

EVALUACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN FLUVIAL PARA LA RIBERA SUR DEL RÍO LAJA, COMUNA DE ANTUCO, REGIÓN DEL BIOBÍO

Ana Monroy Rodríguez¹, César Arias Tapia² y Mauricio Villagrán Valenzuela³

RESUMEN:

Las disminuciones de caudal que han afectado al río Laja en la comuna de Antuco durante las últimas décadas, producto de la intervención de la industria hidroeléctrica y la disminución de las precipitaciones, ha permitido una mayor cantidad de terrenos a disposición de las personas para la construcción de viviendas. El objetivo de este estudio es la evaluación del riesgo de inundación fluvial y la delimitación de máximas cotas a las que puede llegar el cauce en un evento de máximas precipitaciones, y así permitir una planificación territorial que se adapte a las condiciones fluviales estimadas mediante un modelamiento de inundación. Se aplican métodos para evaluar el peligro de las localidades que bordean al río en la comuna, relacionados a aspectos históricos, geológico-geomorfológicos e hidráulicos y se calcula y modela el riesgo de inundación para la zona urbana de Antuco. La zona que presenta mayor inundación corresponde a la sección del río con un cauce anastomosado, sin presentar riesgo para la zona urbana de Antuco. Las medidas propuestas consisten en mantener el límite de la urbanización al sur del canal Pinochet considerando una mantención para el canal y una contención en el lado sur donde colinda con las viviendas.

PALABRAS CLAVES: Riesgo de inundación fluvial; Peligro de inundación fluvial; Río Laja.

ABSTRACT:

The decreases in flow that have affected the Laja river in the Antuco commune during the last decades, as a result of the intervention of the hydroelectric industry and the decrease in rainfall, have allowed a greater amount of land available to people for the construction of houses. The objective of this study is the evaluation of the risk of fluvial flooding and the delimitation of the water level that the channel can reach in an event of maximum rainfall, and thus allow a territorial planning that adapts to the fluvial conditions estimated through modeling. of flood. Methods are applied to evaluate the danger of the settlements that border the river in the commune, related to historical, geological-geomorphological and hydraulic aspects, and the flood risk for the urban area of Antuco is calculated and modeled. The area with the highest flooding corresponds to the section of the river with an anastomosed channel, without presenting a risk to the urban area of Antuco. The proposed measures consist of maintaining the limit of the urbanization to the south of the Pinochet canal, considering maintenance for the canal and a containment on the south side where it adjoins the houses.

KEYWORDS: River flood risk; Danger of river flooding; Laja river.

¹Estudiante, Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, amonroy@ing.ucsc.cl

²Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, cesar.arias@ucsc.cl

³Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, mvillagran@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

El impacto causado por inundaciones fluviales en todo el mundo ha sido severo en las últimas décadas (Douben, 2006). Se considera el peligro natural más frecuente, que ha cobrado más vidas humanas y ha generado mayores pérdidas económicas (Douben, 2006).

Según datos obtenidos de la UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, por sus siglas en inglés) en el año 2002, de los desastres relacionados con el agua un 50% corresponde a inundaciones, por encima de hambrunas, sequías y epidemias. El número de eventos ha ido en aumento, particularmente en áreas urbanas instaladas en zonas propensas a inundaciones, situación que se da comúnmente para aprovechar condiciones geográficas favorables para el crecimiento económico, como accesibilidad y producción de alimentos (Douben, 2006).

En el caso de Chile, las inundaciones ocurren en un contexto donde las fluctuaciones de las precipitaciones se concentran en cortos periodos de tiempo, incluyendo ríos cortos y torrentosos junto a pendientes pronunciadas (Espinoza, 1990). Entre las regiones Metropolitana y la Araucanía, se concentra la mayor área de inundaciones y donde se presenta el mayor número de damnificados junto a daños a la infraestructura (Espinoza, 1990). Por este motivo, la evaluación del riesgo por inundación se ha convertido en una práctica cada vez más recurrente, debido principalmente a la planificación urbana y a la mitigación de desastres, lo que deriva en una tarea compleja por las variables involucradas y su estado evolutivo (Balica *et al.*, 2013).

Según el Plan de Desarrollo Comunal de Antuco (PLADECO, 2020), corresponde a una comuna que se formó en base al asentamiento de familias que participaron en la edificación de las hidroeléctricas pertenecientes a Endesa, ocupando las antiguas llanuras de inundación del río Laja. La geomorfología del sector consiste en un valle rodeado de cordones montañosos y atravesado por un río que ha sedimentado las zonas en depresión, permitiendo suelos llanos para la urbanización y tierras fértiles para la agricultura (PLADECO, 2020). Según las encuestas realizadas para el estudio de Muñoz y Oyarce (2011), los pobladores indican que la intervención y desvío del río Laja por parte de la industria hidroeléctrica ha generado una disminución del caudal, lo que significa una mayor cantidad de territorios a disposición de pobladores y turistas que llegan a la zona atraídos por los atractivos naturales de la comuna.

Pese a tener una baja densidad de población, existen localidades muy cercanas al cauce natural del río, como ocurre con el sector Abanico que se encuentra ubicado a una distancia menor a 25 m entre las primeras viviendas y el cauce del río (Figura 1.a), además del sector El Esfuerzo donde la urbanización se encuentra a menos de 100 m del cauce (Figura 1.b). Esta situación implica una mayor posibilidad de verse afectados por un eventual desborde del río Laja, debido que el proceso de modelación de los ríos es activo y va evolucionando a través del tiempo por procesos de erosión, transporte, acumulación de sedimentos.

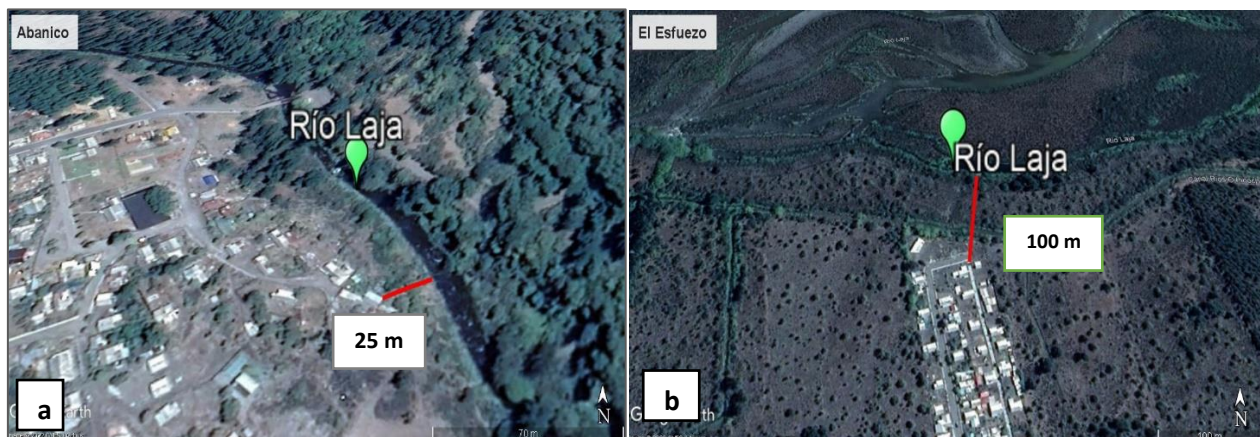


Figura 1: a. Casas ubicadas a 25 m del río Laja en la localidad de Abanico; b. Viviendas ubicadas a 100 m del río Laja en la localidad El Esfuerzo. Modificado de Google Earth.

Por este riesgo inminente de que el río aumente su caudal al nivel de recuperar sus antiguas llanuras de inundación, es necesario un estudio de inundación fluvial que permita delimitar las máximas cotas a las que puede llegar el cauce en un evento de máximas precipitaciones, y así permitir una planificación territorial que considere el riesgo de inundación y se adapte a la modelación fluvial que pueda presentar el río.

El área de estudio se emplaza en la zona alta de la cuenca del río Laja, en la comuna de Antuco, provincia del Biobío, región del Biobío. Inicia en el sector Abanico y se despliega por 38 km acercándose al límite con la comuna de Quilleco (Figura 2). Posee una población de 4.063 habitantes, donde el 50,1% corresponde a población urbana con 2.077 habitantes y un 49,9 % a población rural con 1.996 habitantes, emplazados principalmente en asentamientos lineales a lo largo de la ruta Q-45, que une la ciudad de Los Ángeles con el paso internacional Pichachén (PLADECO, 2020).

Antuco presenta condiciones físicas propias de un sector precordillerano y cordillerano, donde se pueden encontrar bosques de árboles nativos, nieve, un volcán del mismo nombre y un Parque Nacional generando atención turística en toda época del año (PLADECO, 2020).

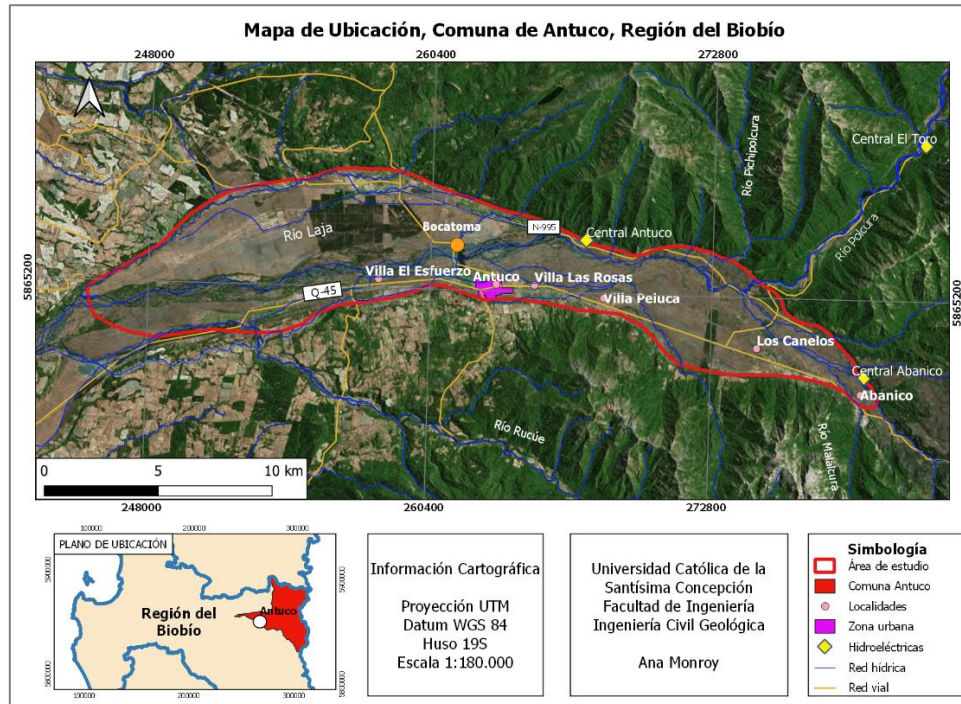


Figura 2: Área de estudio en la comuna de Antuco. Modificado de Google Satellite, 2021.

El objetivo de esta investigación es la evaluación del riesgo de inundación fluvial ante un evento de máximas precipitaciones en un tramo de 38 km en la zona alta del río Laja. Para la realización de esta evaluación es necesaria la identificación e interpretación de las formas de modelamiento fluvial en el área de estudio, para identificar las áreas de mayor riesgo ante un evento de crecidas. Una vez identificadas estas zonas susceptibles a la inundación se proponen medidas de mitigación de tipo estructural y medidas de planificación territorial para una futura urbanización, y de esta forma contribuir a la gestión del riesgo de la comuna.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Clima

La comuna de Antuco se caracteriza por presentar veranos secos e inviernos húmedos, con precipitaciones en forma de lluvia en la parte llana y nieve en los sectores montañosos durante los meses de junio a septiembre (PLADECO, 2020). Las temperaturas medias mensuales son bajas durante la mayor parte del año, en especial entre los meses de abril y noviembre (PLADECO, 2020). De acuerdo con la clasificación de Köppen, en la comuna predominan tres tipos de climas representados en la Figura 3, correspondientes a un clima templado cálido lluvioso con influencia mediterránea (Cfsb), clima templado frío lluvioso con influencia mediterránea (Cfsc) y un clima de tundra por efecto de la altura (ETH) (PLADECO, 2020).

En el caso del clima templado cálido (Cfsc) las precipitaciones disminuyen en época de verano con un promedio anual que bordean los 1.200 mm y con un promedio térmico anual de 12° C (PLADECO, 2020).

En cuanto al clima templado frío (Cfsc), se desarrolla entre la franja precordillerana y el límite de las nieves andinas (PLADECO, 2020). Las precipitaciones se distribuyen en forma homogénea durante todos los meses

del año, siendo sus promedios mensuales superiores a los 200 mm (PLADECO, 2020). En cuanto a la temperatura enero el mes más cálido con alrededor de 15°C y julio el mes más frío con una temperatura entre 1° a 2°C (PLADECO, 2020).

Por último, el clima de tundra (ETH) se desarrolla en la parte más alta de la comuna, específicamente en la cordillera Andina (PLADECO, 2020). La temperatura media del mes más cálido oscila entre 0° y 10° C, por lo que permanentemente las montañas se encuentran con una cobertura de nieve dando lugares a ventisqueros y glaciares (PLADECO, 2020). Dada estas características, las precipitaciones en esta zona de la comuna son nevosas y, en menor grado pluviosas (PLADECO, 2020).

