zonas consideradas como relleno artificial en el área de estudio corresponden a rellenos sanitarios, desmontes, presas y relaves. Estos rellenos se encuentran en el sector del Embalse Chacrillas y al norte de la localidad de Los Patos.

**Pasivos ambientales de origen minero:** Corresponde a las faenas mineras consideradas como abandonadas o paralizadas, tales como botaderos, desmontes, relaves e instalaciones mineras. En general, al oeste y noreste de la comuna de Putaendo se observa la mayor concentración de esta unidad.

**Derrame antrópico (al):** Corresponden a fluidos liberados por actividad antrópica, principalmente asociado a relaves mineros. En general, estos fluidos suelen contener metales pesados y drenajes ácidos que eventualmente podrían afectar el entorno. Esta unidad se encuentra localizada al oeste de la localidad de El Asiento.

## **I.5 Estudio de amenazas naturales**

### **I.5.1.- Amenaza de inundación y aluviones**

Según el catastro de desastre naturales EM-DAT (*The International Disaster Data Base*) del Centro de Investigación en Epidemiología y Desastres CRED (<https://www.emdat.be/>), las pérdidas económicas asociadas a eventos de inundaciones y aluviones alcanzan los 34,8 billones de US\$ anuales a nivel mundial, lo que representa más del 20% del total asociado a desastres naturales (**Tabla III-4**). A esto se suma un promedio anual de casi 70 millones de afectados (37,2%) y 6.700 muertos (7,8%). Según un informe del IPCC [IPCC, 2013], la frecuencia y magnitud de los eventos hidrológicos extremos puede cambiar en condiciones climáticas futuras. Además, las proyecciones asociados al clima promedio (ej. reducción de la precipitación anual) no son necesariamente extrapolables a los eventos extremos (ej. aumento en la frecuencia y magnitud de tormentas).

Tabla III-4. Catastro de desastre naturales.

	Nº de eventos	Nº de muertos	Nº de afectados (millones)	Pérdidas económicas (millones de US\$)
Sequías	16.9	1821.8	68.2	8.4
Terremotos	25.5	32475.8	7.7	41.8
Temperaturas extremas	20.5	6765.1	8.2	2.7
Inundaciones	150.6	4842.6	69.6	34.8
Deslizamientos	18.5	965.0	0.3	0.4
Remociones en masa (seca)	1.0	23.4	0.1	0.1
Tormentas	95.0	15395.8	32.6	69.7
Actividad Volcánica	4.3	83.5	0.4	0.2
Incendios	9.1	92.8	0.1	5.5

Fuente: CRED (2018).

En Chile, un estudio reciente realizado por el Servicio Nacional de Geología y Minería [SERNAGEOMIN, 2017] estimó que las pérdidas económicas asociadas a los cinco eventos aluvionales más grandes desde 1980 (Santiago 1980, 1987 y 1993; Antofagasta 1991 y Atacama 2015) suman un costo de 1.600 millones de US\$ (en promedio 46 millones de US\$ al año) con cerca de 1.000 muertos o desaparecidos. Como punto de comparación, se tiene el caso de Suiza, país altamente expuesto a este tipo de fenómenos y donde existe una planificación y mitigación de gran nivel ante este tipo de fenómenos, con pérdidas económicas por 380 millones de US\$ (10 millones de US\$ por año) y solo 24 muertos entre 1972 a 2007 [Hilker et al., 2009], lo que evidencia la necesidad de incluir estas amenazas dentro de la planificación de uso de suelo y generar obras de mitigación.

#### A.- Inundación por crecidas de cauces

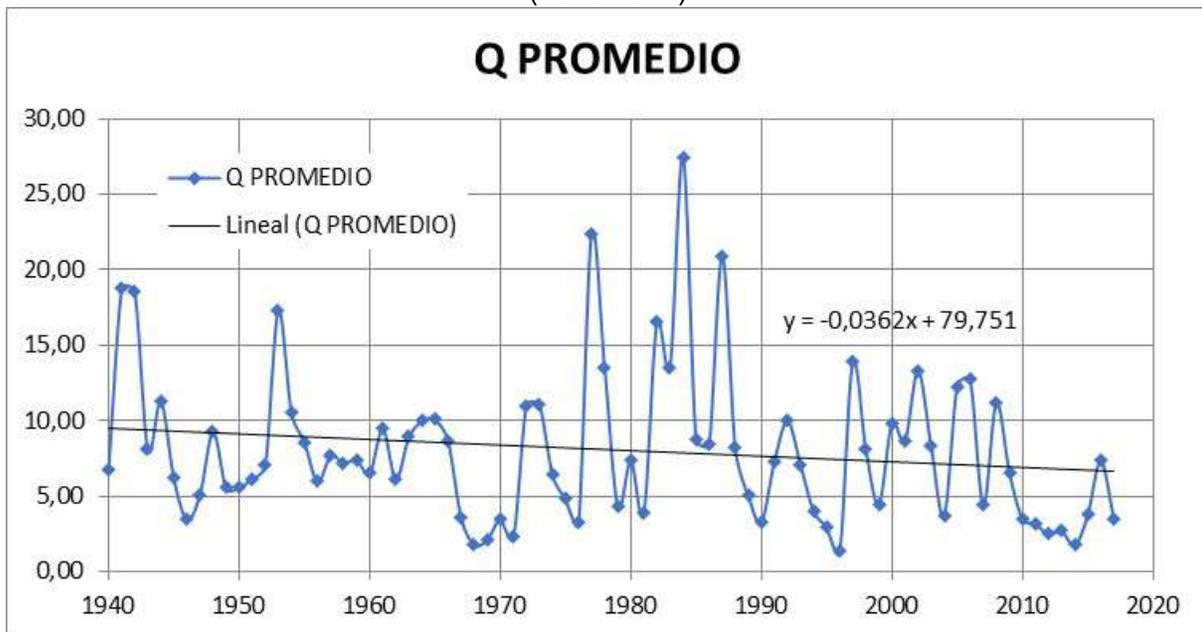
La determinación de la amenaza por inundación considera la inundación de las riberas por crecidas en sus cauces. Este tipo de amenaza responde a los mismos factores que desencadenan procesos aluvionales que serán descritos en la siguiente sección, y que corresponden a precipitaciones intensas. Cabe destacar que en la etapa de diagnóstico se realizó la evolución de las expectativas futuras de crecidas posibles de ocurrir en el cauce del río Putaendo y que pudieran desencadenar inundaciones. El estudio de crecidas del río Putaendo está referido a la sub cuenca 0541 de la gran cuenca 054 del río Aconcagua, y en particular a sus áreas 05412, 05413 y 05414 con 1243 km<sup>2</sup> (Cartografía III-3 y Tabla III-5); no incide mayormente en el río Putaendo el área del estero Las Minillas, 05416, los que si son incluidos dentro de los peligros aluvionales que se expondrán en la siguiente sección. En particular el estero las Minillas y sus tributarios representan cuencas con relativamente pequeñas área de captura de precipitaciones y sin la suficiente altitud para generar una cobertura de nieve. Es por ello que los caudales asociados a este estero se descartan en el diagnóstico de inundaciones por cauces.



disminución de 0,47 m<sup>3</sup>/s anualmente, la caída del valor medio anual desde 7,95 m<sup>3</sup>/s a 6,95 m<sup>3</sup>/s, la reducción del caudal máximo medio mensual desde 67,41 a 43,39 m<sup>3</sup>/s (diciembre de 2005), y la mínima variación de los caudales mínimos, que pasan de 0,60 a 0,68 m<sup>3</sup>/s (marzo de 2017) (Tabla III-7). Puede así descartarse un comportamiento que pudiese incrementar las amenazas futuras por causales de precipitaciones más acentuadas e inundaciones por causes. En efecto, por efectos del cambio climático, puede esperarse una sostenida disminución de los caudales en el Río Putaendo, y la mantención de los caudales mínimos. De acuerdo a los datos de estos 18 años, puede esperarse que la crecida con período de retorno de 100 años presente un caudal del orden de 63,5 m<sup>3</sup>/s.

Un elemento relevante para las inundaciones por crecidas de cauces que fue identificado en el diagnóstico es el Embalse Chacrillas. En noviembre de 2018 se inició el llenado del embalse emplazado inmediatamente aguas arriba de la estación fluviométrica Resguardo Los Patos (**Cartografía II-2**), por lo que las series de registros de esta estación son afectados desde entonces por la regulación de esta obra sobre los caudales del río Rocín, principal aportante al río Putaendo. Su capacidad es de 31 Hm<sup>3</sup> y su regulación comprende 27 Hm<sup>3</sup>. El Informe Consolidado de EIA del proyecto del embalse señaló que el caudal medio máximo anual del río Putaendo en Resguardo de Los Patos era de 19.7 m<sup>3</sup>/s, y el máximo para período de retorno de 100 años corresponde al deshielo, en noviembre, con no más de 220 m<sup>3</sup>/s; el aporte del río Rocín para estas condiciones se señala en 83 m<sup>3</sup>/s. Estas cifras se derivan de la estadística fluviométrica anterior a las manifestaciones del cambio climático aquí analizadas, y por tanto se pueden asumir sobre valuadas. En todo caso, el efecto amortiguador del embalse, más la declinación resultante del cambio climático, apuntan a rebajar esas cifras en forma significativa.

**Grafico III-5:** Caudales medios anuales para la estación fluviométrica Resguardo de los Patos (1940-2017).



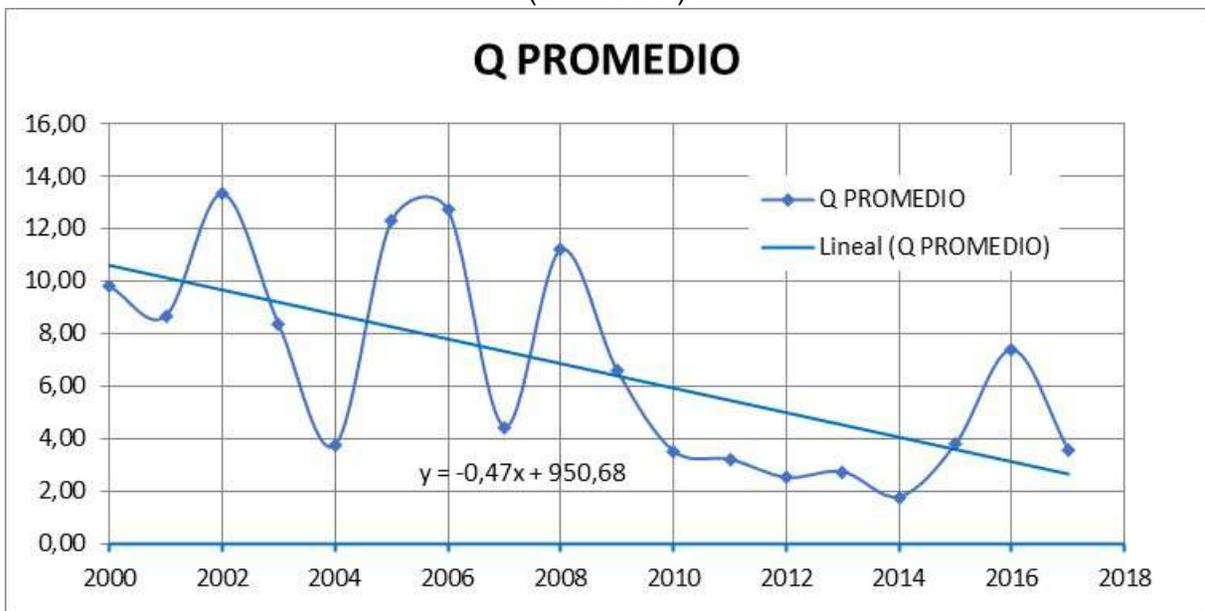
Fuente: Dirección General de Aguas

**Tabla III-6:** Caudales máximos mensuales para la estación fluviométrica Resguardo de los Patos (1940-2017).

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCTY	NOV	DIC	
PROMEDIO	9,95	5,51	3,90	3,08	3,09	3,78	4,43	6,01	7,47	11,29	17,99	18,90	7,95
MAXIMO	46,77	18,69	16,14	9,66	8,73	9,74	26,58	67,41	43,01	39,83	64,57	67,06	67,41
MINIMO	0,98	0,90	0,63	0,68	0,93	0,80	0,92	1,21	1,22	1,42	1,30	1,09	0,63

Fuente: Dirección General de Aguas

**Grafico III-6:** Caudales medios anuales para la estación fluviométrica Resguardo de los Patos (2000-2017).



Fuente: Dirección General de Aguas

**Tabla III-7:** Caudales máximos mensuales para la estación fluviométrica Resguardo de los Patos (2000-2017).

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCTY	NOV	DIC	
PROMEDIO	8,06	4,61	3,00	2,47	2,50	3,49	3,55	4,71	6,36	10,39	17,51	16,82	6,95
MAXIMO	22,30	10,98	6,43	4,35	4,30	8,14	7,56	12,48	13,28	21,44	39,13	43,39	43,39
MINIMO	1,14	0,92	1,10	0,68	0,93	0,80	0,92	1,44	1,56	2,18	2,31	1,62	0,68

Fuente: Dirección General de Aguas

## A.1 Metodología

Si bien el diagnóstico indica que las condiciones y forzantes están debilitadas para la generación de inundaciones por crecidas de cauces, en particular dado el contexto de cambio climático y la presencia del Embalse Chacrillas, es necesario y pertinente que un Plan Regulador Comunal, realice restricciones para el uso de suelo cercano a los cauces, ello según las normativas existentes y las recomendaciones puntuales que se pueden realizar en base a la observación de los elementos que componen el área urbana de la Comuna de Putaendo. Así, con la observación de los elementos geomorfológicos y urbanos, en conjunto con el análisis de la topografía de alta resolución, ambos producto del levantamiento aerofotogramétrico LiDAR, se diseñaron zonas de restricción en torno a los cauces, cuya extensión y característica depende de la jerarquía del cauce. Las zonas fueron definidas en alta, media y baja amenaza, cuyas implicancias en cuanto a restricciones se detallan en los resultados. El objetivo es anticipar y proponer restricciones ante eventuales efectos y perjuicios sobre los territorios adyacentes a los cauces, en particular según los distintos usos que les pueda establecer este estudio de Plan Regulador Comunal.

## A.2 Resultados

En general, los riesgos de inundación tienen origen natural en las condiciones atmosféricas como precipitaciones de elevada intensidad y flujos de deshielos, a lo que se puede sumar en este caso eventuales desbordes de canales o descargas de vaciamiento de embalses; esto aplica al recientemente terminado y puesto en servicio Embalse Chacrillas. La tendencia reciente señala con claridad que las precipitaciones son significativamente decrecientes en cantidad anual, promediando 226 mm/año y, en menor medida, en las intensidades diarias máximas, que se sitúan en el entorno de 76 a 82 mm/24 horas. Esta tendencia implica una disminución en la afección de inundación por crecidas de cauces en la zona urbana definida para este estudio, lo que sumado a la entrada en operación del Embalse Chacrillas, predispone menores caudales a los que históricamente se han medido en el Río Putaendo.

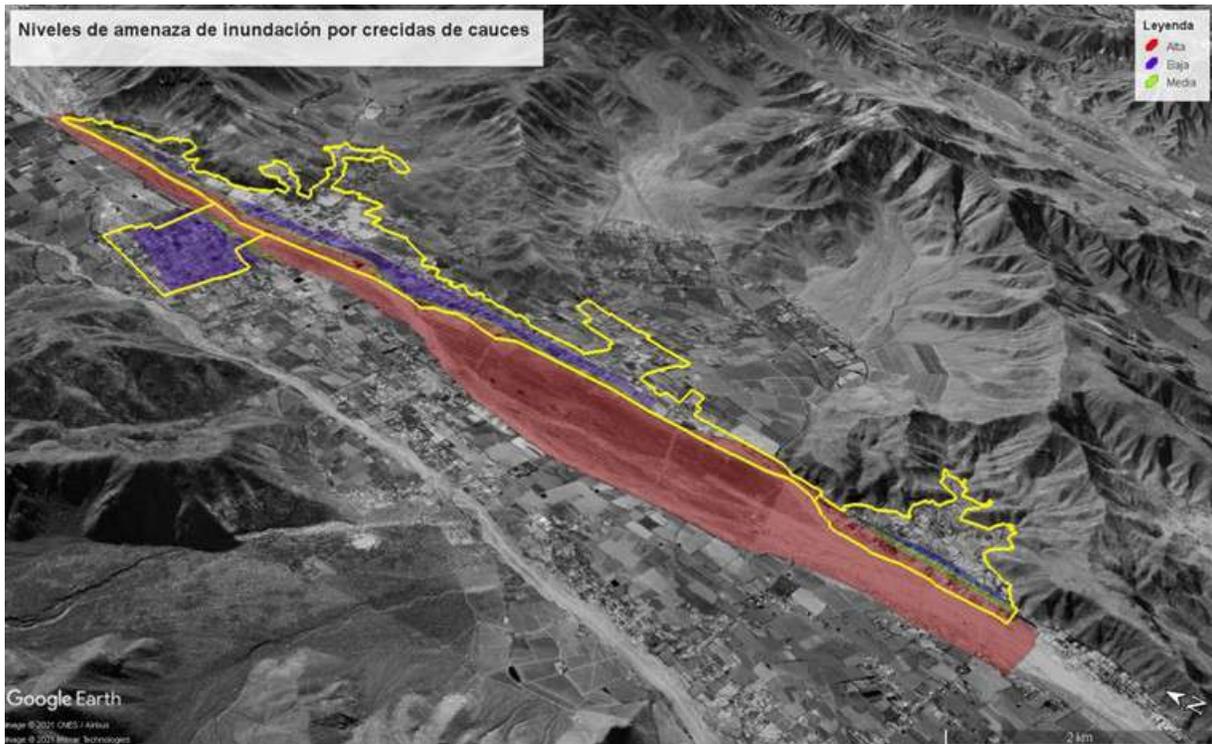
La zona urbana definida para este estudio es colindante con la ribera del Río Putaendo, además esteros y canales menores están presentes en el área de estudio, con un comportamiento efímero y con intervención antrópica. En base al levantamiento aerofotogramétrico LiDAR, el mapeo geomorfológico de formas asociadas (*Canal fluvial activo, Barras fluviales y Llanura aluvial antropizada*, ver **Cartografía Anexa III-1**) y a la jerarquía de los cursos de agua, se definieron tres niveles de amenaza de inundación por crecidas de cauces (**Cartografía III-4**).

La zona de alta amenaza combina una topografía deprimida y cercanía al cauce del Río Putaendo, además por anexo incluyéndolo. En esta zona se debería definir un uso para actividades comerciales, servicios y recreativas con la implementación previa de obras de mitigación, con restricción total de uso para viviendas y para el emplazamiento de infraestructura crítica comunal (carabineros, bomberos, servicios básicos, escuelas, centros de salud, entre otras que se definan).

La zona de amenaza media, representan franjas que se sitúan colindante a las zonas de alta amenaza. En esta zona el uso debería ser discrecional para la vivienda, que solo debe ser autorizada luego del diseño e implementación de obras de mitigación ante posibles crecidas. Actividades comerciales, de servicios y recreativas, se pueden establecer, exceptuando a aquellas ligadas a la infraestructura crítica, la que debe restringirse en su totalidad.

Para la zona de baja amenaza, el uso de suelo debería estar restringida para el emplazamiento de la infraestructura crítica, pudiendo ser utilizada para vivienda, recreación, servicios y comercio.

**Cartografía III-4:** vista con la distribución de los niveles de amenaza por inundación. En amarillo se indica la zona de restitución.



Fuente: elaboración propia en base a imagen de Google Earth Pro.

### A.3 Recomendaciones

Se recomienda seguir los usos de suelo asignados de acuerdo con la definición de alta, media y baja amenaza por inundación. En ese sentido, se recomienda autorizar el uso de suelo para la vivienda e infraestructura crítica en zonas de media amenaza luego de la realización de obras de mitigación. La zona alta amenaza debería estar prohibida para la vivienda y establecimiento de infraestructura crítica.

Se recomienda realizar un estudio hidrológico de crecidas, que incluyan el modelamiento numérico de base física que indique alcance y altura de inundación (e.g., Clark et al., 2015; Niu et al., 2011; Oleson et al., 2010).

Los modelos hidrológicos deben proyectar cambios en los caudales de crecida producto de cambios en el clima (precipitación y temperatura), así como las nuevas condiciones del río, como la operación del Embalse Chacrillas. Se adjunta carta escala 1:5.000 con polígono de amenaza para Putaendo Rinconada y Las Coimas.