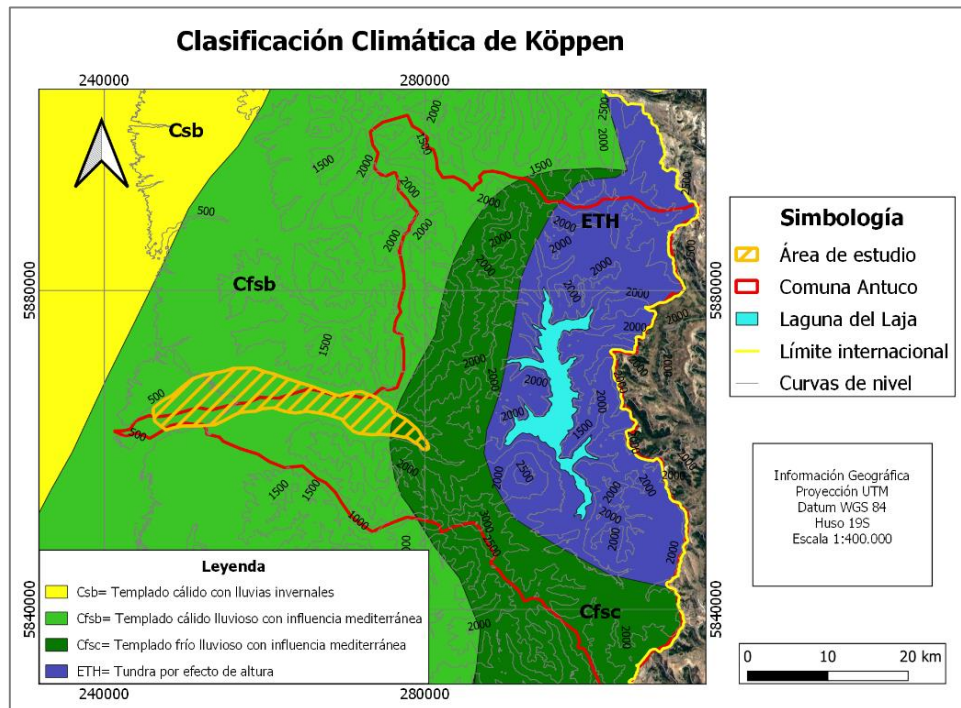


Figura 3: Clasificación climática para la comuna de Antuco. Modificado de Köppen; Instituto Geográfico Militar (IGM), 2005.

2.2. Geomorfología

Según la clasificación geomorfológica de Börgel (1983), en Antuco se identifican dos unidades geomorfológicas: la cordillera Andina de retención crionival y la precordillera (Figura 4). Por el este de la comuna se ubica el Parque Nacional Laguna del Laja, donde se encuentra la Laguna del Laja, el volcán Antuco actualmente activo (2.985 m s.n.m.) y el Sierra Velluda considerado extinto (3.585 m s.n.m.) constituyendo el inicio del Valle del Laja (PLADECO, 2020). La Laguna del Laja consiste en un embalse volcánico y su nivel promedio se encuentra a 1.360 m s.n.m. (PLADECO, 2020).

El Valle del Laja presenta un modelo de cajón ancho excavado por antigua erosión glacial, con un estrechamiento en la parte superior debido al relleno de sedimentos glaciales (morrenas), y por las enormes masas de lava y escorias producidas por los volcanes de la zona (PLADECO, 2009). Sobre las planicies del valle fluye el río Laja, con un patrón morfológico de canales múltiples en gran parte del sector separados por barras emergentes con sinuosidad media a alta siendo clasificado como anastomosado y erosionan los depósitos laterales correspondientes a las terrazas (Muñoz y Oyarce, 2011).

El volcán Antuco corresponde a un estratovolcán de composición basáltica y andesítico-basáltica (Thiele *et al.*, 1998). La primera etapa del desarrollo del volcán (Antuco 1) culminó hace aproximadamente 10.000 años, con el colapso gravitacional lateral del edificio que originó una gran avalancha volcánica producto de una actividad eruptiva freatomagmática, cuyos materiales represaron el desagüe natural del lago del Laja y de sus quebradas afluentes (Thiele *et al.*, 1998). El volcán actual (Antuco 2) se ha anidado al centro de la estructura antigua que consiste en un cono principal de lavas y escorias y algunos centros de emisión laterales (Thiele *et al.*, 1998).

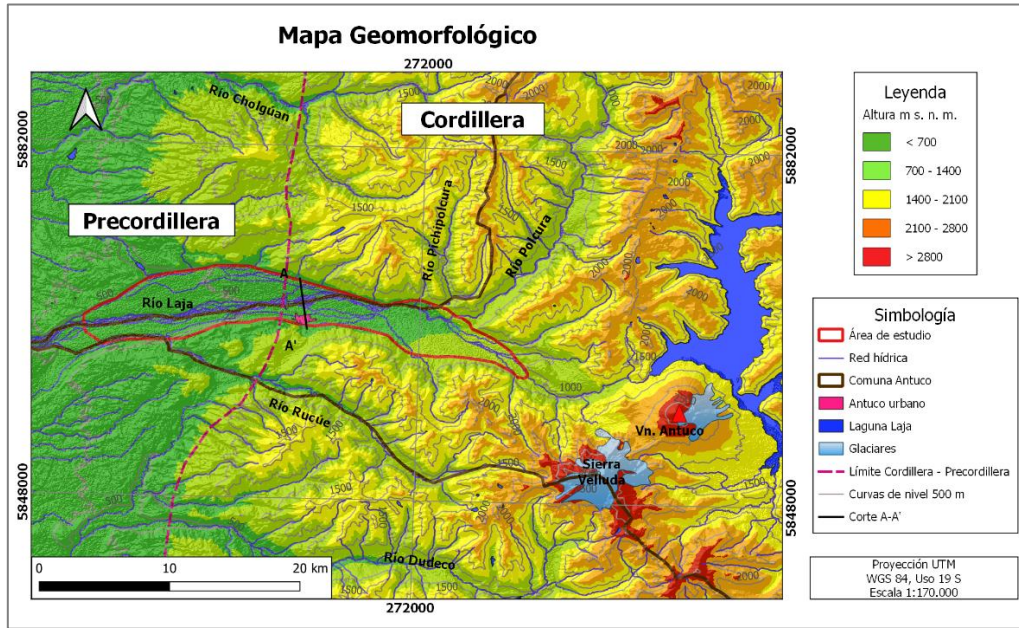


Figura 4: Geomorfología de Antuco. Modificado de Börgel, 1983.

En la Figura 4 se distinguen 2 grandes grupos de unidades geomorfológicas, la cordillera y precordillera. La precordillera presenta alturas máximas de 1.000 m s. n. m. y en la cordillera se distinguen edificios volcánicos con alturas por sobre los 2.800 m s. n. m. que mantienen los únicos glaciares de la zona. Entre cordones montañosos se observa el valle del río Laja con alturas que bordean los 500 m s. n. m. que inicia su apertura en la zona este del área de estudio cercano a la localidad de Abanico y tiene una máxima apertura de hasta 7 km entre el sector de Antuco urbano y el sector El Esfuerzo. La Figura 5 corresponde a un perfil topográfico de una sección transversal del valle en el sector de Antuco urbano.



Figura 5: Perfil topográfico de corte A-A' de una sección transversal del Valle del Laja. Sector Antuco urbano. Elaborada mediante software QGIS 3.14.

De la Figura 5 se identifica un valle en forma de caja delimitado por zonas de escarpe que corresponden a los faldeos de los cordones montañosos aledaños, con pendiente de 16° para el lado NW y de 21° para el lado SE. En el centro se encuentra la planicie del valle junto a 4 terrazas fluviales ubicadas a los costados del río. Las terrazas T2 y T3 son más recientes ubicadas a 10 m aproximadamente del cauce principal mientras que la terraza T1 se ubica a 15 m. El poblado de Antuco urbano se ubica sobre la terraza T4 de mayor altura que corresponde a 30 m con respecto al río.

2.3. Geología

La historia geológica del Cuaternario en el tramo superior del valle del río Laja corresponde a una compleja interrelación entre volcanismo, procesos de remoción en masa y sedimentarios aluvio-fluviales (Thiele *et al.*, 1998). El valle fue modelado inicialmente por la acción glacial del Pleistoceno Inferior en rocas de las formaciones Cura Mallín y Trapa Trapa, del Eoceno al Mioceno, que a su vez fueron intruidas durante el Mioceno por rocas plutónicas, sobre las cuales se disponen en discordancia cuatro grandes unidades

cuaternarias; el cono poligénico de Quilleco, una secuencia de rocas volcánicas pleistocenas como la formación Cola de Zorro, el volcán Antuco y depósitos de avalancha volcánica de Antuco (Thiele *et al.*, 1998). También se reconocen otras unidades menores conformadas por materiales detríticos y volcanoclásticos no consolidados, que revelan la ocurrencia de importantes procesos volcánicos y fluviales postglaciares (Thiele *et al.*, 1998).

El esquema tectónico presenta pliegues relativamente amplios que afectan a las formaciones Cura Mallín y Trapa Trapa, las más antiguas del área (Niemeyer y Muñoz, 1983). Estas estructuras plegadas están acompañadas en algunos lugares por fallas inversas de gran ángulo con desplazamiento moderado (Niemeyer y Muñoz, 1983). Ambos tipos de estructuras alcanzan su mayor intensidad en el sector central y sobre ellas se superponen, sucesivamente, una discordancia angular y dos sistemas principales de fallas normales (Niemeyer y Muñoz, 1983).

La Figura 6 presenta la interacción de unidades litológicas y estructuras geológicas asociadas al área de estudio, basado principalmente en la propuesta de la Hoja Laguna de La Laja (Niemeyer y Muñoz, 1983) y la Hoja Los Ángeles-Angol (Ferraris, 1981). Este mapa geológico es un fragmento de la digitalización de la cuenca Biobío realizada por la empresa asesora Aquaterra Ingenieros Ltda. (2011), dándoles continuidad a las litologías de las hojas mencionadas anteriormente.

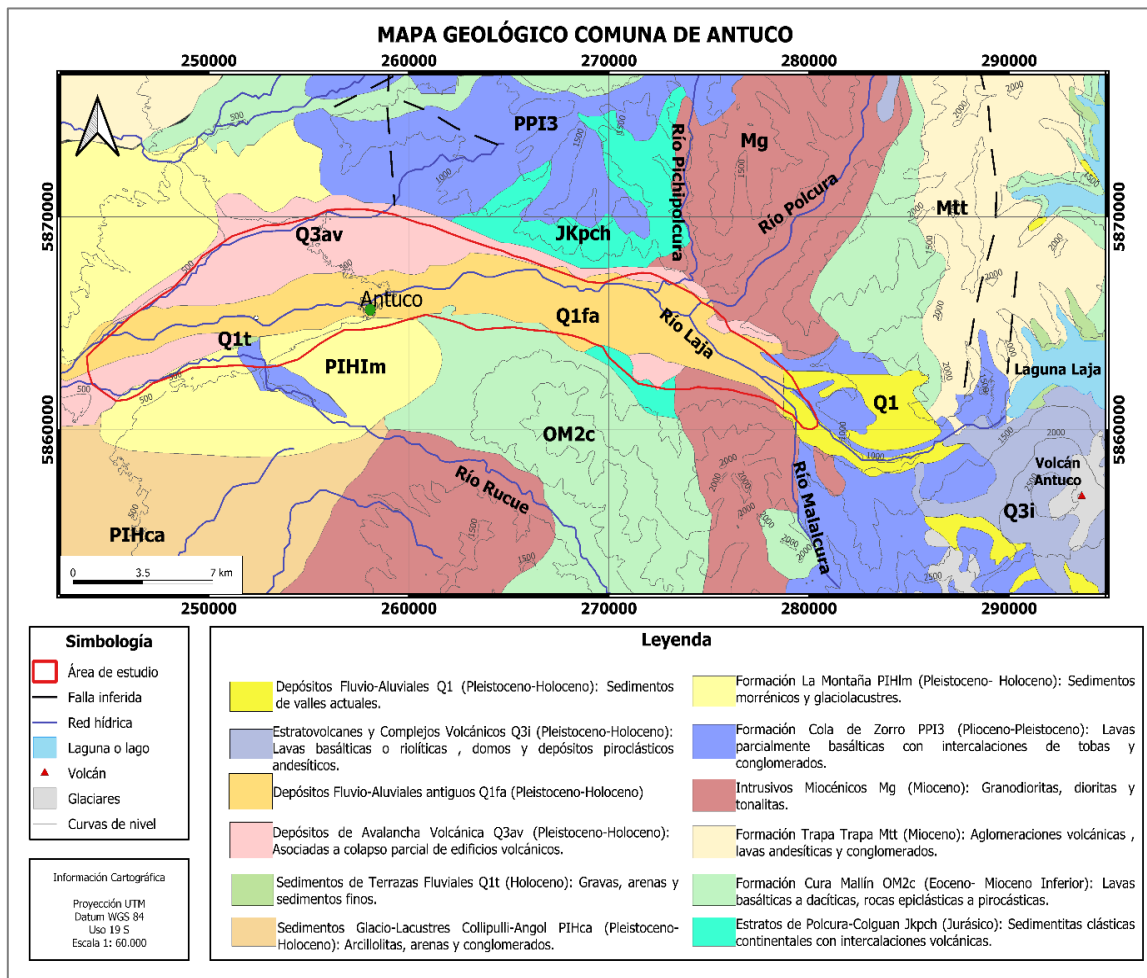


Figura 6: Geología de la subcuenca Laja Alto. Modificado de Niemeyer y Muñoz, 1983; Ferraris, 1981; Aquaterra Ingenieros Ltda., 2011.

2.4. Hidrología e hidráulica

2.4.1. Caracterización hidrológica

La cuenca del río Laja se encuentra ubicada en el centro y centro-oriente de la región del Biobío, siendo el río Laja el principal afluente de la cuenca del río Biobío (Hídrica Consultores SpA, 2018). Posee una superficie total de 4.667 km² y se encuentra dividida en 2 subcuencas, Río Laja Alto (nace en la laguna Laja

hasta la unión con el río Rucúe) y Río Laja Bajo (hasta su confluencia con el río Biobío) (Hídrica Consultores SpA, 2018). Para motivo de este estudio se considera la primera subcuenca mencionada.

Río Laja Alto corresponde a la subcuenca en el primer tramo del río Laja (Figura 7), asociada con el río Polcura, Rucúe y Manco. Tiene una superficie de 2.749 km² y fluye en dirección poniente desde su nacimiento a los pies de la Laguna del Laja en el manantial “Salto Las Chilcas” (Hídrica Consultores SpA, 2018). La Laguna del Laja es la entidad hidrológica representativa de este tramo, con una superficie de 80,5 km² siendo considerada como embalse, con una capacidad de 5.582 Mm³ (Hídrica Consultores SpA, 2018).

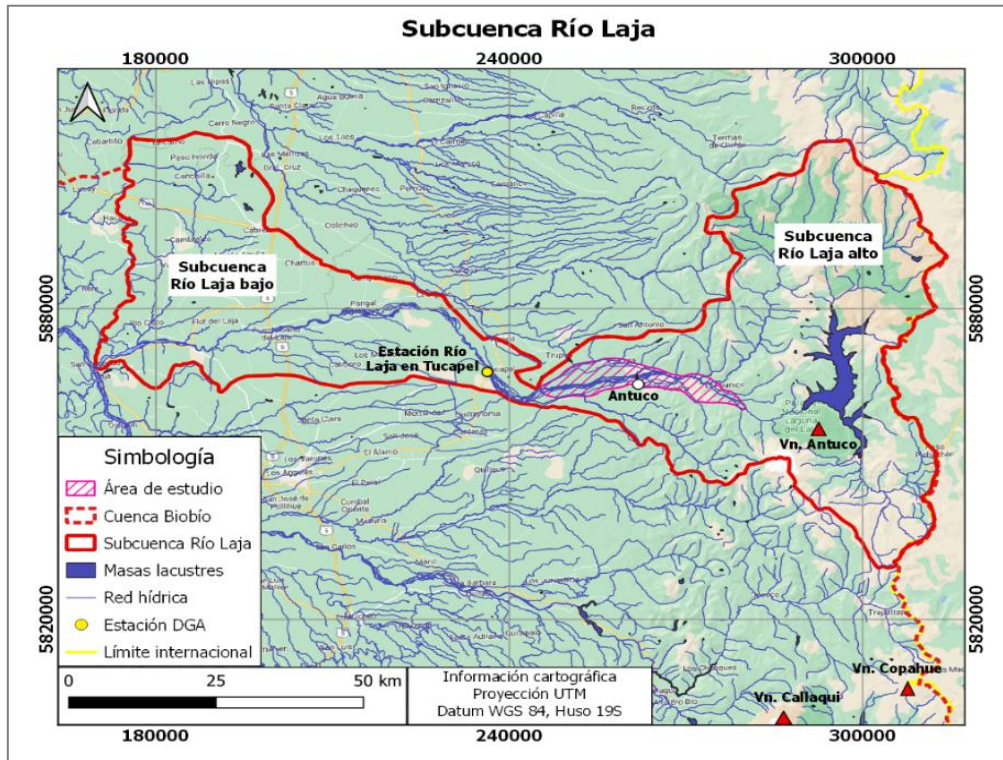


Figura 7: Subcuenca Río Laja. Modificado de Hídrica Consultores SpA, 2018.

La estación Río Laja en Tucapel (0838001-1) donde se obtuvieron los datos para la sectorización hidrológica realizado por Hídrica Consultores SpA (2018) se encuentra al término de la Subcuenca Río Laja Alto como indica la Figura 7. Se considerada representativa por estar ubicada en el cauce principal y por su serie de registros (Hídrica Consultores SpA, 2018). Para la caracterización pluviométrica, se estimó la precipitación media para distintos periodos de retorno como indica la Figura 8.

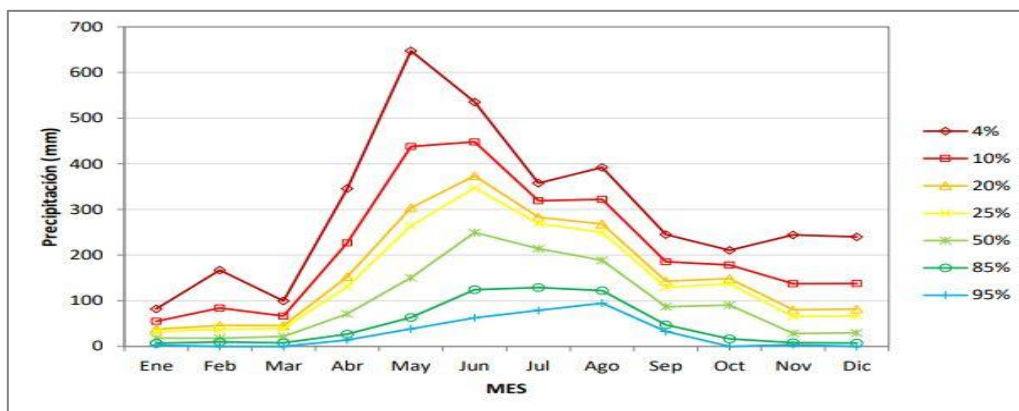


Figura 8: Curvas de Variación Estacional: Precipitación– Estación Río Laja en Tucapel (0838001-1). Obtenido de Hídrica Consultores SpA, 2018.

La serie de curvas de variación estacional presentadas en la Figura 8, muestran una concentración de las lluvias de mayor importancia entre los meses de mayo y agosto, coincidente en gran parte con el periodo

otoñal e invernal (Hídrica Consultores SpA, 2018). Se observa que la precipitación con una probabilidad de excedencia del 50% corresponde a valores alrededor de 1.300 mm/año por la proximidad a la precordillera (Hídrica Consultores SpA, 2018). El valor promedio de precipitación en la zona, obtenida a partir de la generación de isoyetas, es de 1.064 mm/año (Hídrica Consultores SpA, 2018). De acuerdo con esto, se ha estimado que la recarga al sistema acuífero del SHAC (Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común) del río Laja por precipitaciones corresponde a una variable de importancia en el sistema (Hídrica Consultores SpA, 2018).

Para la caracterización fluviométrica, se miden datos de caudales medios mensuales obtenidos de la estación Río Laja en Tucapel (0838001-1) para probabilidades de excedencia de 20%, 4% 2% y 1%, dando los resultados expuestos en la Figura 9.

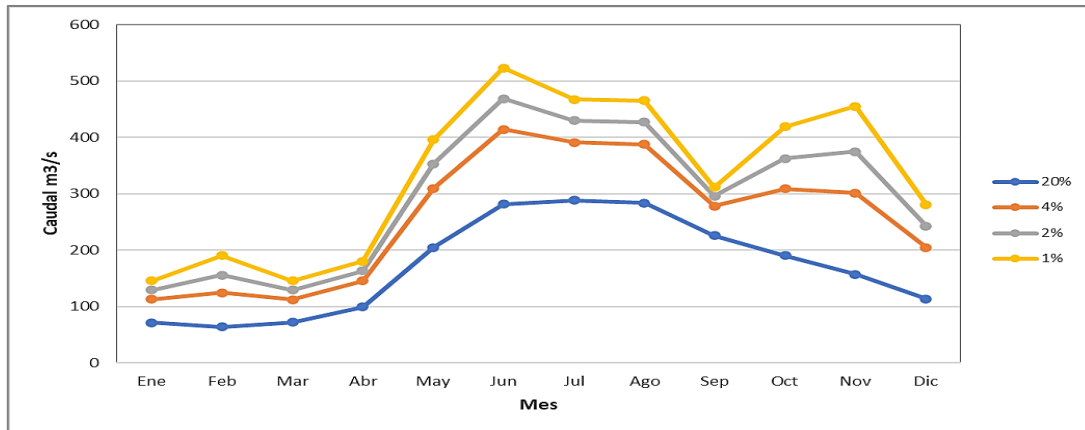


Figura 9: Curvas de Variación Estacional: Caudal– Estación Río Laja en Tucapel (0838001-1).
Elaboración propia.

De la Figura 9 se identifica una concentración de caudal entre los meses de mayo y agosto con un valor máximo en junio influenciado por las precipitaciones de la temporada otoño-invierno, y una segunda concentración en la temporada de primavera producto del deshielo a causa del aumento de la temperatura. El caudal producido en invierno por las precipitaciones es mayor al caudal producido por el deshielo durante la temporada de primavera, definiendo al río como pluvio-nival y de régimen estacionario según la clasificación de regímenes de caudales de Riffo (2017).

2.4.2. Caudal instantáneo máximo

Para la estimación de caudales máximos se propone el método DGA-AC del “Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica” de la Dirección General de Aguas (DGA, 1995), producto que las estaciones fluviométricas del área de estudio no se ubican sobre el río principal, sino en los canales de desvío o de descarga de las centrales hidroeléctricas. Además, algunas tienen datos acotados al estar operativas desde el año 2020.

Este método es válido para cuencas pluviales o pluvionivales entre las regiones de Atacama y la Araucanía sin información fluviométrica y con áreas comprendidas entre 20 y 10.000 km². Su uso se encuentra restringido a períodos de retorno inferiores a 100 años (DGA, 1995).

El método DGA-AC, corresponde a un análisis regional de crecidas de origen pluvial, basado en series de máximos anuales generadas a partir de la información de caudales medios diarios máximos e instantáneos máximos del período pluvial, de 234 estaciones de control fluviométrico (DGA, 1995). El procedimiento consiste en definir la zona homogénea a la que pertenece la cuenca en estudio, luego se determina la curva de frecuencias regional y se adimensiona a través del caudal medio diario máximo de periodo de retorno de 10 años (Q₁₀) (DGA, 1995). El caudal medio diario máximo (Q₁₀) válido desde la región del Maule hasta la Araucanía, se determina con la siguiente ecuación:

$$Q_{10} = 2 * 10^{-3} * Ap^{0,973} * (P_{24}^{10})^{1,224} \quad (1)$$

Donde, **Q₁₀**: Caudal medio diario máximo para periodo de retorno de 10 años (m³/s)

Ap: Área pluvial de la cuenca, expresada en km².

P: Precipitación diaria máxima de período de retorno 10 años (mm).

Finalmente, dicha curva se convierte a caudales instantáneos máximos a través de la determinación de un factor de conversión apropiado para la región (DGA, 1995).

Para el área aportante pluvial es necesario definir la ubicación de la línea de nieves, que se entiende como la cota promedio durante eventos de tormentas donde se produce la interfase lluvia-nieve (DGA, 1995). Para obtener la línea de nieves de la zona de estudio se utiliza el método de Escobar y Vidal (1992), que comprende áreas entre 35° y 39° de latitud sur.

La precipitación diaria máxima de período de retorno 10 años se obtiene en base a los planos de isoyetas del estudio "Precipitaciones Máximas en 1, 2 y 3 días de escala 1:500.000 de la DGA (1991).

2.4.3. Estimación del coeficiente n de Manning para caudales abiertos

El coeficiente n de Manning se define como la cantidad de resistencia al movimiento del agua en cauces naturales o artificiales, siendo muy variable porque depende de una serie factores como la vegetación, irregularidad, obstrucciones, nivel, caudal, régimen de circulación, entre otros (Fernández de Córdova *et al.*, 2018). Para este estudio se utiliza el método de Cowan (1956) en la sección del río mojada. Este procedimiento consiste en estimar el valor de n en función de algunos parámetros característicos del cauce, aplicando la siguiente fórmula:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5 \quad (2)$$

La Tabla 1 indica los valores a considerar, donde n₀ es un valor básico para un canal recto, uniforme y liso, n₁ es un valor de corrección de las rugosidades superficiales, n₂ es un valor para considerar las variaciones en forma y tamaño de la sección transversal del canal, n₃ considera las obstrucciones, n₄ considera la vegetación y condiciones de flujo, y m₅ es un factor de corrección de los efectos por meandros en el canal (Chow, 1959).

Tabla 1: Valoración de n para obtener el coeficiente de Manning (Cowan, 1956).