## B.- Aluviones e inundaciones aluvionales

Los flujos aluvionales han sido reconocidos a nivel mundial como un peligro de gran importancia, que puede afectar a la infraestructura, actividades económicas y vidas humanas [Calvo y Savi, 2009]. Los flujos aluvionales son aquellos que presentan una relación reológica de agua:sedimento muy baja, es decir presentan una alta concentración de detritos, limos y arcillas (e.g. Keaton y Lowe, 1997). Eventualmente estos flujos pueden generar deposición en la confluencia de cuencas tributarias generando superficies aluviales cuyo apilamiento desarrolla abanicos aluviales a escala de miles de años (*Abanicos Aluviales*, ver [Cartografía Anexa III-1](#)). Cuando esta condición reológica aumenta, o se incrementa el porcentaje de limos y arcillas en relación a los detritos más gruesos, los flujos pueden transgredir las confluencias y fluir aguas abajo por el valle troncal, generando inundaciones aluvionales en zonas incluso muy distantes del origen del material. Son flujos de detritos los que generalmente se depositan en las confluencias de tributarios, mientras que para el caso las inundaciones aluvionales son generalmente flujos hiper-concentrados, aunque se han reportado flujos de barro que han generado inundaciones aluvionales de gran extensión en cuencas áridas y semiáridas andinas (Wilcox et al., 2016).

Iverson (2014) define y describe a los flujos de detritos como masas de suelo y roca fragmentada, cargados de agua, que descienden rápidamente desde laderas montañosas pudiéndose canalizar en canales e incisiones de montañas, incorporar objetos en su camino y formar depósitos lobulados cuando depositan su carga al desconfinarse el flujo en los valles troncales. Se considera un flujo de detritos aquel con al menos un 50% de material de tamaño arena o mayor. Hungr et al (2001), define a los flujos hiper-concentrados como un flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos finos plásticos en un canal, involucrando un contenido de agua significativamente mayor relativo a la fuente del material, y en donde el mayor porcentaje de la fracción de finos, modifica la reología del material, causando mayores extensión de los flujos que incluso pueden transferirse aguas abajo por el valle troncal.

En los flujos aluvionales el mecanismo de generación principal es la incorporación de agua al suelo, a los coluvios y aluvios y a superficies de rocas fragmentadas y regolitos de laderas y canales. Esta incorporación es generada por lluvias intensas y duraderas, aunque también se dan casos por rápido deshielo se superficies nivales. Este aumento de agua debe sobrepasar la capacidad de infiltración del suelo para saturarlo en torno al 100% produciéndose de esta manera un incremento en la presión de poros que disminuye la resistencia al corte de la masa de suelo, condicionando la estabilidad de la ladera (Iverson, 2014). La mayoría del material involucrado en los flujos de detritos e hiper-concentrados se originan desde fuentes discretas o distribuidas en superficies con pendientes con ángulos mayores que 25 a 30° y que poseen una capa de suelo de baja cohesión y/o rocas fragmentadas.

Varios estudios han identificado parámetros morfométricos e hidrológicos que en combinación determinan la susceptibilidad de activación de flujos aluvionales en cuencas tributarias (Jakob y Bovis, 1996; Wilford et al., 2004; de Scally y Owens, 2004). Sin embargo, recientes estudios en cuencas áridas y semiáridas andinas indican que la fuente de estos sedimentos no son estas superficies de alta pendiente de laderas, sino que son principalmente el relleno de los canales tributarios que fueron recargados durante un largo periodo de tiempo anterior al evento de lluvia (Aguilar et al., 2020). Esto se sustenta en un modelo conceptual de un sistema fluvial árido con capacidad de transporte de sedimento limitado. En particular las inundaciones aluvionales que aparentemente se producen a gran distancia de las cuencas tributarias, se

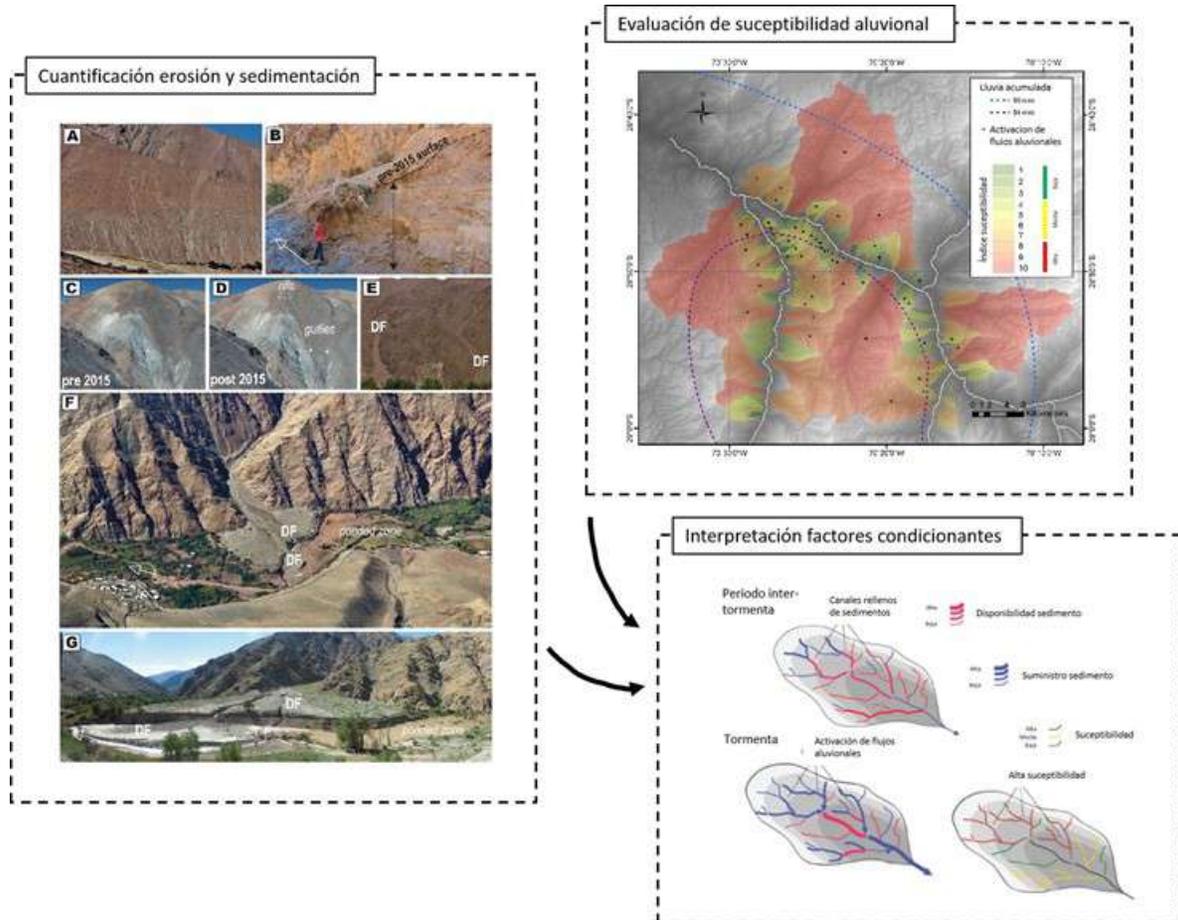
asocian al acarreo de sedimentos incorporados en el flujo desde los canales tributarios y no desde laderas.

## **B.1 Metodología**

En los sistemas fluviales con transporte limitado de sedimentos del centro-norte de Chile la variabilidad litológica, su velocidad de meteorización y su fragmentación es un condicionante menor en relación con los cambios en la morfometría e hidrología de la cuenca, que determinan la capacidad de transporte de los sedimentos (Aguilar et al., 2020). Es decir los sedimentos siempre estarán disponibles para su transporte durante lluvias torrenciales. Estadísticamente el efecto de la variabilidad litológica en las cuencas semiáridas, en cuanto a su composición, dureza, textura y estructura, no resulta ser un factor condicionante en la activación de flujos aluvionales. Además, la geología de la cuenca del Río Putaendo no muestra grandes variaciones litológicas. Se agrupa fundamentalmente en dos unidades de rocas volcánicas y volcánico-clásticas de composición andesítica, con intercalaciones de capas sedimentarias continentales separadas por el Sistema de Falla Pucuro (Cartografía -1). La geología del área que drena desde los tributarios localizados al este del sistema de falla incluye rocas del oligoceno-mioceno, agrupadas en la Formación Abanico y Formación Farellones, mientras que al oeste de la falla, las rocas son volcánicas y sedimentarias del cretácico. Plutones y pórfidos cenozoicos y mesozoicos de discreto tamaño instruyen en ambas unidades volcánicas.

Para el análisis de susceptibilidad de flujos aluvionales se consideraron las características morfométricas e hidrológicas de cuencas tributarias, y dado lo descrito en el párrafo anterior, no se considera a la geología como un condicionante en la susceptibilidad, pero que intrínsecamente está ligada a la morfometría de la cuenca. Luego de un análisis estadístico, que implica la clasificación en grupos por medio de un análisis factorial y la posterior prueba de comparación de medias (ANOVA de un factor), Aguilar et al. (2020) sugiere que son dos los factores condicionantes para la susceptibilidad aluvional de cuencas semiáridas andinas (**Figura III-1**). Cada factor agrupa tres variables morfométricas e hidrológicas, que incluyen para el Factor de Tamaño el área de cuenca, el largo y el máximo Orden Strahler del drenaje troncal, y la pendiente media de la cuenca, el gradiente del drenaje troncal y la razón de Melton (Melton, 1967) de la cuenca para el Factor de Relieve (**Tabla Anexa III-1**). Este análisis permite seleccionar las variables que más inciden en la susceptibilidad, disminuir las variables a analizar descartando variables interdependientes.

**Figura III-1.** Adaptación de figuras de Aguilar et al. (2020) que indican actividades de adquisición de datos de erosión y sedimentación ligados a los flujos aluvionales de marzo de 2015, la evaluación de la susceptibilidad aluvional en las quebradas y la interpretación de los factores condicionantes.