Condiciones del canal		Valor	
Material del perímetro	Tierra	n₀	0,02
	Roca cortada		0,025
	Grava fina		0,024
	Grava gruesa		0,028
Grado de irregularidad	Suave	n₁	0
	Menor		0,005
	Moderada		0,01
	Severa		0,02
Variación de la sección transversal	Gradual	n₂	0
	Ocasional		0,005
	Frecuente		0,01 a 0,015
Efecto de las obstrucciones	Despreciable	n₃	0
	Menor		0,01 a 0,015
	Apreciable		0,02 a 0,03
	Severo		0,04 a 0,06
Vegetación	Baja	n₄	0,005 a 0,01
	Mediana		0,01 a 0,025
	Alta		0,025 a 0,05
	Muy alta		0,05 a 0,1
Curvaturas en planta	Menores	m₅	1
	Apreciables		1,15
	Severas		1,3

Para las llanuras de inundación se utilizan los valores de la Tabla 2, propuesta para distintos tipos de canales por Horton (1916).

Tabla 2: Valoración de n para obtener el coeficiente de Manning en planicies de inundación (Horton, 1916).

Planicies de inundación	Mínimo	Normal	Máximo
Pastizales sin matorrales			
Pasto corto	0,025	0,03	0,035
Pasto Alto	0,03	0,035	0,05
Áreas cultivadas			
Sin cultivo	0,02	0,03	0,04
Cultivos en línea maduros	0,025	0,035	0,045
Campos cultivos maduros	0,03	0,04	0,05
Matorrales			
Matorrales dispersos, mucha maleza	0,035	0,05	0,07
Pocos matorrales y árboles, en invierno	0,035	0,05	0,06
Pocos matorrales y árboles, en verano	0,04	0,06	0,08
Matorrales medios a densos, en invierno	0,045	0,07	0,11
Matorrales medios a densos, en verano	0,07	0,1	0,16
Árboles			
Sauces densos, rectos y en verano	0,11	0,15	0,2
Terreno limpio, con troncos sin retoños	0,03	0,04	0,05
Igual que el anterior, pero con una gran cantidad de retoños	0,05	0,06	0,08
Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel del agua por debajo de las ramas	0,08	0,1	0,12
Igual que el anterior, pero con nivel de creciente por encima de las ramas	0,1	0,12	0,16

2.5. Inundaciones

Según la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI, 2020), una inundación fluvial corresponde a un rápido ascenso del nivel del agua, generando caudales inusuales que cubren o llenan superficies de terreno que normalmente son secas. La principal causa de las inundaciones son las precipitaciones intensas en un corto período de tiempo, donde se supera la capacidad de absorción del suelo y comienza a subir el nivel de los ríos (ONEMI, 2020).

Este proceso de inundación genera un peligro cuando las personas ocupan zonas inundables, transformando el fenómeno en una amenaza para los asentamientos humanos (Keller y Blodgett, 2007), que al materializarse produce catástrofes o desastres iniciándose el conflicto entre los sistemas natural y social (Rojas y Martínez, 2011). Según el Plan Regulador Comunal (PRC, 2014), para el caso de la comuna de Antuco, los sectores con riesgo de inundación más recurrentes en el tiempo han sido los terrenos usados por las personas, localizados en las llanuras de inundación o cercanos al cauce de los ríos y esteros, los cuales, ante eventos de intensas lluvias, aumentan su caudal y desbordan hacia los sectores poblados.

2.6. Riesgo de inundación

El riesgo como concepto general se define como la probabilidad de que en un espacio ocurra un peligro determinado de origen natural, y que pueda generar potenciales daños y pérdidas en las actividades humanas, por ende, el riesgo sólo puede ser definido a partir del cálculo de probabilidades con datos adecuados, teniendo en cuenta la integración de sus factores según el modelo de análisis con el que se trabaja (Rojas y Martínez, 2011). Según Ayala y Olcina (2002), los factores de riesgo son aquellos que deben darse necesariamente para que exista un daño esperable, considerando tres conceptos claves: peligrosidad, exposición y vulnerabilidad.

2.6.1. Peligro de inundación

Peligro o amenaza se entiende la posibilidad de ocurrencia de un acontecimiento natural o antrópico que afecte la vida de los seres humanos (Rojas y Martínez, 2011). De acuerdo al planteamiento de Díez *et al.* (2008), propone evaluar el peligro de inundación a través de la combinación y el complemento de tres métodos que son los siguientes: método histórico-paleohidrológico, método geológico-geomorfológico, y método hidrológico-hidráulico.

- **Método histórico - paleohidrológico**

Este método emplea marcas de inundación sobre edificaciones o depósitos además de documentación histórica y testimonios, para reconstruir la extensión cubierta o la cota alcanzada por las aguas durante una crecida desencadenada en el periodo histórico (Díez *et al.*, 2008). Una aplicación simple de este método consiste en suponer que si el agua alguna vez ha alcanzado ciertos niveles puede alcanzarlos también en un futuro no muy lejano (Díez *et al.*, 2008).

- **Método geológico - geomorfológico**

Se enfoca en el modelado del terreno y los depósitos generados durante o tras el evento de crecida (Díez *et al.*, 2008). Con ello se pueden delimitar las áreas geomorfológicamente activas dentro del cauce fluvial y sus márgenes, y por tanto susceptibles de ser inundadas en el marco de la dinámica natural de la corriente fluvial y su frecuencia cualitativa de inundación (Díez *et al.*, 2008).

- **Método hidrológico - hidráulico**

A través de este método se busca la estimación de los caudales generados en una cuenca o corriente y el cálculo de las velocidades y calados con los que circularán por un determinado tramo fluvial aplicando análisis estadístico de los valores máximos o de los datos de precipitación, mediante modelos hidrometeorológicos de transformación precipitación-escorrentía basados en fórmulas y métodos (Díez *et al.*, 2008). Los métodos hidráulicos parten de diferentes hipótesis, simplificaciones o aproximaciones al flujo del agua en la naturaleza que simplifican las ecuaciones físicas que lo modelizan, cuya resolución permite estimar diferentes parámetros (profundidad, velocidad, energía) (Díez *et al.*, 2008).

Para clasificar el peligro de inundación se utiliza el método planteado por Ramsbottom *et al.* (2006) (Fase 2 del informe “Riesgo de Inundación para Personas” del DEFRA). Para su cuantificación, propone una combinación entre profundidad, velocidad del flujo y la presencia de escombros, expresadas en la siguiente ecuación:

$$HR = d * (v + 0,5) + DF \quad (3)$$

Donde, **HR** = Clasificación de Peligro

d = Profundidad (m)

v = Velocidad del agua de inundación (m/s)

DF = Factor de desechos (obtenido de la Tabla 3)

Tabla 3: Orientación sobre factores de detritos para diferentes profundidades, velocidades y usos de la tierra (Ramsbottom *et al.*, 2006).

Profundidad (m)	Pasto/Cultivable	Bosque	Urbano
0 a 0,25	0	0	0
0,25 a 0,75	0	0,5	1
d > 0,75m y/o v > 2 m/s	0,5	1	1

La siguiente tabla clasifica el peligro según la clase a la que pertenece de acuerdo a los valores obtenidos de la Ecuación 3.

Tabla 4: Clasificación del peligro de inundación (Ramsbottom *et al.*, 2006).

$d*(v+0.5) + DF$	desde	hasta	Categoría de peligro
Clase 1	0,75	1,5	Peligroso para algunos
Clase 2	1,5	2,5	Peligroso para la mayoría
Clase 3	2,5	20	Peligroso para todos

Para la generación del mapa de peligro de inundación se utiliza la siguiente tabla de clasificación, en función de la profundidad y velocidad del agua.

Tabla 5: Clasificación del peligro en función de la profundidad y velocidad (Ramsbottom *et al.*, 2006)

$d * (v + 0,5)$	Grado de peligro de inundación	Descripción
<0,75	Leve	“Zona de inundación con flujo de agua poco profunda o agua estancada profunda”
0,75 – 1,25	Moderado	Peligroso para algunos (por ejemplo, niños). “Peligro: Zona de inundación con agua profunda o que fluye rápido”
1,25 – 2,5	Significativo	Peligroso para la mayoría de la gente. “Peligro: Zona de inundación con aguas profundas de flujos rápidos”
>2,5	Extremo	Peligroso para todos. “Peligro extremo: Zona de inundación con aguas profundas y de flujos rápidos”.

2.6.2. Exposición

El concepto de exposición describe las características de una zona de la llanura aluvial que afecta la posibilidad de estar expuesta al peligro de inundación (Ramsbottom *et al.*, 2006). Las personas son más vulnerables en áreas de edificios bajos de una sola planta, campamentos y áreas abiertas de llanuras aluviales que en áreas de edificios de dos plantas o de gran altura que pueden proporcionar un refugio seguro por encima del nivel máximo de inundación (Ramsbottom *et al.*, 2006). Las clasificaciones se obtienen de la Tabla 6.

Tabla 6: Clasificación de exposición (Ramsbottom *et al.*, 2006).

Parámetro	Área de baja exposición (1 Pto)	Área de exposición media (2 Pto)	Área de alta exposición (3 Pto)
Velocidad de inicio	El inicio de la inundación es gradual (muchas horas)	El inicio de la inundación es gradual (cercano a una hora)	Inundaciones rápidas
Naturaleza del área	Apartamento de varias plantas	Zona residencial típica (vivienda de dos plantas), propiedades comerciales y comerciales	Cabañas, casas rodantes, caminos transitados, parques, escuelas, etc.
Alerta de inundación	Operativo y asociado a planes de emergencia	Operatividad limitada o no testeada	No existente

2.6.3. Vulnerabilidad

El concepto de vulnerabilidad refiere a las características de las personas afectadas por las inundaciones y su capacidad de respuesta para garantizar su propia seguridad y la de sus pertenencias durante una inundación (Ramsbottom *et al.*, 2006).

$$Y = N^{\circ} \text{ personas con capacidad disminuida} + N^{\circ} \text{ personas} > 65 \text{ años} \quad (4)$$

2.6.4. Mitigación

La mitigación se define como los procedimientos adoptados por la población con el objeto de minimizar los efectos de un evento natural extremo (Larraín y Simpson, 1994). Según la Organización de Estados Americanos (OEA, 1993) estos procedimientos se agrupan bajo dos puntos de vista: medidas estructurales y no estructurales.

- Medidas estructurales: Generalmente se encuentran asociadas a construcciones civiles desarrolladas por ingenieros, así como diques, revestimientos, etc.
- Medidas no estructurales: Se materializan en normas de conducta como planes de uso de suelo, capacitaciones a trabajadores, educación de la comunidad para reducir la vulnerabilidad educativa y cultural.

3. METODOLOGÍA

La metodología aplicada para la elaboración de este informe se basa en tres etapas presentadas a continuación:

3.1. Investigación bibliográfica y recopilación de antecedentes históricos

Se realiza una revisión bibliográfica considerando aspectos climáticos, hidrológicos y urbanísticos de la zona obtenidos de PLADECO (2020) e informes de consultoras hidrológicas. Para la identificación y delimitación de litologías se analiza la carta geológica Hoja de la Laguna de la Laja (1:250.000) en conjunto con la Hoja Los Ángeles- Angol (1:250.000).

3.2. Trabajo de terreno

Se realiza una salida a terreno de un día, con el objetivo de visitar las zonas con mayor densidad poblacional. En los puntos de interés se recolecta información sobre los tipos de depósitos que puedan apreciarse en la superficie y se identifican características físicas del río. Esta información complementa a la obtenida de las cartas geológicas, para identificar antiguos recorridos a través de vestigios propios del río.

3.3. Aplicación de software y método multicriterio

Para la evaluación del peligro se emplean y complementan los métodos propuestos por Díez *et al.* (2008) que corresponden a los métodos histórico-paleohidrológico, geológico-geomorfológico e hidrológico-hidráulico.

Para el evaluar el método histórico-paleohidrológico se analiza información existente a través de documentos municipales.

El método geológico-geomorfológico se analiza a través de las cartas geológicas de la zona y se complementa con la información recolectada en terreno.

Para el método hidrológico-hidráulico se realiza un modelo hidráulico unidimensional para los periodos de retorno de 5, 25, 50 y 100 años mediante el software de análisis hidráulico HEC-RAS 5.0.7, desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos, que a partir de datos de terreno, caudales y características del cauce permite simular el comportamiento hidráulico del río para determinar los niveles de agua máximas en un evento de crecida. Para la clasificación del peligro se aplica la fórmula de peligro de Ramsbottom *et al.* (2006) a la modelación hidráulica.

Para la valoración del riesgo se aplica el método múltiples criterios desarrollado por Saaty (1980) considerando los conceptos de peligro, exposición y vulnerabilidad evaluados a través del método de Ramsbottom *et al.* (2006) Para la obtención de datos del peligro se consideran los valores entregados por HEC-RAS, y para los conceptos de exposición y vulnerabilidad se obtienen datos de PLADECO (2020). Una vez generada esta información y según sea el caso, se proponen medidas de mitigación tipo estructural para las zonas pobladas susceptibles a la inundación y medidas de planificación territorial.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evaluación del peligro

4.1.1. Método histórico - paleohidrológico

Pocos años de historia acompañan a la comuna de Antuco por su reciente fundación en el año 1979, lo que implica escasos datos de antecedentes históricos para el análisis de grandes inundaciones. La información que entrega PLADECO (2020) se relaciona a posibles inundaciones en el escenario de lluvias intensas en periodos prolongados de más de 24 horas, afectando principalmente a localidades de Antuco urbano, Calleuque, Mirrihue Bajo, Las Rosas y Villa Peluca, por su cercanía a cauces de agua como el canal de regadío Pinochet.

Por otro lado, en el Plan Comunal de Emergencia (PCE, 2017) es posible encontrar información con respecto a inundaciones que involucra las rutas que atraviesan el cauce de los ríos, cuya falta de tratamiento deriva en un aporte continuo de sedimentos que se asientan en el lecho fluvial. También menciona la disminución de la capacidad de infiltración del lecho del río producto de la sedimentación, donde sube su nivel de base y disminuye la capacidad carga y transporte, situación que se presenta principalmente en el curso superior del río Laja, con probable influencia del manejo que tienen las aguas en la represa.

La Figura 10 corresponde al canal de regadío Pinochet y se observa la cercanía que mantiene con el patio de las viviendas, y se deduce un mal mantenimiento por la erosión que presenta en sus márgenes hacia los poblados.



Figura 10: Canal de regadío Pinochet, sector Antuco urbano, 10 de agosto de 2022
Elaboración propia.

4.1.2. Método geológico - geomorfológico

Por el tipo de geomorfología del sector, que corresponde a un amplio valle de modelado glaciar entre cordones montañosos y una alta pendiente al ubicarse entre la cordillera y precordillera, permite un escenario para que se desarrolle un tipo de río anastomosado en gran parte del área de estudio, situación que fue en aumento después de la construcción de la bocatoma ubicada al frente de la localidad de Antuco urbano, debido a la pérdida de energía del agua y el aumento de la depositación. Esta situación fue corroborada por la comunidad del sector, donde indican en el estudio de Muñoz y Oyarce (2011) que posterior a la puesta en marcha de la bocatoma en el año 1998, se produjo un cambio del tipo de suelo en las riberas del río, pasando de terrenos fértiles utilizados en la agricultura menor a convertirse en superficies de arena y grava, lo que terminó con la plantación de chacras y el forraje para animales, actividades realizadas históricamente en el lugar.

Como se puede observar en la Figura 11, en el año 1985 el río Laja ya presentaba un tipo de canal anastomosado (previo a la bocatoma), y en la imagen del año 2007 posterior a la construcción de la obra hidráulica se produce un aumento en la cantidad de canales y se amplía la extensión de las curvaturas hacia el sector de mayor urbanización, pudiendo generar un aumento de peligro de inundación frente a un evento de crecidas.



Figura 11: Modelado del río Laja durante el año 1985 y 2007. Modificado de Google Earth.

Durante el levantamiento de información en terreno, se visitaron diversos puntos de la comuna propuestos en la Figura 12 para la obtención de información del estado de los depósitos fluviales y de su topografía, y así complementar la información entregada por el mapa geológico e identificar si existen vestigios de que el río ha recorrido estos terrenos en un tiempo remoto. Los sitios se ubican en las localidades de Abanico, Los Canelos, Antuco urbano junto al sector del cementerio y Villa el Esfuerzo.

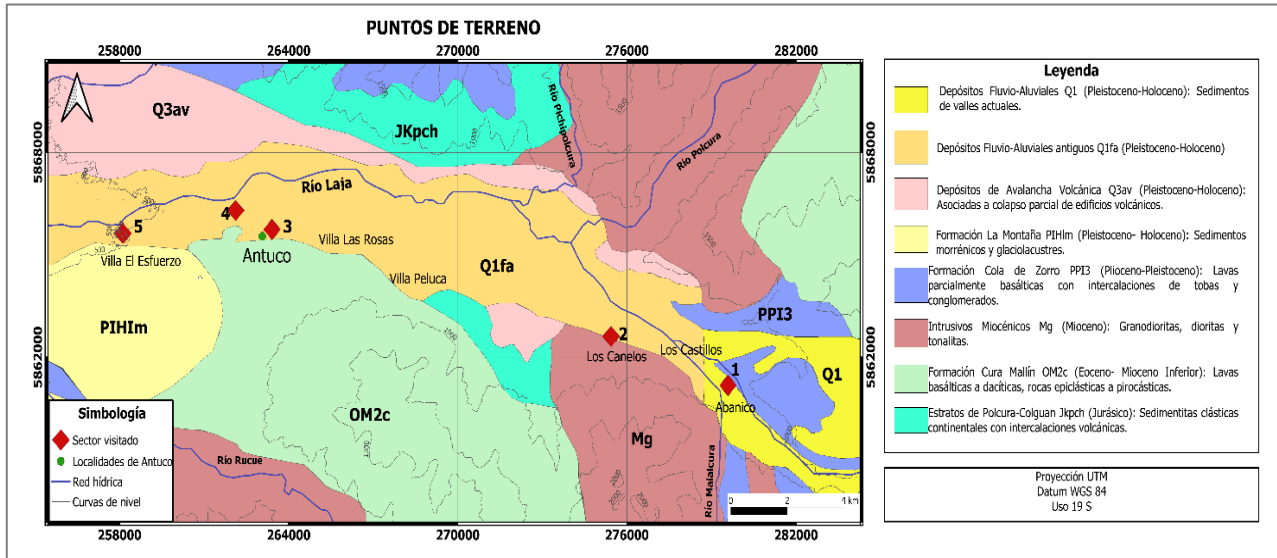


Figura 12: Mapa geológico del área de estudio, con indicación de puntos visitados en terreno. Modificado de Niemeyer y Muñoz, 1983; Ferraris, 1981; Aquaterra Ingenieros Ltda., 2011.

- **Sector 1: Sector Abanico**

Abanico es la segunda localidad con mayor población de la comuna de Antuco con 236 habitantes (PLADECO, 2020) y la más cercana al río Laja a 25 m de las primeras viviendas. Como se observa en la Figura 12, se ubica sobre los sedimentos fluviales actuales.

En esta sección del río se puede apreciar encauzamiento en un solo canal y con curvaturas menores, producto de la ubicación al inicio del ensanchamiento del valle donde se observan pendientes pronunciadas en los escarpes de la zona norte dando inicio a los cordones montañosos y limita directamente con la terraza T1 hacia la zona sur, sin presencia de llanuras de inundación que le permita expandirse en el territorio.

Como indica la Figura 13, la urbanización se ubica sobre las terrazas. Inicia sobre la terraza más reciente T1 a una altura cercana a los 5 m con respecto al río y el resto de la población se encuentra sobre la terraza más antigua ubicada a una altura superior a los 10 m con respecto al río.

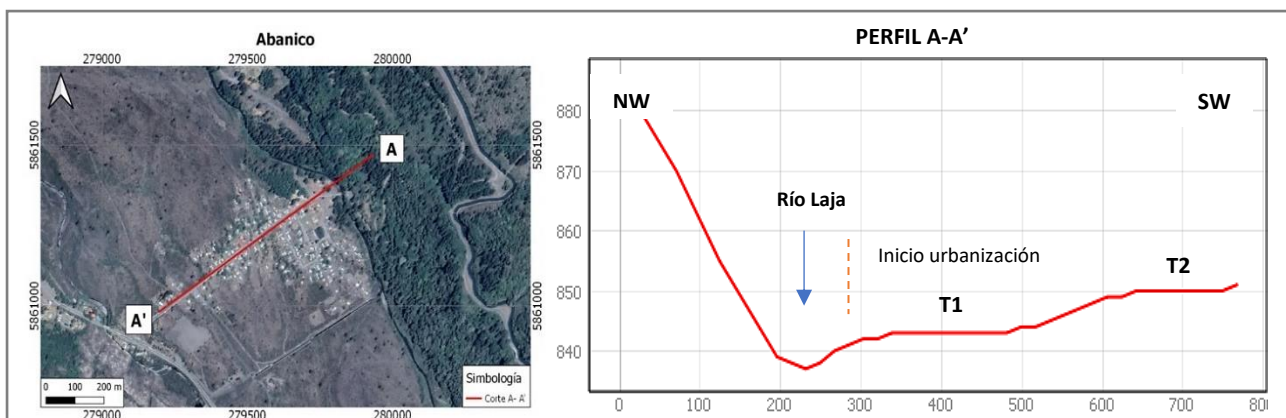


Figura 13: Perfil topográfico de corte A-A'. Elaborada mediante software QGIS 3.14.

El terreno de Abanico se encuentra cubierto por depósitos fluviales y volcánicos por su ubicación entre el río Laja y Malalcura y por su cercanía con el volcán Antuco. La fotografía de la Figura 14.a tomada en el centro de Abanico se encuentra entre las terrazas T1 y T2, y con respecto a los sedimentos se identifica una gran cantidad de clastos de diversos tamaños, desde arena hasta bloques provenientes de depósitos fluviales y volcánicos procedentes de lahares. La Figura 14.b se obtuvo hacia el interior de una vivienda y se observan clastos de tamaño grava gruesa superior a los 25 cm, situación común en el patio de las casas.

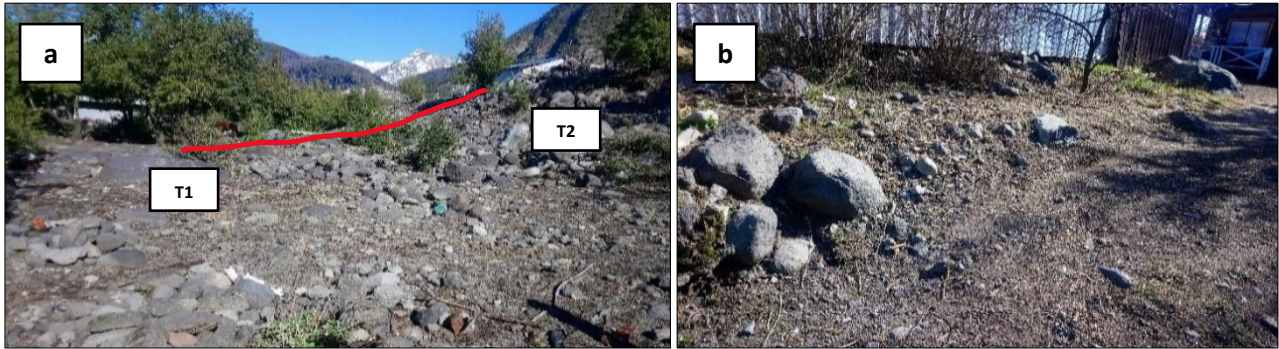


Figura 14: Localidad de Abanico **a.** Centro de la localidad Abanico. **b.** Depósitos ubicados al interior de una vivienda. 10 de agosto de 2022 (Elaboración propia).

- **Sector 2: Los Canelos**

Los Canelos, se ubica al este de Antuco urbano y corresponde a un pasaje poblado con 163 habitantes (PLADECO, 2020). Según el mapa geológico de la Figura 12, se ubica en el límite de los sedimentos fluviales (500 m de distancia con respecto al río Laja) lo que explica el menor tamaño de los depósitos observados en terreno (Figura 15) identificando tamaño arenas y gravas gruesas.



Figura 15: Sedimentos en sector Los Canelos. 10 de agosto de 2022 (Elaboración propia).

- **Sector 3 y 4: Antuco**

La Figura 16 fue obtenida al término de la zona urbana de Antuco, sector que presenta la mayor densidad poblacional con 2.161 habitantes (PLADECO, 2020). La urbanización se encuentra a una distancia superior a 900 m del río Laja y según el mapa de la Figura 12 se ubica en el límite de los sedimentos fluviales.

Como se observa en la Figura 16.a, las superficies son planas con sedimentos tamaño arena propias de una terraza fluvial. El paso a estos terrenos se encuentra limitado por ser de carácter privado, pero a través de Google Earth se pueden identificar viviendas que se han construido a menos de 100 m de un antiguo recorrido que el río Laja realizaba hace menos de 15 años (Figura 16.b).

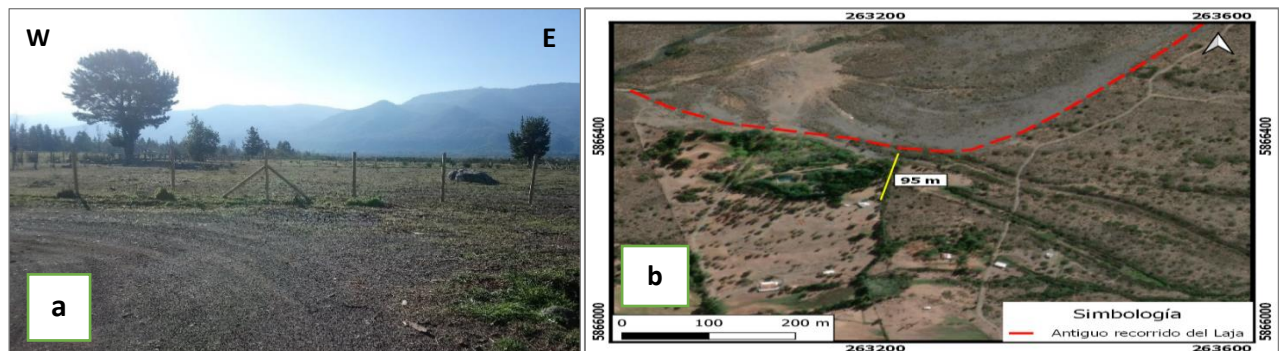


Figura 16: **a.** Terrenos privados al final del sector Antuco urbano. **b.** Casas cercanas a un antiguo recorrido del río Laja. 10 de agosto de 2022 (Elaboración propia).