Fuente: Modificado de Aguilar et al. (2020)

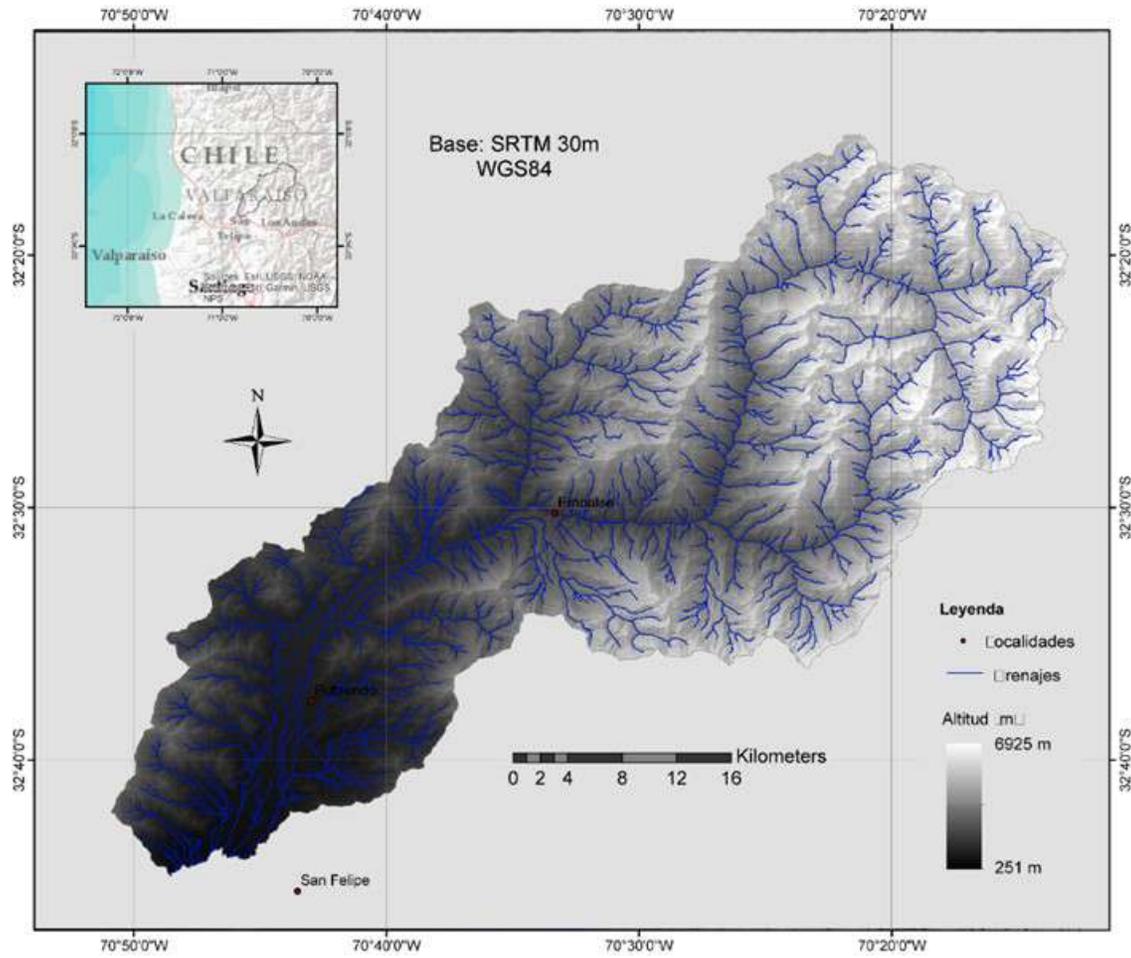
Con el objetivo de generar un mapa de susceptibilidad aluvional para el Río Putaendo, se definió y jerarquizó la red de drenaje, se definieron las cuencas tributarias y se extrajeron los parámetros morfométricos e hidrológicos mencionados anteriormente. La jerarquización de la red de drenaje considera el orden Strahler, que asigna un valor creciente mientras más evolucionado sea el drenaje desde el punto de vista geomorfológico. Así, ordenes de Strahler altos significan canales troncales, mientras que los órdenes bajos representan sus tributarios. Se consideró solo la zona que se localiza aguas abajo del embalse, incluyendo la Quebrada Resguardo de los Patos en toda su extensión, que confluye en el Río Putaendo aguas abajo del embalse. Esta discriminación se sustenta en la escasa población, tránsito y actividad industrial aguas arriba del embalse y en la capacidad del embalse de retener los flujos hiperconcentrados y los flujos de barro, que eventualmente puedan provenir desde aguas arriba e inundar las zonas pobladas de la Comuna de Putaendo. Es importante denotar que este trabajo no incluye el análisis de susceptibilidad aluvional en la cuenca que drena el Embalse Chacrillas y cuyos estudios de factibilidad operacional y ambiental debe estar contenido en el

informe de impacto ambiental del embalse. Por otro lado el análisis solo se considera los flujos aluvionales generados por lluvias intensas, ya que aquellos generados por rápido deshielo del manto nival, solo podrían activarse en las zonas altas que se localizan aguas arriba del embalse.

La definición y jerarquización de la red de drenaje, la construcción del modelo de pendiente y la identificación de las cuencas tributarias se realizó por medio de las herramientas que ofrece el software ArcGIS, ello considerando los datos topográficos aportados por un modelo de elevación digital del servicio *ASTER GDEM*. La grilla de este modelo de elevación tiene una resolución y tamaño de celda de 30x30 m. La **Cartografía III-5** muestra la red de drenaje de las 124 cuencas tributarias estudiadas sobre un relieve sombreado, mientras que la **Cartografía III-6** muestra la jerarquización de la red de drenaje sobre el modelo de pendiente construido a partir del modelo de elevación digital. Para el cálculo de los parámetros morfométricos e hidrológicos, se utilizó la misma base topográfica (*ASTER GDEM*) y las herramientas hidrológicas y morfométricas incluidas en el software ArcGIS.

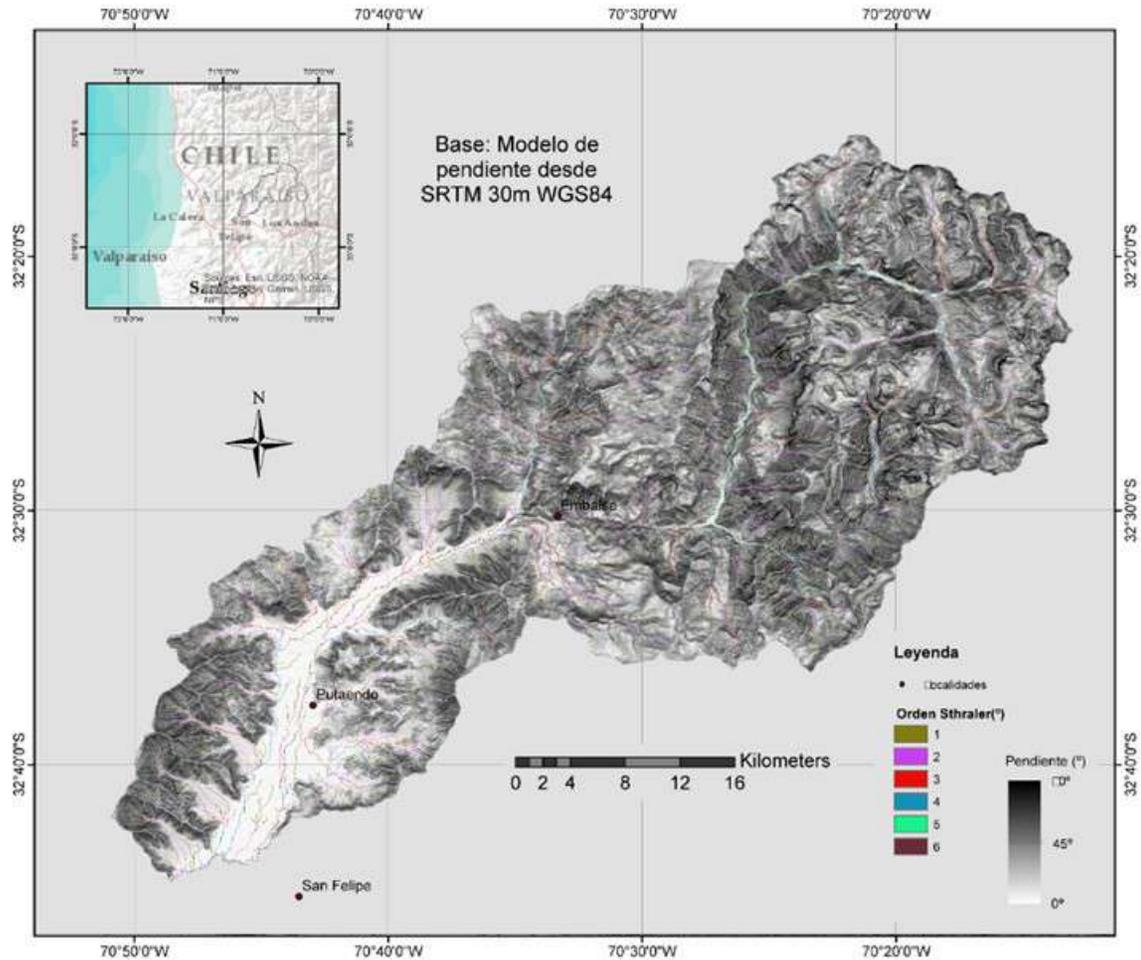
A escala urbana, se consideró el mapa de susceptibilidad aluvional desarrollado a escala de cuenca y el mapeo geomorfológico de los abanicos aluviales que se presenta en la **Cartografía Anexa III-1**. Con el cruce de esta información se determinaron áreas de alta, media y baja amenaza en base al levantamiento aerofotogramétrico LiDAR. Similar a lo diferenciación establecida para el caso de amenazas de inundación por crecidas de causas, en los resultado se establecen recomendaciones para restricciones de uso para cada zona.

**Cartografía III-5.** Modelo de elevación digital con el trazado de la red de drenaje de la cuenca del Río Putaendo.



Fuente: Procesamiento y diagramación propia. Datos topográficos de ASTER GDEM.

**Cartografía III-6.** Modelo de pendiente con la jerarquía Strahler de la red de drenaje de la cuenca del Río Putaendo.



Fuente: Procesamiento y diagramación propia. Datos topográficos de ASTER GDEM.