La Figura 17 corresponde al sector del cementerio de Antuco en dirección al río Laja, ubicado a menos de 300 m de la bocatoma que desvía las aguas del río Laja hacia las centrales hidroeléctricas Rucúe y Quilleco.

En este sector, el Laja corresponde a un tipo de río anastomosado y durante el transcurso de esta ruta se puede identificar una ramificación del río que se activó producto de las precipitaciones del invierno pasado (Figura 17.a) con una distancia menor a 300 m de las primeras viviendas de Antuco urbano, y en la Figura 17.b se observa una gran cantidad de depósitos fluviales desde tamaños arena hasta bloques de 40 cm, lo que indica que el río en algún momento tuvo bastante profundidad y energía para transportar ese tamaño de rocas.

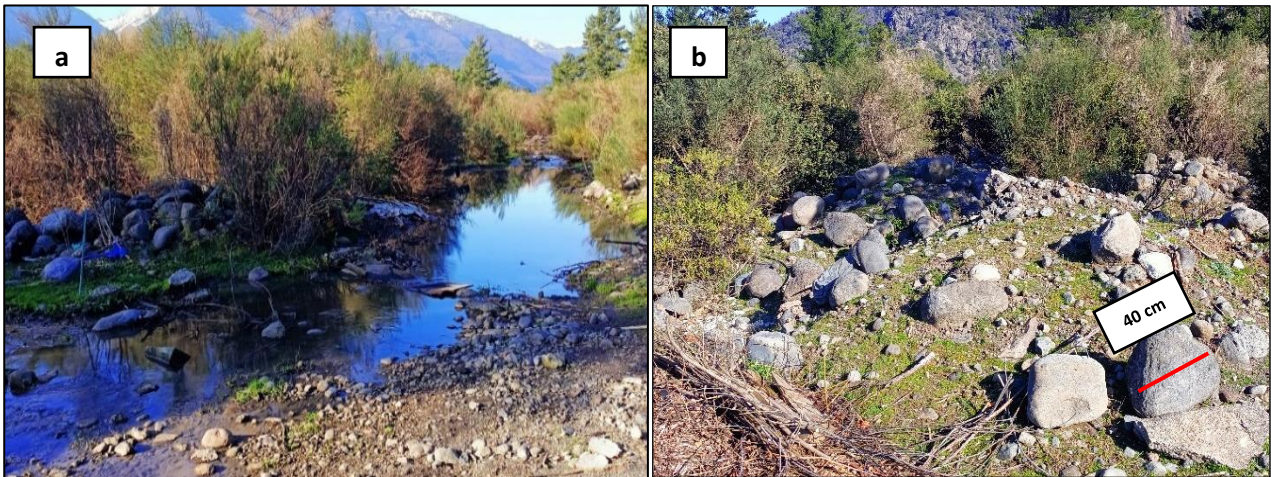


Figura 17: Sector cementerio en Antuco urbano. **a.** Ramificación activada producto de las precipitaciones. **b.** Clastos de diversos tamaños. 10 de agosto de 2022 (Elaboración propia).

- **Sector 4: El Esfuerzo**

Esta localidad de 80 habitantes (PLADECO, 2020) se encuentra al oeste de Antuco urbano y es la segunda más cercana al río Laja después de Abanico, con una distancia cercana a los 100 m. Según la Figura 18, la localidad se ubica a una altura máxima de 12 m sobre terrenos desnivelados siguiendo la morfología de ríos anastomosados.

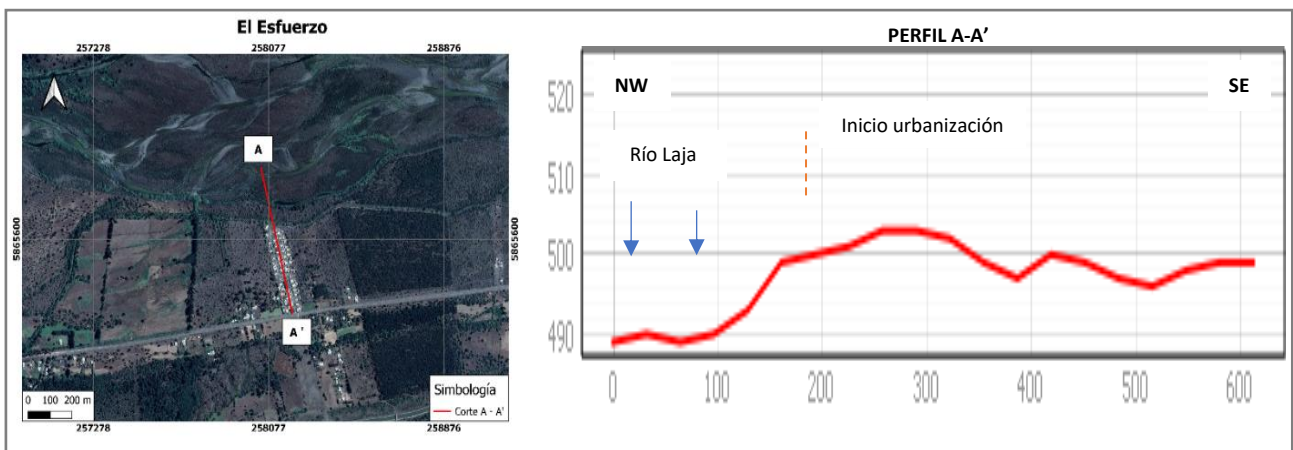


Figura 18: Perfil topográfico de corte A-A'. Elaborada mediante software QGIS 3.14.

La Figura 19 se obtuvo del exterior de las viviendas, y se puede identificar depósitos arenosos y grava gruesa de menor tamaño que otros sitios visitados, esto se puede explicar por ser el último poblado de Antuco donde los clastos ya han sufrido una mayor fragmentación y erosión por el transporte.



Figura 19: Terrenos del sector El Esfuerzo. 10 de agosto de 2022. (Elaboración propia).

Complementando la información del mapa geológico donde indica que casi la totalidad de localidades se encuentran sobre los depósitos fluviales, se pudo identificar en terreno la veracidad de esta información, evidenciando que el material del río se encuentra desplegado en todas las zonas visitadas, independiente de su cercanía con el río Laja, además se identifican clastos de tamaño bloque de hasta 40 cm en algunas terrazas, lo que indica que el río en algún momento tuvo la suficiente energía para transportar ese tamaño de roca.

4.1.3. Método hidrológico - hidráulico

Para la simulación del cauce en HEC-RAS, se requirieron datos de caudales, geometría, coeficiente de Manning y condiciones de borde.

Para el análisis hidrológico se estimaron caudales máximos instantáneos a través del método DGA-AC para cada uno de los esteros y ríos afluentes del Laja localizados en la zona de estudio. No se consideraron las desviaciones e ingresos de caudal por parte de la industria hidroeléctrica, debido que la extracción de caudal se recompone al mismo cauce y las estaciones fluviométricas ubicadas en los canales de descarga de las hidroeléctricas están operativas de hace 2 años no siendo datos representativos. Los valores se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Caudales Instantáneos Máximos mediante el método DGA-DC. (Elaboración propia).

Nombre	Descripción	Caudal para T= 5 años (m ³ /s)	Caudal para T= 25 años (m ³ /s)	Caudal para T= 50 años (m ³ /s)	Caudal para T= 100 años (m ³ /s)
Laja	Río principal	198	285	326	368
Malalcura	Río afluente	15	21	24	27
Polcura	Río afluente	350	504	576	650
Pichipolcura	Río afluente	68	98	111	125
Quillailebu	Estero	96	138	158	177
Sta. Rosa	Estero	35	50	56	63
Canal Laja	Canal de extracción	128	135	138	141

La modelación se hizo en régimen estacionario por considerarse pluvio-nival y con condiciones de borde "Normal Depth" (profundidad normal) con una pendiente de 0,008. La geometría del cauce se obtiene en base a un modelo digital de elevación (DEM SRTM) con fecha de captura en agosto del 2014 y con secciones transversales espaciadas cada 20 m en un tramo de 38 km del río Laja. Para este estudio, no se contó con la batimetría del sector, lo que significa un menor detalle del relieve del lecho del río teniendo que ser ajustado en algunas secciones transversales para nivelarlo con la morfología actual.

La obra hidráulica se ubica a 1.500 m de Antuco urbano en las coordenadas 261498.32 m E, 5866560.49 m S y su modelado consiste en una pared gruesa de 7 m de altura con 8 compuertas tipo radial de dimensiones 10,5 m x 5 m (HxV), alcanzando una extensión total de 1.500 m y un caudal ecológico de 4,6 m³/s (Colbún S.A., 1996). Las compuertas se encuentran completamente cerradas para tener el escenario más crítico.

El régimen de flujo es mixto, por considerarse supercrítico por efecto de las pendientes y subcrítico en la zona de influencia de la bocatoma que corresponde a 2 km aguas arriba de la obra hidráulica (Colbún S.A., 1996).

El valor obtenido para el coeficiente de Manning para la zona del cauce habitualmente mojada se realiza mediante el método de Cowan, y para el caso de las llanuras de inundación se obtiene el coeficiente de Manning a partir de los valores recomendados por Horton. Los valores se indican en la Tabla 8.

Tabla 8: Valores para el coeficiente de Manning mediante el método de Cowan (1956) y Horton (1916).

Río Laja		
Zona húmeda	Coeficiente de Manning	
0 – 1,7 km	0,053	
1,7 - 8 km	0,039	
8 – 16 km	0,057	
16 – 32 km	0,044	
Planicies de inundación	Borde derecho	Borde izquierdo
0 – 1,7 km	0,11	0,11
1,7 – 7,8 km	0,05	0,05
7,8 – 16,23 km	0,07	0,07
16,23 – 32 km	0,11	0,11

De acuerdo a los valores de la Tabla 8, en el primer tramo que abarca hasta 1,7 km se considera un valor de 0,053 donde destaca un alto contenido de gravas gruesas y bloques de hasta 50 cm en un río encajonado y relativamente recto. Entre 1,7 km y 8 km se considera un valor 0,039 con un material de menor tamaño que el tramo anterior, por lo tanto una disminución en el efecto de las obstrucciones y un leve aumento en las curvaturas en planta. Entre 8 km y 16 km se calcula un valor de 0,057 y corresponde al tramo de río anastomosado de material similar que el tramo anterior y un notorio aumento en las curvaturas en planta y en la variación de las secciones transversales, y para el último tramo que corresponde entre 16 km y 32 km, tiene un valor de 0,044 continuando con un tipo de río anastomosado pero con curvaturas y variaciones de las secciones transversales menores que el tramo anterior.

Para el caso de las planicies, en el primer tramo que abarca hasta 1,7 km se obtiene un valor de 0,11 por la presencia de árboles en ambos costados. Entre 1,7 km y 7,8 km tiene un valor de 0,55 por presentar matorrales dispersos en ambos costados. Entre 7,8 km y 16,23 km tiene un valor de 0,07 por tener matorrales medios a densos en ambos costados, y por último, en el tramo final que abarca entre 16,23 km y 32 km se calcula un valor de 0,11 por tener presencia de árboles y matorrales abundantes en ambos costados.

La Figura 20.a corresponde al perfil longitudinal del eje hidráulico del río Laja como parte de los resultados obtenidos de HEC-RAS, donde se identifica que el régimen de río corresponde a mixto (subcrítico-supercrítico) y coincide en los datos ingresados inicialmente al programa.

La Figura 20.b es un fragmento del comportamiento del eje aguas abajo de la bocatoma que abarca entre 0-16 km, y corresponde a un régimen subcrítico con control de aguas abajo producto de velocidades inferiores a 2 m/s y una alta cantidad de sedimentos.

En la sección de la bocatoma (Figura 20.c) el régimen se mantiene subcrítico hasta 8 km aguas arriba. Las velocidades en los primeros 600 m son cercanas a los 0 m/s producto de la influencia de la obra hidráulica y durante el resto de segmento las velocidades se mantienen entre 1 y 3 m/s. El régimen subcrítico predomina en toda la zona de río que se encuentra anastomosado, hasta el encuentro con el régimen supercrítico a los 24 km (Figura 20.d).

Por último, la Figura 20.e es un fragmento del comportamiento del río que corresponde al inicio del tramo del río en estudio hasta 14 km aguas abajo, donde interactúa el régimen supercrítico con el subcrítico. El régimen subcrítico se hace presente en las zonas con pendientes menores y velocidades inferiores a 3 m/s y

el supercrítico en las zonas con mayores pendientes y velocidades superiores a 3 m/s. El resalto hidráulico ocurre en la intersección entre supercrítico-subcrítico y la crisis en el punto de inflexión que da paso de subcrítico a supercrítico. Este escenario de interacción entre regímenes se repite para toda la sección del río que se encuentra encajonado en un solo canal sobre un terreno de pendientes más pronunciadas con sedimentos de tamaño grava gruesa y bloques.