## B.2 Resultado

### **Análisis de amenaza aluvional a escala de cuenca**

En la **Tabla Anexa III-1** se tabulan los parámetros calculados para cada cuenca tributaria junto al valor calculado para los dos factores condicionantes (Factor Tamaño y Factor Relieve). El factor de tamaño representa una combinación factorial de la suma ponderada del valor normalizado del área de cuenca ( $A_n$ ), del largo ( $L_n$ ) y del máximo Orden Strahler ( $O_n$ ) del drenaje troncal (Ecuación 1). El factor de relieve representa una combinación factorial de la suma ponderada del valor normalizado de la pendiente media de cuenca ( $P_n$ ), el gradiente de drenaje troncal ( $G_n$ ) y la razón de Melton ( $M_n$ ) (Ecuación 2).

$$\text{Factor Tamaño} = (A_n * 0.92) + (L_n * 0.90) + (O_n * 0.89) \dots\dots\dots \text{Ecuación 1}$$

$$\text{Factor Relieve} = (P_n * 0.95) + (G_n * 0.80) + (M_n * 0.70) \dots\dots\dots \text{Ecuación 2}$$

En la **Cartografía III-7** se muestra un mapa con la distribución del índice de susceptibilidad para cada cuenca tributaria. El procedimiento para el cálculo de la susceptibilidad incluye la definición de tres rangos para cada factor condicionante, al que se le asigna un valor 0 (baja), 1 (media) y 2 (alta) dependiendo de su contribución como condicionante en la susceptibilidad de flujos aluvionales en las cuencas (Aguilar et al., 2020). La sumatoria entre los dos factores entrega un valor numérico entre 0 y 4 que define cuatro índices de susceptibilidad: muy baja (0), baja (1), media (2), alta (3) y muy alta (4). El resultado se presenta como un mapa de susceptibilidad desplegable en un sistema de información geográfico.

El alcance del depósito aluvial generado desde cada cuenca tributaria en la llanura fluvial inmediata a su confluencia, se ilustra con una circunferencia cuyo color indica la susceptibilidad y su tamaño es proporcional al área de cobertura en la **Cartografía III-8** y al volumen de sedimento depositado en la **Cartografía III-9**. Para el estimación de área ( $A_d$ ) y volumen ( $V_d$ ) del depósito se utilizó un factor constante (2,9 y 5,6) y un exponente (0,6 y 0,6) de la formula potencial que relaciona empíricamente el área de cuenca ( $A_c$ ) con el volumen y área del depósito (Ecuaciones 3 y 4) calculado para un evento de precipitación de tres días con intensidad de 50mm/día en zonas semiáridas andinas (Aguilar et al., 2020).

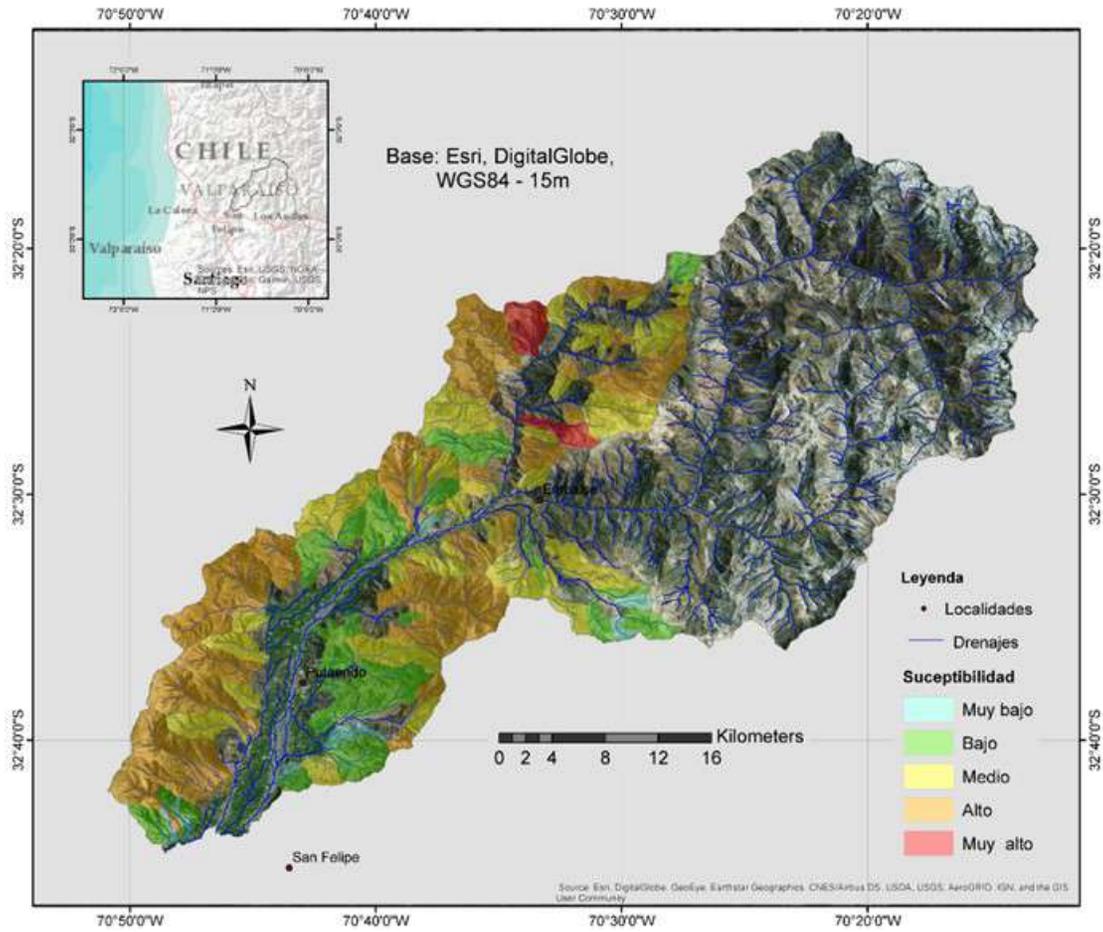
$$V_d = 2,9 * A_c^{0,6} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3}$$

$$A_d = 5,6 * A_c^{0,5} \dots\dots\dots \text{Ecuación 4}$$

Se destaca que a lo largo de la Quebrada Resguardo de los Patos se localizan zonas de confluencia de cuencas tributarias que presentan muy alto peligro aluvional, con área de afección que llegan a 30.000 m<sup>2</sup> y volúmenes de depósitos de hasta 60.000 m<sup>3</sup> (cartografías III-6, III-7 y III-8). Si bien, la evaluación de susceptibilidad de estas cuencas tributarias se incluye en el estudio, al igual que la estimación de área de cobertura y volúmenes de depósitos aluviales, no se incluye estas como zonas de potencial peligro, dada la escasa población que vive y transita por esta zona. Por el contrario, para el área que se localiza aguas abajo de la confluencia de la Quebrada Resguardo de los Patos con el Río Putaendo se efectuara un mapeo específico para las confluencias de los tributarios que incluye la clasificación de susceptibilidades de las cuencas (**Cartografía III-10**).

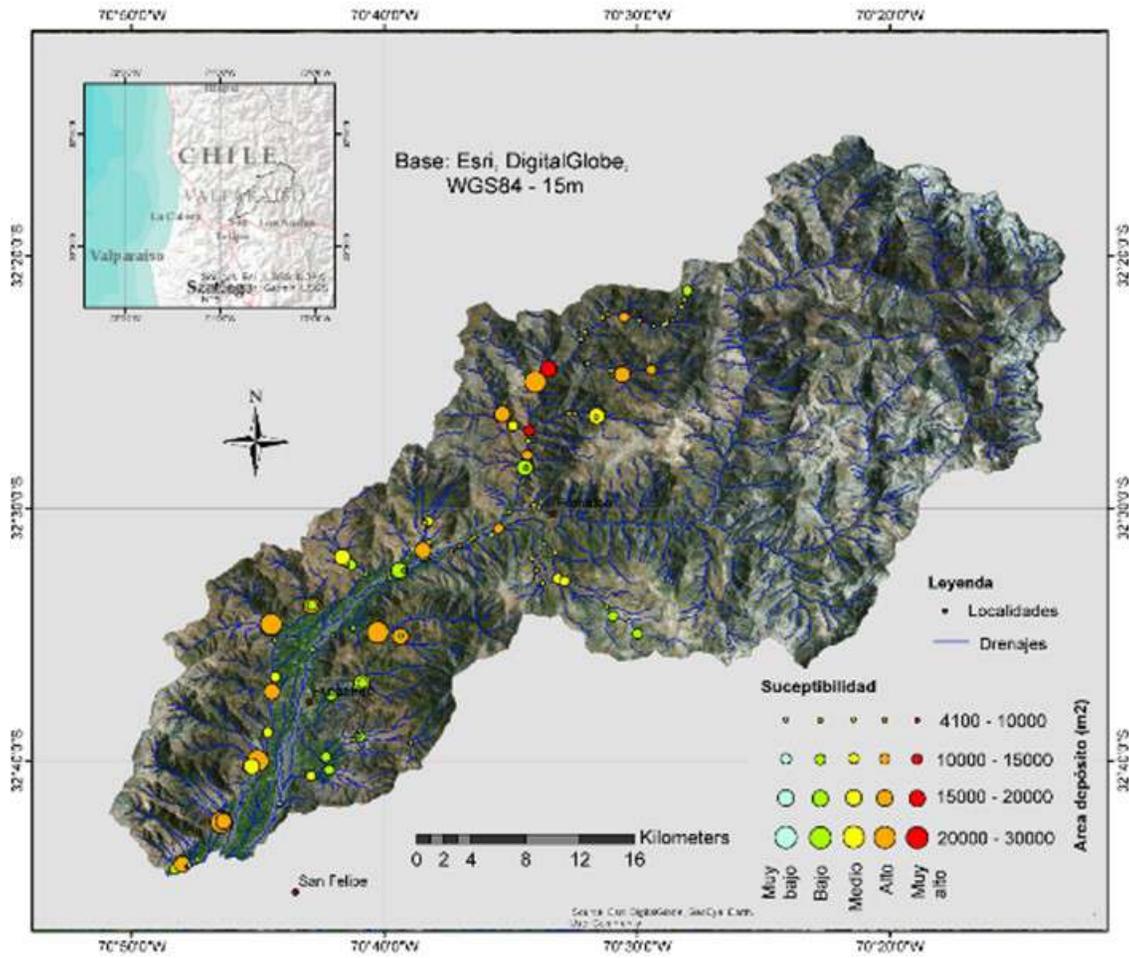
La zona localizadas aguas abajo de esta confluencia es la con mayor densidad de población, de tránsito y de actividad industrial. El mapeo de la **Cartografía III-10** se realiza en base semiconos radiales en favor de la pendiente sobre imágenes satelitales, cuya área representa la cobertura de flujos aluvionales que se podría desarrollar durante un evento con intensidad mayores a 50 mm/día. El vértice del semicono representaría el ápice del abanico aluvial, donde se desconfinan el flujo y comienza la deposición hasta el canal principal, donde la pendiente se considera muy baja para seguir avanzando pendiente abajo.

**Cartografía III-7.** Imagen satelital con la distribución del índice de susceptibilidad de activación de flujos aluvionales para las cuencas tributarias del Río Putaendo.



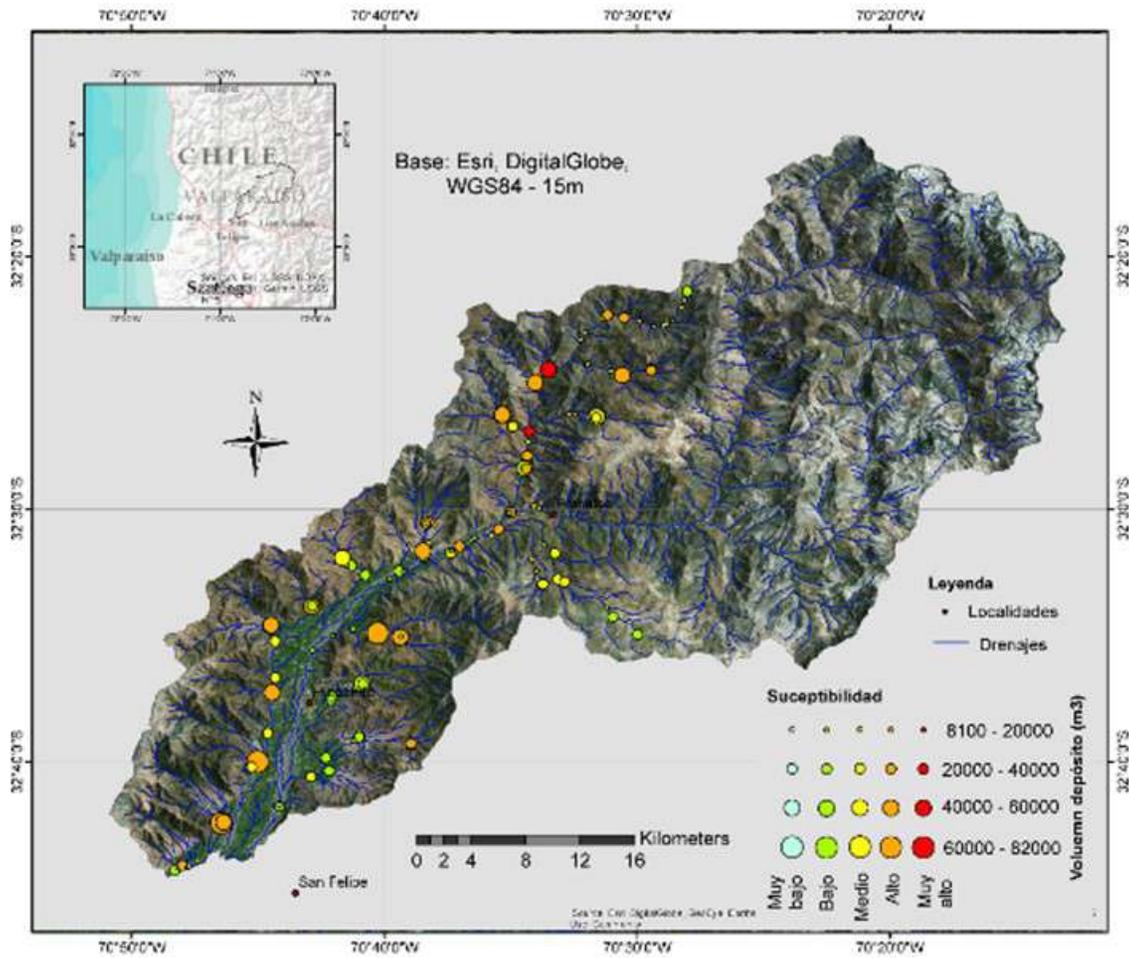
Fuente: Procesamiento y diagramación propia. Imagen Satelital de DigitalGlobe (ESRI).

**Cartografía-8.** Mapa de susceptibilidad de área de cobertura aluvional en la confluencia de tributarios de la cuenca del Río Putaendo.



Fuente: Procesamiento y diagramación propia. Imagen Satelital de DigitalGlobe (ESRI).

**Cartografía III-9.** Mapa de susceptibilidad de volumen de cobertura aluvional en la confluencia de tributarios de la cuenca del Río Putaendo.



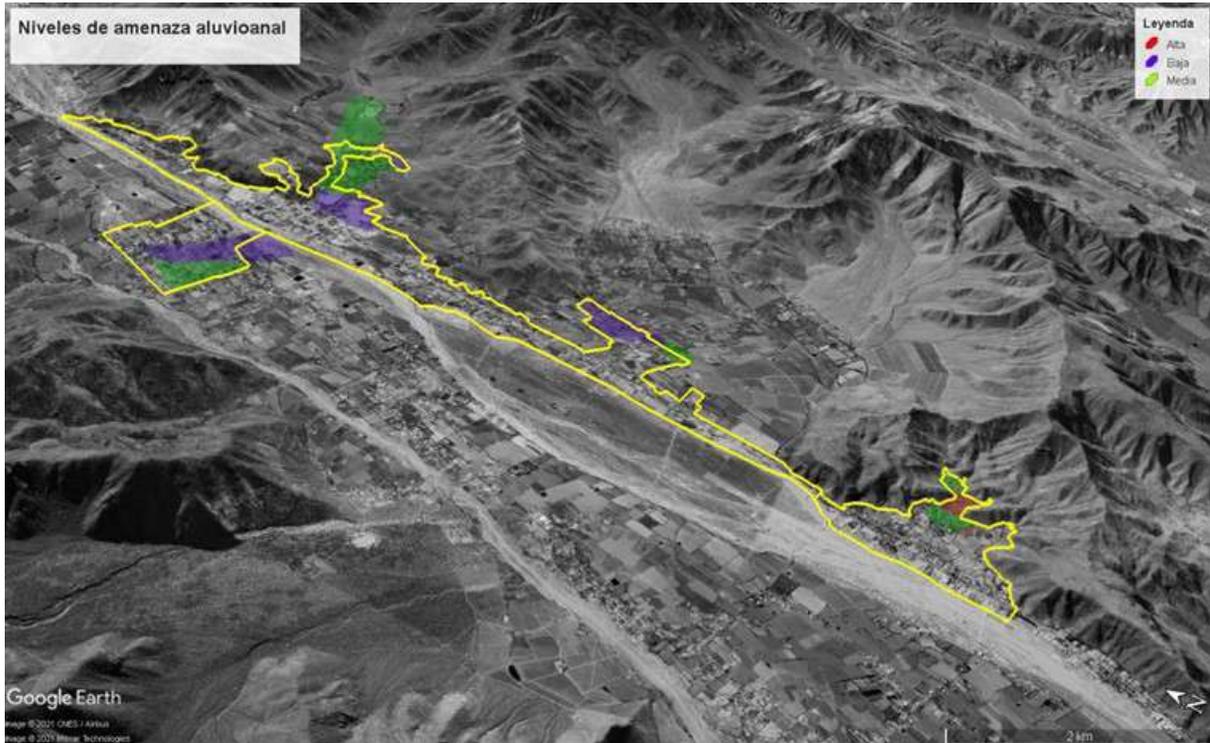
Fuente: Procesamiento y diagramación propia. Imagen Satelital de DigitalGlobe (ESRI).



### **Análisis de amenaza aluvional a escala urbana**

Se identificaron cuatro zonas urbanas bajo algún nivel de amenaza aluvional en la zona de estudio (**Cartografía III-11**): **Putaendo, Granalla, Rinconada da Silva, Las Coimas**.

**Cartografía III-11:** Vista con la distribución de los niveles de amenaza aluvional. En amarillo se indica la zona de restitución aerofotogrametría.



Fuente: elaboración propia en base a imagen de Google Earth Pro.

**Putaendo:** Se sitúa en las zonas topográficamente altas del área urbana de Putaendo, donde flujos aluvionales provenientes de la Quebrada Agua Amarilla y sus tributarios pueden afectar una amplia zona. Considerando la susceptibilidad definida en la **Cartografía III-10**, en esta zona se definieron zonas de media y baja amenaza (**Cartografía III-11**). La zona de amenaza media se sitúa en las partes más altas de la zona urbana definida en el estudio, donde se recomienda un uso discrecional para la vivienda, que solo debe ser autorizada luego del diseño e implementación de obras de mitigación ante posibles crecidas. Actividades comerciales y recreativas, y en general servicios, se pueden establecer, exceptuando a aquellas ligadas a la infraestructura crítica, la que debe restringirse en su totalidad. La zona de baja amenaza, se sitúa topográficamente abajo de la zona de media amenaza. Para esta zona se recomienda la restricción para el emplazamiento de la infraestructura crítica, pudiendo ser utilizada para vivienda, recreación, servicios y comercio.

**Granalla:** Se localiza en la ribera occidental del Río Putaendo, donde flujos aluvionales provenientes de la Quebrada Granalla pueden afectarla. Considerando la susceptibilidad definida en la **Cartografía III-10**, en esta zona se definieron zonas de media y baja amenaza (**Cartografía III-11**). Aunque esta zona está cubierta por cultivos y en menor medida población, similar al establecido para la Zona 1, se recomienda un uso discrecional para la vivienda en la

zona de media amenaza, luego de la implementación de obras de mitigación, con la posibilidad de uso comercial, servicios y recreación. Para la zona de baja amenaza se considera su uso para la vivienda. Tanto para la zona de baja y media amenaza deberían estar restringido el emplazamiento de la infraestructura crítica.

**Rinconada da Silva:** Se localiza en el sector de Rinconada de Silva, donde flujos aluvionales provenientes de las quebradas que se extienden hacia el este pueden afectarla. En esta zona, la susceptibilidad definida (**Cartografía III-10**) para las quebradas indica zonas de amenaza media y baja (**Cartografía III-11**). En ambas zonas se recomienda no establecer infraestructura crítica, y en la zona de media amenaza se recomienda establecer medidas de mitigación antes de autorizar el uso habitacional.

**Las Coimas:** Localizada en el sector Las Coimas, es en esta zona donde se identificó una área de alta amenaza considerando el análisis de susceptibilidad aluvional de la quebradas que se extiende hacia el este (**Cartografía III-10**). En esta zona de alta amenaza se recomienda su uso exclusivo para actividades comerciales y recreativas con la implementación previa de obras de mitigación, con restricción total de uso para viviendas y para el emplazamiento de infraestructura crítica comunal. En la zona contigua de amenaza media se recomienda el uso habitacional solo con medidas de mitigación, mientras que su uso para actividades comerciales y recreativas se puede desarrollar, mientras que no involucre infraestructura crítica.