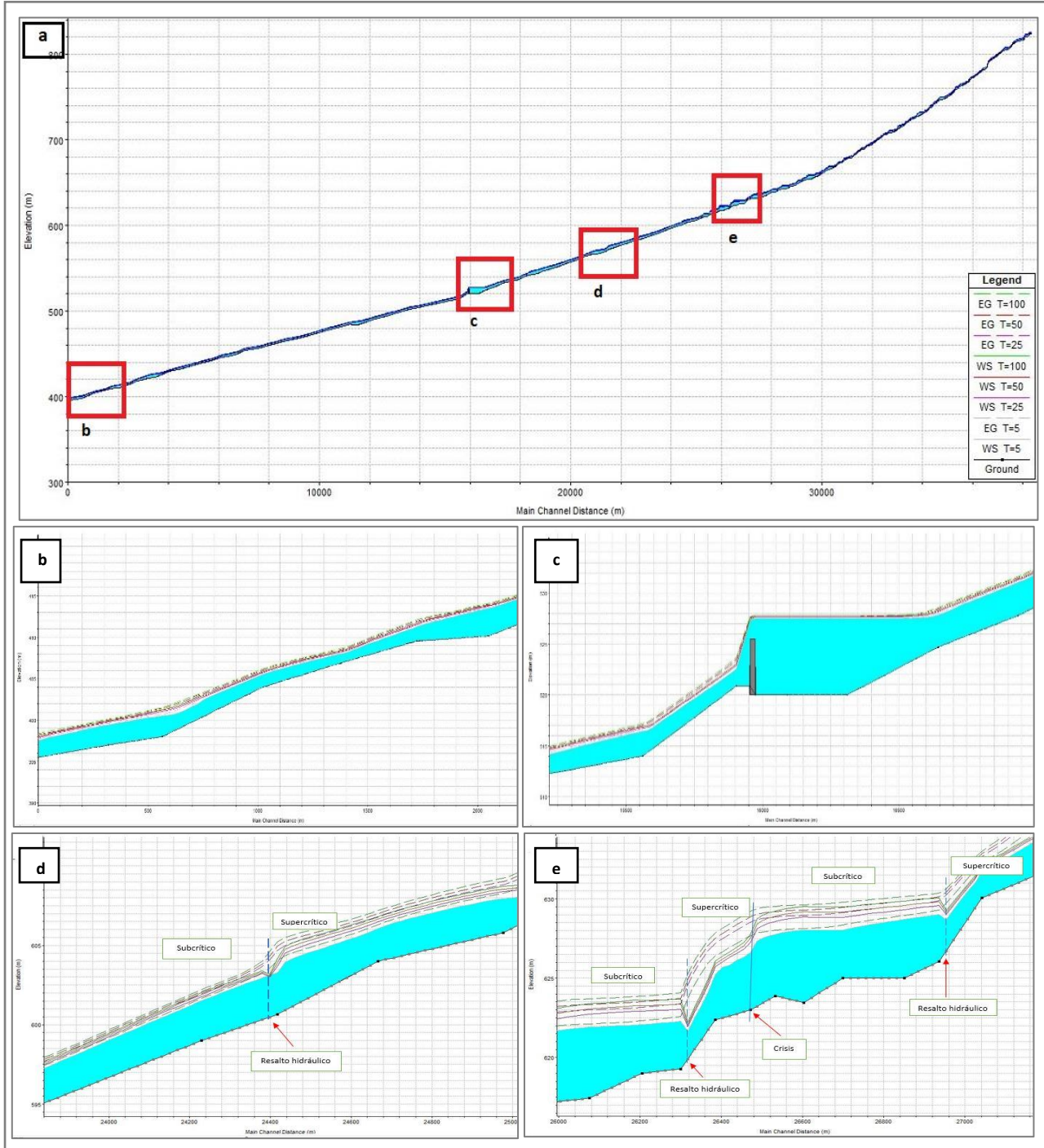


Figura 20. Eje hidráulico río Laja. Elaboración propia.

Analizando los valores obtenidos para los distintos periodos de retorno, se identifica que las velocidades pueden llegar a 7 m/s en el tramo inicial del río, cercano a 0 m/s aguas arriba de la bocatoma y un máximo de de 3 m/s en la sección de río anastomosado. Para el caso de las profundidades, los valores en el tramo inicial son cercanas a 2 y 3 m, de 8 m para la zona de la bocatoma y de 2 a 3 m para aguas abajo de la bocatoma. Todo en el escenario de un periodo de retorno de 100 años.

Para la elaboración del mapa de inundación fluvial se cuantificó el peligro mediante el método de Ramsbottom *et al.* (2006), a través del cálculo de datos de profundidad y velocidad entregados por la simulación del modelo hidráulico unidimensional del software HEC-RAS para periodos de retorno de 5, 25, 50 y 100 años. Estos datos fueron procesados en el software QGIS a través de la calculadora ráster en una resolución de 25 m. El resultado de los factores mencionados se visualiza en el siguiente mapa de inundación fluvial de la Figura 21.

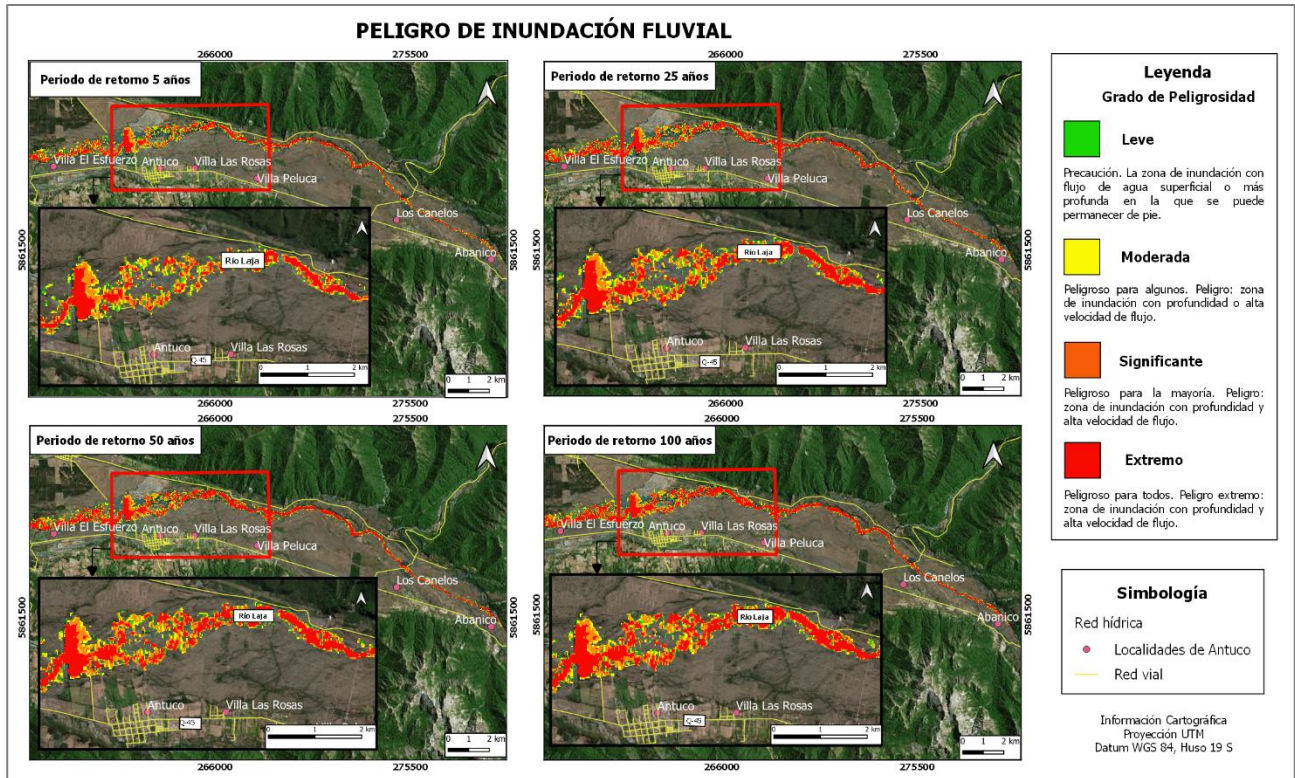


Figura 21. Mapa de inundación fluvial para el río Laja, comuna de Antuco. Elaboración propia.

De la Figura 21 se observa el comportamiento del flujo para los distintos periodos de retorno donde no se identifican grandes cambios en la dimensión de la inundación, pero sí en el grado de peligrosidad especialmente en las inundaciones más próximas a la zona de Antuco urbano.

El tramo más afectado por la inundación ocurre desde la bocatoma hasta 4 km aguas arriba de la obra hidráulica, donde el río es de tipo anatómico permitiendo que el flujo conecte los diversos canales y cubra recorridos que actualmente se encuentran abandonados. Esto se puede explicar por el aporte de caudal al río Laja por parte del río Pichipolcura, Polcura y el estero Quillailebu, además, la diferencia de altura en las llanuras de inundación de esa zona tiene un máximo de 5 m, mientras que aguas arriba donde no se observa ese nivel de inundación la diferencia de altura es mayor a 20 m generando mayores pendientes para que el río se encauce en un único canal.

A pesar de la cercanía de Abanico y El esfuerzo con el río Laja no se observa peligro de inundación para esas localidades, producto que Abanico se encuentra a 5 m de altura con respecto al río y la inundación máxima para el periodo de retorno de 100 años cubre una altura de 3 m, y para el caso de la villa el Esfuerzo la primera isla donde inicia la urbanización se encuentra a 10 m de altura y la inundación en esa zona llega hasta un máximo de 3 m.

4.2. Evaluación del riesgo

Para la evaluación del riesgo de inundación se consideran los factores mencionados en el método de Ramsbottom *et al.* (2006), los cuales son: peligro, exposición y vulnerabilidad, medidos para distintas distancias relativas al río Laja que corresponden hasta 50 m, 100 m, 250 m, 500 m y 1.000 m., aplicados a la localidad de Antuco urbano donde se ubica la mayor densidad poblacional que corresponde el 50,1 % de la población total de la comuna.

Para la medición del peligro se consideraron los datos de profundidad y velocidad obtenidos del modelo hidráulico unidimensional de HEC-RAS.

Para el factor de exposición, la velocidad de inicio se considera inundación rápida por la ubicación del área de estudio en la cordillera, lo que permite mayores pendientes para la fluidez del agua. La naturaleza del área corresponde en su totalidad a casas de estilo cabañas de una planta (PLADECO, 2020) y no existe alerta de inundación para la comuna.

En el caso de la vulnerabilidad el método se enfoca en personas con discapacidad y adultos mayores. Para el cálculo de la población afectada se considera un 16% de adultos mayores, un 13% para personas con discapacidad y un promedio de 2 personas por vivienda según datos obtenidos de PLADECO (2020). Para identificar la ubicación de las viviendas se utiliza Google Earth.

El peso asignado para cada factor y los valores utilizados para la matriz de Saaty se encuentran en las tablas 9 y 10 respectivamente.

Tabla 9: Valores y pesos de los factores para calcular el riesgo en el método de múltiples criterios.

Peligro						
Distancia con respecto al río (m)	Profundidad	Velocidad	Factor de desechos	Clasificación	Categoría	Peso
0 - 50	2	0,5	0,5	2,5	Clase 2	2
50 - 100	1,4	0,3	0,5	1,62	Clase 2	2
100 - 250	0,5	0,2	0	0,35	Clase 1	1
250 - 500	0	0	0	0	-	0
500 - 1.000	0	0	0	0	-	0
Exposición						
Distancia con respecto al río (m)	Velocidad de inicio	Naturaleza del área	Alerta de inundación	Clasificación	Peso	
0 - 50	3	0	0	3	1	
50 - 100	3	0	0	3	1	
100 - 250	3	0	0	3	1	
250 - 500	3	3	3	9	3	
500 - 1.000	3	3	3	9	3	
Vulnerabilidad						
Distancia con respecto al río (m)	Nº de capacidad reducida	Nº > 65 años	Total	Peso		
0 - 50	0	0	0	0		
50 - 100	0	0	0	0		
100 - 250	0	0	0	0		
250 - 500	2	3	5	1		
500 - 1.000	30	36	66	1		

Tabla 10: Matriz de comparación de criterios

Variables	Peligro	Exposición	Vulnerabilidad	Peso
Peligro	1	5	7	0,73
Exposición	0,2	1	3	0,19
Vulnerabilidad	0,14	0,33	1	0,08
Índice de consistencia		0,03		
Consistencia aleatoria		0,66		
Relación de consistencia		0,04		

De los factores considerados para la medición del riesgo y los valores presentados anteriormente se extrae el mapa de riesgo de inundación fluvial para la localidad de Antuco urbano (Figura 22).