### **B.3 Recomendaciones**

Se recomienda seguir los usos de suelo asignados de acuerdo con la definición de alta, media y baja amenaza aluvional. Se recomienda autorizar el uso de suelo para la vivienda e infraestructura crítica en zonas de media amenaza aluvional luego de la realización de obras de mitigación. En zonas de alta amenaza se recomienda prohibir el uso habitacional y establecimiento de infraestructura crítica.

Para las quebradas donde se definieron amenaza en la zona urbana, se recomienda realizar un estudio de crecidas aluvionales para las quebradas, que incluyan el modelamiento numérico del alcance y altura de inundación aluvional.

Cabe destacar que en las últimas décadas los modelos numéricos se han convertido en buenas herramientas para entender el comportamiento y magnitud de los flujos aluvionales, entre ellos el FLO-2D, es probablemente el más utilizado (Rickenmann, 2016).

### **C.- Definición de polígonos de riesgo**

En base a los antecedentes presentados se definieron los polígonos de amenazas por inundaciones y aluviones en el área de restitución aerofotogramétrica (LiDAR) que incluye la alternativa extendida, que es la mayor área que podría crecer Putaendo por definición del PRI, regulador intercomunal. Estos polígonos se presentan a escala 1:5000 para la zona de estudio en la **Cartografía Anexa III-2**. Se adjunta carta escala 1:5.000 con polígono de amenaza para Putaendo Rinconada y Las Coimas.

Cabe recordar que los aluviones suelen clasificarse como remociones en masa en trabajos de peligros geológicos, aunque definiciones recientes y la observación detallada de los procesos involucrados ha devenido en su clasificación como un tipo de inundación por flujos en masa asociados a peligros hidrometeorológicos. Luego de aquella aclaración, los polígonos que se

presentan son de amenazas por inundación y aluvión, y este último se refiere *sensu stricto* a un tipo de remoción (flujo) en masa.

### **I.5.2.- Fallas activas y megadeslizamientos**

En el sector de la cuenca del río Putaendo se observa una serie fallas activas que se distribuyen a lo largo del Sistema de Fallas Pocuro (SFP), que corresponde a una estructura antigua que ha tenido diversas etapas de actividad (Gana y Wall, 1997; Campbell, 2005; Jara, 2013). Inicialmente estas fallas fueron identificadas como parte un sistema estructural mayor por Aguirre (1960), caracterizada por un conjunto de fallas normales que habría controlado la formación de la depresión central y, posteriormente fue definida por Carter y Aguirre (1965). Rivano (1996) indica que el SFP además de presentar un movimiento extensional, estos también se encontrarían acompañado por un movimiento en el rumbo, mientras que Campbell (2005) señala que este sistema de falla se encontraría parcialmente invertido. Si bien la deformación tectónica asociada al SFP fue acotada al Mioceno (Jara, 2013), en estudios más recientes se reportaron evidencias de tectónica activa (a escala de miles de años) asociada a estructuras alojadas en su zona de daño, las cuales presentan mayoritariamente orientaciones NNW y, en menor medida NNE, sin embargo, algunas de estas no se encuentran directamente relacionadas a este sistema de falla. Cabe destacar que se incluyen además los megadeslizamientos de tierra y roca a escala de tiempo geológica que se han reportado en la zona y cuya localización cercana a las trazas de las fallas indican, ya sea una detonación de origen sismogénica y/o la debilidad del macizo rocoso por el fractura miento y debilidad asociado a las rocas cercanas a las fallas

#### **A.- Metodología**

El presente trabajo se efectuó constituyendo un catastro actualizado de estructuras y fallas descritas por diferentes autores. En particular, considerando la revisión y compilación de varios trabajos efectuados en la zona en trabajos de Título de Geólogos(as) y Grado de magister en Geología. El catastro fue desplegado en un sistema de información geográfica para indicar la localización, extensión y características de las distintas fallas a las que se le han encontrado algún indicio de actividad a escala de miles de años (**Cartografía Anexa III-3**). Cabe destacar que en el sistema de información geográfico se incluyen además los megadeslizamientos cuya localización cercana a las trazas de las fallas.

#### **B.- Resultados**

En un estudio de neotectónica realizado por Troncoso (2014) en el borde oriental de la depresión Los Andes – San Felipe, fue reconocida una falla inversa vergente al oeste con actividad cuaternaria denominada como Falla Cariño Botado (FCB), que se encontraría dentro del dominio de la traza del SFP, pero que esta no estaría relacionada a la misma. Por otro lado, Machuca (2017) mediante estudios geomorfológicos realizados en el SFP infirió una falla inversa vergente al oeste ubicada en el sector del Estero Chalaco que denominó como Falla Los Sapos (FLS). En un estudio más reciente realizado por Estay (2019), por primera vez se encontraron evidencias de deformación cuaternaria en las fallas Camino del Inca (FCI), Los Quemados (FLQ), Falla Jahuel (FJ) y San Francisco (FSF), además de algunas nuevas evidencias en FLS y FCB, las cuales serán presentadas a continuación (**Cartografía Anexa III-2**).

Más hacia el norte, localizada al interior de los valles del río Sobrante y Estero Alicahue se encuentra la FCI, que corresponde a una falla oblicua inferida con vergencia al oeste de ca.

11,4 km de longitud, extendiéndose a lo largo de la cordillera principal. La cinemática evidenciada en esta falla son nuevos antecedentes que respaldan que los movimientos inversos vergentes al oeste del SFP habrían estado acompañados por movimientos transcurrentes dextrales (Estay et al., 2018) y, que son nueva evidencia de la deformación en el Cuaternario tardío. Estay (2019) en su estudio hace mención a que el plano de esta falla no se observó directamente en terreno, sin embargo, extensos escarpes rectilíneos contrapendiente de rumbo NNW dejan en manifiesto la acción de esta falla en el área.

Hacia el sur, en el sector occidental del estero Chalaco se encuentra otro segmento en el ámbito del SPF correspondiente a la FLS, la cual corresponde a una falla inversa inferida de rumbo ca. N20°E. Machuca (2014) asocia esta estructura al SFP e indica que esta falla genera un estrangulamiento del curso inferior de los valles afluentes del estero Chalaco. Por otra parte, Estay (2019) señala que el plano de la falla no fue posible observar en terreno, sin embargo, existen evidencias geomorfológicas como remanentes desgastados de un escarpe contrapendiente, áreas deposicionales planas y anomalías en topografía que respaldan la existencia de esta falla, y que son evidencias de deformación tectónica reciente. En la figura 3 se puede observar la traza de la FLS que se extiende por ca. 16 km y, que en el valle del río Rocín parte de la traza se encuentra cubierta por el depósito de avalancha de roca Los Maquis.

Paralelamente a la FLS y FJ, se encuentra una falla inversa inferida con vergencia al oeste y rumbo N20°W que se extiende por ca. 34,4 km a lo largo de la cordillera principal, la cual fue definida anteriormente como falla Campos de Ahumada por Machuca (2017), y recientemente redefinida por Estay (2019) como falla El Cántaro (FEC). En el sector del estero Los Maquis e inmediatamente al oeste del Embalse Chacrillas, esta falla se encuentra parcialmente cubierta por el depósito de avalancha de roca Los Maquis y, hacia el sur, en el sector de quebrada La Laja se encuentra parcialmente cubierto por depósitos de megadeslizamientos jóvenes (Qyls), antiguos (Qols) y muy antiguos (Qvols).

Inmediatamente al sur de la FLS, se encuentra la FLQ correspondiente a una falla inversa inferida de rumbo ca. N25°E localizada al interior del valle del estero El Zaino, extendiéndose por ca. 8,8 km. En el estudio de Estay (2019) por primera vez se caracteriza esta estructura, observándose un escarpe contrapendiente rectilíneo que disloca de manera transversal la superficie de un cordón montañoso menor, que evidencia la acción de esta falla. Por otra parte, el mismo autor señala que el plano de la falla no fue evidenciado en terreno, sin embargo, de acuerdo a la traza del escarpe y relación entre morfologías tectónicas asociadas, sugieren que esta estructura presenta un manteo en dirección al sureste. En el mapa estructural se puede observar que el drenaje se encuentra cruzando transversalmente la falla y que, por otro lado, no se observa algún tipo de relación directa con depósitos de colapso de ladera.

En la zona sur del área de estudio, otra de las fallas en que Estay (2019) caracterizó la deformación cuaternaria corresponde a la FJ, la cual corresponde a una falla inversa inferida que se extiende por ca. 16,5 km desde el borde oriental del valle del estero el Zaino hacia el sur. Anteriormente, Machuca (2017) indica que esta falla presenta un rumbo ca. N10°W y una vergencia hacia el oeste, además, no se evidencian zonas de fracturamiento asociados a la FJ, sin embargo, reconoció un escarpe rectilíneo que se extiende por al menos 5 km en la zona, lo cual permite inferir la existencia de esta estructura. Recientemente, uno de los rasgos geomorfológicos importantes observados en el trabajo de Estay (2019) corresponde a un escarpe de ca. 12 km y 600 m, de longitud y desnivel, respectivamente, lo cual genera una separación en la topografía. En el sector suroriental del estero el Zaino se puede observar que

parte de la traza de la falla se encuentra cubierta por depósitos de megadeslizamientos muy jóvenes y antiguos, los que eventualmente podrían encontrarse relacionados a la actividad de la FJ.

A lo largo del piedemonte en el borde oriental de la depresión de Los Andes-San Felipe se extiende por ca. 2,1 km una falla inversa inferida correspondiente a la FSF. Esta estructura fue reconocida a partir de tres escarpes discontinuos que se encuentran orientados NS a NNW, los cuales en algunos sectores se encuentran dislocando superficies ligeramente inclinadas hacia el oeste de depósitos de abanico aluvial (Estay, 2019). Además, el mismo autor señala que esta estructura presenta un manteo de  $45^\circ$  hacia el este y un desplazamiento de ca. 3,5 m. De acuerdo a lo observado en el mapa de fallas activas (FSF), se puede observar que en el ingreso al valle del estero San Francisco se encuentra la FSF y que, inmediatamente hacia el este, se encuentra la FCB.