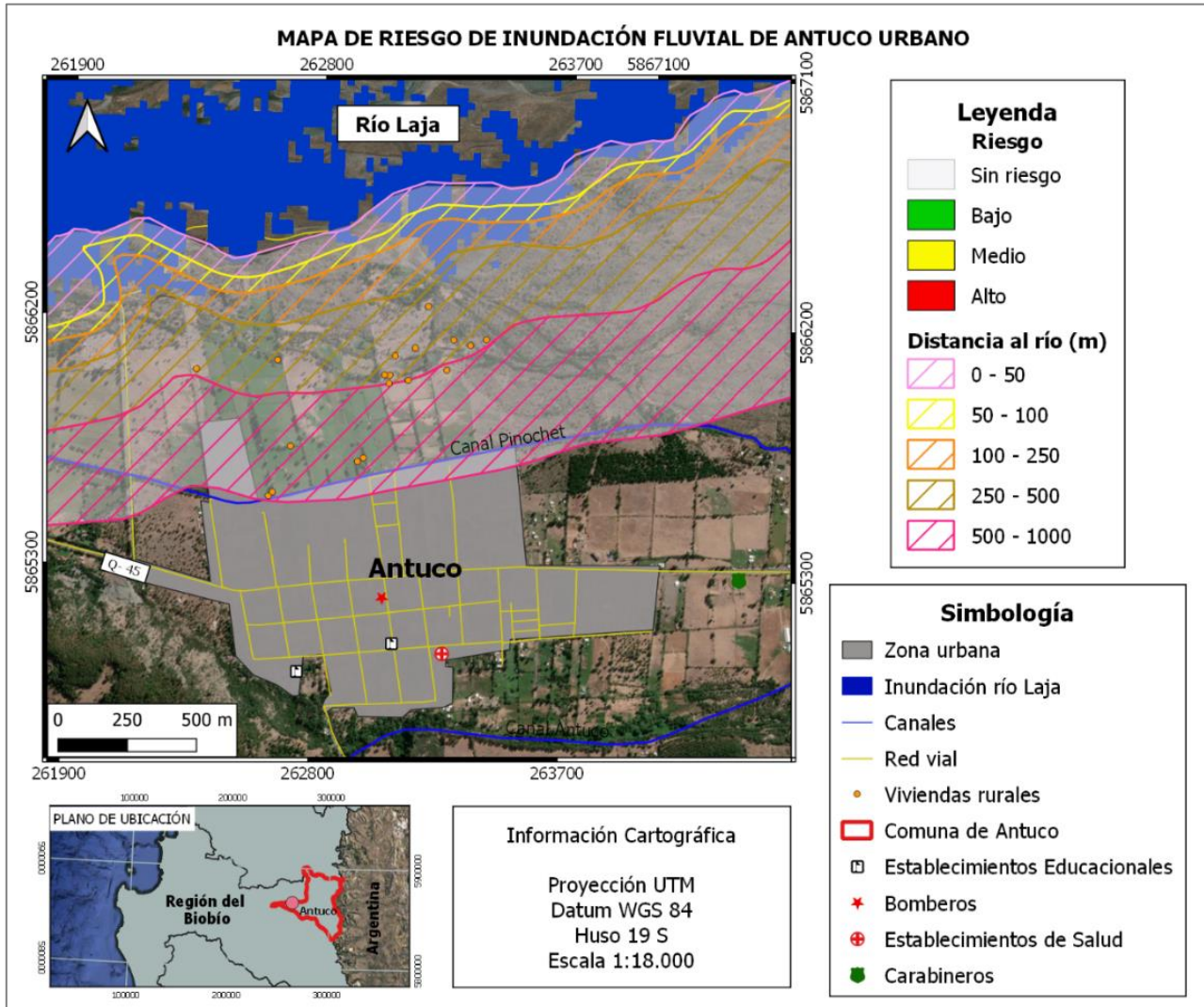


Figura 22: Mapa de riesgo de inundación fluvial para Antuco urbano. Elaboración propia.

La Figura 22 expone la inundación del río Laja en el escenario más crítico considerando un periodo de retorno de 100 años. De la imagen se identifica que no existe riesgo para la población de Antuco urbano ni para las viviendas rurales de la zona, debido que la extensión de la inundación tiene un alcance máximo de 260 m y las viviendas rurales se ubican sobre la primera terraza (~ 10 m) de la ribera sur del río Laja a una distancia de 350 m, y la población urbana se encuentra en la terraza más antigua (~ 30 m) a una distancia mayor a 900 m con respecto al río.

5. CONCLUSIONES

En el primer tramo del río ubicado en la cabecera del valle, se observa un menor desborde del río producto que el valle es más estrecho y el río se encuentra encajonado en un río más rectilíneo, pero al avanzar aguas abajo comienza un aumento de las curvaturas hasta convertirse en un río anastomosado al frente de los poblados con mayor densidad poblacional que consiste en Villa Peluca, Villa Las Rosas, Antuco urbano y Villa El Esfuerzo, surgiendo el potencial peligro que se formen nuevas ramificaciones de canales y erosionen las terrazas fluviales donde se ubica la población, situación que fue en aumento después de la construcción de la bocatoma producto de la mayor acumulación de sedimentos que actúa como impedimento para la filtración del agua al suelo.

El modelo hidráulico de inundación se realizó para una morfología determinada que ha predominado en el río desde la construcción de la bocatoma. El hecho que el río Laja no presente inundación en los poblados no indica que no lo hará en un futuro, considerando que gran parte del cauce es anastomosado con una morfología inestable y existe evidencia física y bibliográfica que en tiempos remotos ha circulado por todas las planicies del valle sedimentando las zonas en depresión.

Este escenario entrega una oportunidad para realizar una urbanización planificada en base a la forma natural del río considerando que por el cauce no solo fluye agua, sino también pueden fluir lahares provenientes del volcán Antuco.

5.1. Recomendaciones

Considerando que el riesgo de inundación fluvial no afecta directamente a la población, es una oportunidad para implementar medidas para prevenir eventos a futuro. En base a los resultados de la modelación, se proponen las siguientes estrategias para mantener la zona urbana libre de riesgo.

5.1.1. Planificación territorial

Para el caso de Mirrihue bajo, Antuco urbano, Villa Las Rosas y Villa Peluca, el límite urbano no debiera traspasar al norte del canal Pinochet, considerando que el canal puede actuar como barrera frente a cualquier evento de inundación.

5.1.2. Mantenimiento del canal Pinochet

Considerando que las condiciones del canal no son las más favorables, se debe poner énfasis en su mantenimiento y profundidad y además considerar una contención en el costado donde colinda con las viviendas. Se recomienda realizar estudios especializados que permitan diseñar el método de mitigación más adecuado para este canal.

5.1.3. Estaciones fluviométricas

Se recomienda instalar estaciones fluviométricas en el cauce principal del río Laja, porque las que se encuentran en la zona están ubicadas en los canales de descarga de las centrales hidroeléctricas, pero no abarcan todo el caudal circulante en el cauce principal. Esto implica tener datos más acertados sobre el caudal y perfeccionar la modelación hidráulica.

5.1.4. Estudios complementarios

Para obtener un resultado integral con respecto al impacto de inundaciones considerando los diversos factores presentes en la zona, se propone realizar los siguientes estudios:

- Estudios de inundación en evento de precipitaciones máximas para los canales Pinochet y Antuco.
- Realizar una modelación hidráulica considerando la batimetría del río y calibrar el coeficiente de Manning.
- Realizar un estudio de inundación en el escenario que ocurra de manera simultánea un evento de máximas precipitaciones y una erupción volcánica.

Para terminar, es necesario mencionar la importancia de modelar los peligros y evaluar el riesgo de manera preventiva, para planificar el territorio urbano y rural en base a las condiciones fluviales y evitar desastres a futuro que implican pérdidas humanas y económicas.

6. REFERENCIAS

Aquaterra Ingenieros Limitada (2011). "Estudio hidrogeológico cuencas Biobío e Itata". Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas.

Ayala, F., Olcina, J. (2002). "Riesgos naturales, conceptos fundamentos y clasificación". Barcelona: Editorial Ariel S.A., p 889-912.

Balica, S., Popescu, I., Beevers, L., Wright, N. (2013). "Parametric and physically based modelling techniques for flood risk and vulnerability assessment: A comparison". *Environmental Modelling & Software*, 41,84-92.

Börgel, R. (1983). "Geomorfología". Santiago, Chile: Instituto Geográfico Militar.

Chow, V. (1959). "Hidráulica de Canales Abiertos". New York: Compañía McGraw-Hill Book.

Colbún S. A. (1996). Estudio de impacto ambiental: Proyecto Central Hidroeléctrica Rucúe.

Cowan, W. (1956). "Estimación de coeficientes de rugosidad hidráulica", *Ingeniería Agrícola*. Vol 37, N° 7, p 473-475.

- Díez, A., Laín, L., Llorente, M.** (2008). “Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración”. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Dirección General de Aguas (DGA)** (1991). “Precipitaciones máximas en 1, 2 y 3 días”. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Santiago, Chile.
- Dirección General de Aguas (DGA)** (1995). “Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica”. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Santiago, Chile.
- Douben, N.** (2006). “Characteristics of river floods and flooding: A global overview, 1985-2003”. *Irrigation and Drainage*, 55(S1), S9-S21.
- Escobar, F., Vidal, F.** (1992). “Experiencia sobre la determinación de la línea de nieves en cuencas de Chile Central”. *Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*, Vo. 7, N° 2
- Espinoza, G.** (1990). “El manejo de los desastres naturales: Conceptos y definiciones básicas aplicadas a Chile”. *Medio Ambiente y urbanización*, N° 30, p 21-30.
- Fernández de Córdova, C., León, A., Rodríguez, Y., Martínez, P., Meneses, D.** (2018). “Influencia del método de estimación en el coeficiente de Manning para cauces naturales”. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(1), 17-31.
- Ferraris, F.** (1981). Hoja Los Ángeles-Angol, región del Biobío. Mapa Geológico Preliminar de Chile, escala 1:250.000, 5, Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Hídrica Consultores SpA.** (2018). “Sectorización hidrogeológica del acuífero del río Laja, región del Biobío”. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas.
- Horton, R.** (1916). “Some better Kutter’s formula coefficients, Engineering News”. Vol 75, N° 8, p 862-863.
- Ilustre Municipalidad de Antuco** (2014). “Plan Regulador Comunal de Antuco”. Memoria Explicativa. Anexo 3 Estudio de Riesgos y de Protección Ambiental [En línea]. Ilustre Municipalidad de Antuco, Región del Biobío, Chile. Recuperado el 08 de junio de 2022. Disponible en: <http://www.municipalidadantuco.cl/wp-content/uploads/2014/04/ANEXO-3.-ESTUDIO-RIESGOS-Y-PROTECCION-AMBIENTAL.pdf>
- Ilustre Municipalidad de Antuco** (2017). “Plan de Comunal de Emergencia de Antuco”. [En línea]. Ilustre Municipalidad de Antuco, Región del Biobío, Chile: Recuperado el 03 de noviembre de 2021. Disponible en: http://www.municipalidadantuco.cl/wpcontent/uploads/2019/10/PLANCOMUNALDEEMERGENCIA_actualizado-2019.pdf
- Ilustre Municipalidad de Antuco** (2020). “Plan de Desarrollo Comunal de Antuco” [En línea]. Ilustre Municipalidad de Antuco, Región del Biobío, Chile: 59 p. Recuperado el 03 de noviembre de 2021. Disponible en: <https://www.municipalidadantuco.cl/wp-content/uploads/2021/03/Libro-PLADECO-ANTUCO-2020-2024.pdf>.
- Instituto Geográfico Militar (IGM)** (2005). Atlas Geográfico de la República de Chile.
- Keller, E., Blodgett, R.** (2007). “Riesgos Naturales: Procesos de la tierra como riesgos, desastres y catástrofes”. Trad. Gil, P. Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Larraín, P., Simpson, P.** (1994). “Percepción y prevención de catástrofes naturales en Chile”. Santiago: Universidad Católica de Chile.
- Muñoz, J., Oyarce, P.** (2011). “Consultoría hidrogeológica sector río Laja en confluencia con río Rucúe”. Panel de Inspección del Banco Mundial.
- Niemeyer, H., Muñoz, J.** (1983). Hoja Laguna de la Laja, región del Biobío, Carta Geológica de Chile, escala 1:250.000, 57, SERNAGEOMIN.

Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior ONEMI. (2020). “Inundaciones: Previene, Infórmate y Prepárate”. Ministerio del Interior y Seguridad Pública. Gobierno de Chile. Disponible en: https://www.onemi.gov.cl/wp-content/uploads/2020/03/Inundaciones_2020.pdf

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) (2002). “Gestionar los riesgos”. Disponible en: http://webworld.unesco.org/water/wwap/facts_figures/gestionar_riesgos.shtml.

Organización Estados Americanos (OEA) (1993). “Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado”. Washington, D.C. Organización de los Estados Americanos.

Ramsbottom, D., Floyd, P., Penning-Rowsell, E. (2006). “Flood Risks to People; Phase 2: Project Record”. FD 2321/PR. Reino Unido.

Riffo, A., Peñas, F., Muñoz, E. (2017). *Clasificación de los regímenes de caudales naturales en los ríos de Chile* (Habilitación profesional). Universidad Católica de la Santísima Concepción.

Rojas, O., Martínez, C. (2011). “Riesgos naturales: evolución y modelos conceptuales”. *Revista Universitaria de Geografía*, 20(1), 83-116.

Saaty, T. (1980). “The Analytic Hierarchy Process”. McGraw-Hill. New York.

Thiele, R., Moreno, H., Elgueta, S., Lahsen, A., Rebolledo, S., Petit-Breuilh, M. (1998). “Evolución geológico-geomorfológica cuaternaria del tramo superior del valle del río Laja”. *Revista geológica de Chile*, 25(2), 229-253.

United States Geological Survey (USGS) (2014). Digital Elevation Model Shuttle Radar Topography Mission (DEM SRTM): 1 arc second scene. Disponible en: <https://earthexplorer.usgs.gov/>