Una de las evidencias directas de tectónica activa a lo largo del SFP corresponde a la FCB, la cual es una falla inversa de rumbo norte-sur y vergencia oeste definida por Troncoso (2014), que se extiende por ca. 17,6 km a lo largo del límite oriental de la depresión de Los Andes-San Felipe. Esta estructura coincide con el rumbo del SFP, sin embargo, no necesariamente ambas corresponden a la misma estructura, debido a que Troncoso (2014) indica que la FCB fue desarrollada por un debilitamiento en el sistema de falla por brechización y alteración previa. Las principales evidencias de actividad cuaternaria generada por esta estructura se basan en algunos depósitos que presentan basculamiento y cabalgamiento de rocas de la Formación Abanico sobre abanicos aluviales cuaternarios (Troncoso, 2014; Medina, 2018), lo cual también pudo ser observado por Estay (2019), quien reconoció los depósitos aluviales basculados ca.  $35-45^\circ$  al oeste. Por último, Estay (2019) señala que en terreno no fue posible observar el plano de la FCB, sin embargo, se reconoce un escarpe de ca. 80 m de desnivel y 7,5 km de longitud y, un escarpe menor de ca. 400 m de longitud al sur del río Aconcagua. En el mapa se puede observar que la FCB se localiza algunos kilómetros al este de las localidades de Los Andes y San Esteban, la cual se encuentra paralelamente a la FSF.

Existe una concentración importante de fallas tanto en el sector occidental como oriental de la cuenca del río Putaendo, sin embargo, este último presenta un mayor interés debido a las fallas potencialmente activas que presenta y que fueron descritas previamente. Todas estas evidencias permiten respaldar que el SFP es tectónicamente activo a escala del Cuaternario. Además, existe la posibilidad de que los depósitos de colapso de ladera (megadeslizamientos) presentes en el área oriental de la cuenca del río Putaendo puedan haberse generado o tener algún tipo de relación directa con estas fallas activas.

### **C.- Recomendaciones**

Vargas et al., 2014 indican que los rasgos geomorfológicos, así como la vergencia al oeste de varias de las fallas reconocidas en la zona, permiten inferir que existe deformación tectónica reciente en el sector y que esta podría tener una edad menor a 19.000 años, lo cual es similar a los últimos movimientos de la falla San Ramón (FSR) en las cercanías de Santiago. Ante esto se recomienda realizar estudios rigurosos en cuanto a las tasas de deformación y los tiempos de retorno de posibles sismos asociados para estas fallas. Cabe destacar que si bien las trazas de estas fallas se encuentran a más de 12 km de las zonas urbanas estudiadas, la activación de una de estas estructuras puede generar un sismo de gran intensidad, incluso  $>7$  grados Richter. En base a esto, se recomienda realizar estudios de la potencial intensidad de

un sismo asociado al movimiento de estas fallas, en particular de aquellas cuyas trazas están más cercanas a las zonas pobladas (**Cartografía Anexa III-3**).

## **I.6 Conclusiones**

Se estudiaron las amenazas por procesos naturales a escala comunal definiéndose en orden de mayor peligro de desastres para la comuna los derivados de procesos aluvionales desde quebradas tributarias, las inundaciones por derrame de cauces del Río Putaendo y los colapsos de laderas cercanos a zonas de fallas activas sismogénicas. Las amenazas por inundación y aluviones (remociones en masa) fueron abordadas a escala urbana definiéndose los polígonos de amenaza, considerando los límites geográficos establecidos en el Plan Regulador de la Comuna. En el caso de las amenaza por fallas geológicas activas y megadeslizamientos el análisis se limitó a un catastro actualizado del conocimiento y ubicación de fallas activas y de cicatrices de megadeslizamientos y sus depósitos, ya que están fuera del área objetivo del estudio.



Germán Alfredo Aguilar Martorell –  
Geólogo, Doctor en Ciencias Mención Geología

## I.7 Referencias bibliográficas

Aguilar, G., Cabré A., Fredes, V., Villela, B. 2020. Erosion after an extreme storm event in an arid fluvial system of the southern Atacama Desert: an assessment of magnitude, return time, and conditioning factors of debris flows, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/nhess-2019-239>.

Aguirre, L. 1960. Geología de Los Andes de Chile Central, provincia de Aconcagua. Bolentín No9. Instituto de Investigaciones Geológicas, 70p.

Calvo, B., & Savi, F. 2009. A real-world application of Monte Carlo procedure for debris flow risk assessment. *Computers & Geosciences*, 35(5), 967-977.

Campbell, D. 2005. Termocronología del sector comprendido entre los ríos Rocín y Aconcagua: Implicancias en la evolución meso-cenozoica de la zona. Memoria de Título (Inédito). Santiago de Chile, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología. 113 p.

Carter, W. y Aguirre, L., 1965. Structural Geology of Aconcagua province and its relationship to the central Valley Graben, Chile. *Geological Society of América Bulletin* 76, pp. 651 -664.

Clark MP, Nijssen B, Lundquist JD, Kavetski D, Rupp DE, Woods RA, Freer JE, Gutmann ED, Wood AW, Brekke LD, et al. 2015. A unified approach for process-based hydrologic modeling: 1. Modeling concept. *Water Resources Research* DOI: 10.1002/2015WR017198

De Scally, F.A. y Owens, I.F. 2004. Morphometric controls and geomorphic responses on fans in the Southern Alps, New Zealand. *Earth Surfer Processes and landforms*. Volume29, Issue3, Pages 311-322. <https://doi.org/10.1002/esp.1022>.

DGA. (2017). Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 417.

Dohrenwend, J., & Parsons, A. 2009. Pediments in Arid Environments. In A. Parsons, & A. Abrahams, *Geomorphology of Desert Environments*, Second Edition. London: Chapman and Hall, Springer: 377-409.

Estay, J.; Pinto, L. & Saavedra, C. 2018. «Falla Camino del Inca: un registro de ruptura superficial en la Cordillera Principal, Chile central (~32°18'S)». En: XV Congreso Geológico Chileno, 1(SINT-3), 1 p. Concepción, Chile.

Estay, J. 2019. Tectónica activa en el borde occidental de la Cordillera Principal de Chile Central (29°-36°S). Tesis de magíster. Universidad de Chile. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/170612>

Gana, P., y Wall, R. 1997. Evidencias geocronológicas Ar40/Ar39 y K/Ar de un hiatus Cretácico Superior-Eoceno en Chile Central (33°-33°30'S). *Revista geológica de Chile*, 24(2), 145-163.

Hilker, N, Badoux, A, Hegg, C 2009. The Swiss flood and landslide damage database 1972–2007. *Natural Hazards and Earth ...- nhess.copernicus.org*

Hungr, O., Evans, S., Bovis, M., Hutchinson, J. 2001. A review of the Classification of Landslides of the Flow Type. *Environmental and Engineering Geoscience*, 7(3), p.221-238.

IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (T.

F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, ... P. M. Midgley, Eds.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Iverson, R. 2014. Debris flows: behaviour and hazard assessment. *Geology Today*, vol. 30, Issue 1, p.15-20.

Jakob, M. and Bovis, M.J. 1996. Morphometric and geotechnical controls of debris flow activity, southern Coast Mountains, British Columbia, Canada. *Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl.*, 104, 13–26.

Jara, P. 2013. Tectónica mezo-cenozoica en la Cordillera Principal de Chile central entre 32° y 33°S. Análisis a partir de nuevos antecedentes de campo y modelamiento analógico. Tesis de grado para optar al grado de doctor en ciencias mención geología. Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, 331p.

Keaton, J.R., Lowe, M., 1997. Integrating engineering and geological approaches to evaluating debris-flow hazards: an opportunity from Davis County, Utah. In: Chen, C.-I. (Ed.), *Proceedings, First International Conference on Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment: Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, August 7–9, 1997*. San Francisco, CA, USAASCE, pp. 187 – 196.

Machuca, C. 2017. Estratigrafía y estructuras de la Zona de Falla Pocuro entre los 32°30' y los 33°S. Memoria de Título. Santiago de Chile, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología. 108 p.

Medina, J. 2018. Caracterización de la Falla Cariño Botado (32°30'S) y su relación al West Andean Thrust System (WATS). Memoria de Título. Santiago de Chile, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología. 63 p.

Melton, M. 1965. The Geomorphic and Paleoclimatic Significance of Alluvial Deposits in Southern Arizona. *The Journal of Geology*. Volume 73(1), 1-38.

Molina, C. 2019. Evaluación hidrometeorológica de la ocurrencia de aluviones incorporando proyecciones del cambio climático en la cuenca de los ríos el Carmen y el Tránsito, Chile. Memoria para optar al título de Ingeniera Civil, Universidad de Chile. Santiago, Chile.

Niu G-Y, Yang Z-L, Mitchell KE, Chen F, Ek MB, Barlage M, Kumar A, Manning K, Niyogi D, Rosero E, et al. 2011. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research* 116 (D12): D12109 DOI: 10.1029/2010JD015139

Oleson KW, Lawrence DM, Gordon B, Flanner MG, Kluzek E, Peter J, Levis S, Swenson SC, Thornton E, Dai A, et al. 2010. Technical Description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM). Boulder, Colorado, USA.

Ortega, C., Vargas, G., Rojas, M., Rutllant, J. A., Muñoz, P., Lange, C. B., ... Ortlieb, L. (2019). Extreme ENSO-driven torrential rainfalls at the southern edge of the Atacama Desert during the Late Holocene and their projection into the 21th century. *Global and Planetary Change*, 175(September 2018), 226–237. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.02.011>

Rivano, S.; Sepúlveda, P.; Boric, R. & Espiñeira, D. 1993. Mapa Geológico de las Hojas Quillota y Portillo (escala 1:250 000). Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile: N° 73. Santiago. 1 p.

- Rivano, S. 1996. Hojas Quillota y Portillo, Región de Valparaíso (1:250 000). Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile: N° 73 (Informe Inédito). Santiago. 232 p.
- Sernageomin, 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión 1.0, 2003). Santiago.
- Troncoso, M. 2014. Evidencia geomorfológica de neotectónica en el borde oriental de la depresión de Los Andes - San Felipe, Provincia de Los Andes, Región de Valparaíso. Tesis de Magíster en Ciencias, mención Geología. Santiago de Chile, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología. 107 p.
- Vargas, G.; Klinger, Y.; Rockwell, T. K.; Forman, S. L.; Rebolledo, S.; Baize, S.; Lacassin, R. & Armijo, R. 2014. Probing large intraplate earthquakes at the west flank of the Andes. *Geology* 42(12), pp. 1083–1086.
- Wilcox, A.C., Escauriaza, C., Agredano, R., Mignot, E., Zuazo, V., Otarola, S., Castro, L., Gironas, J., Cienfuegos, R., and Mao, L. 2016. An integrated analysis of the March 2015 Atacama floods. *Geophys. Res. Lett.*, 43, 8035–8043, doi:10.1002/2016GL069751.
- Wilford, D., Sakals, M., Innes, J., Sidle, R., and Bergerud, W. 2004. Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides*, vol.1, Issue 1, p.61-66, 2004.