



CUANTIFICACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LAS MAREAS EN LOS PATRONES DE INUNDACIÓN EN RÍOS COSTEROS

M. Carrasco Campos¹, D. Caamaño Avendaño² y M. Villagrán Valenzuela³

RESUMEN:

Las inundaciones son el desastre natural de mayor ocurrencia a nivel mundial, lo anterior motiva diversos estudios en cauces costeros con la finalidad de cuantificar el comportamiento del flujo. Los modelos matemáticos son parte de las herramientas utilizadas para ello. Esta tecnología es cada vez más precisa y permite predecir de mejor manera el comportamiento hidrodinámico del flujo en el cauce modelado. La finalidad de este estudio es determinar variaciones generadas por las mareas en casos de tormentas según diversos periodos de retorno. La zona a estudiar está situada en la provincia de Concepción, región del Biobío, Chile, y abarcara dos sectores específicos, el estero Bellavista y su desembocadura, en la comuna de Tomé, y el río Biobío y su desembocadura junto con Caleta Lengua, en la comuna de Hualpén. Se generaron modelos hidráulicos bidimensionales en Hec-Ras combinando la hora de inicio del máximo caudal, aguas arriba, y la hora en la que se registra la pleamar en sicigias de un ciclo de mareas fijo, aguas abajo. Se dispone entonces, de diferentes modelos que apuntan a cuantificar la influencia de la marea en el flujo y los patrones de inundación. Los resultados obtenidos permiten concluir que la influencia de las mareas en los cauces costeros tiene directa relación con la morfología del canal siendo la pendiente longitudinal y el nivel de canalización que presenta el curso de agua los que presentan mayor influencia.

PALABRAS CLAVES: Inundación fluvial; Mareas; Modelación Hidráulica.

ABSTRACT:

Floods are the natural disaster that have the greatest occurrence worldwide, for that reason motivates scientists to do various studies in coastal channels in order to quantify the behavior of the water flow. Mathematical models are part of the tools used to study these events. This technology is increasingly accurate and allows better prediction of the hydrodynamic behavior of the flow in the modeled channel. The purpose of this study is to determine variations generated by the tides in cases of storms according to various return periods. The area to be studied is located in the province of Concepción, Biobío region, Chile, and will include two specific sectors, the Bellavista estuary and its mouth, in the municipality of Tomé, and the Biobío river and its mouth together with Caleta Lengua, in the municipality of Hualpén. Two-dimensional hydraulic models were generated in Hec-Ras by combining the start time of maximum flow, upstream, and the time when the high tide is recorded in syzygies of a fixed tidal cycle, downstream. As a consequence, different models are available that aim to quantify the influence of the tide on the flow and flood patterns. The results obtained allow us to conclude that the influence of the tides in the coastal channels is directly related to the morphology of the channel, being the longitudinal slope and the channeling level that the water course presents the ones that present the greatest influence.

KEYWORDS: River flooding; Tides; Hydraulic modeling.

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

²Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, dcaamano@ucsc.cl

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

1. INTRODUCCIÓN

Desde octubre del año 2020 la unidad de la Vicerrectoría de Vinculación con el medio de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, el Núcleo Científico Tecnológico para el Desarrollo Costero Sustentable (Núcleo C.T), ha estado ejecutando un proyecto con financiamiento MECESUP (USC 2095), el cual lleva por nombre “Contribuyendo al valor público de la UCSC mediante la incorporación de los Objetivos de Desarrollo sostenible en la gestión institucional y en el territorio”, y tiene como objetivo general potenciar el ecosistema colaborativo entre la universidad y las comunidades costeras de la comuna de Hualpén a través del modelo de vinculación bidireccional. La unidad de Núcleo C.T está compuesta por 5 áreas de trabajo, las cuales comprenden el área de biorecursos, educación, cultura e identidad local, innovación y emprendimiento, promoción de la salud y gestión de riesgos y resiliencia (<https://nucleoct.ucsc.cl>). En este último ámbito es que se encuentra incorporado el presente trabajo, donde gracias a una etapa diagnóstica realizada por académicos y profesionales del proyecto, junto con la comunidad, se identificaron varias amenazas para la población de Caleta Lengua y Tomé.

En el año 2021 sucedieron 432 desastres naturales en el mundo, según el reporte anual “2021 Disasters in numbers” (EM-DAT, 2022), superando los 357 eventos en promedio de los últimos 20 años, donde 223 eventos corresponden a inundaciones y 121 a tormentas. El continente americano fue el segundo que presentó la mayor cantidad de eventos, donde Colombia, Perú y Brasil pertenecen al grupo de los 10 países más afectados durante el pasado año. En Chile, se registran más de 200 eventos de inundación en el periodo de 1574 - 2012 (Rojas et al., 2014), donde el 71% están asociadas a eventos pluviales.

Cuando las mareas y precipitaciones interactúan, el impacto resultante puede ser peor que cuando ocurren individualmente. Es probable que tanto las marejadas ciclónicas como las fuertes precipitaciones, así como su interacción, cambien en respuesta al calentamiento global. (Bevacqua et al., 2019). Es crucial considerar las mareas en cualquier modelo de inundación, especialmente cuando el área afectada es plana o está cerca de la desembocadura del río. (Sa’adi et al., 2022)

La región del Biobío, donde se situará esta investigación, es la segunda región, en Chile, con más inundaciones registradas, después de la Metropolitana. En el año 2006, en la provincia de Concepción, una tormenta provocó una crecida en el Río Biobío, asociada a un periodo de retorno de más de 40 años, lo que generó el desborde de este, produciendo una crecida en el humedal Lengua y posterior inundación de la Caleta Lengua, sector perteneciente a la comuna de Hualpén (Soberon, 2015). Por otro lado, en Tomé el año 2013 se registraron fuertes lluvias, las cuales provocaron el desborde del estero Bellavista, afectando a cerca de ciento cuarenta familias, llegando a tener inundaciones de cerca de 1 m de altura (Radio Bío Bío, 2013).

A modo de justificar el desarrollo de esta investigación, según los estudios realizados por Yévenes et al. (2022), Harrison et al. (2022), Sa’adi et al. (2022), Haigh et al. (2016) y Zheng et al. (2013), en los cuales analizan también la influencia de la marea en eventos costeros, confirman la alta incidencia de esta en algunos casos de inundación. Por otro lado, los registros sobre los eventos meteorológicos ocurridos en Concepción en 2006 y Tomé en 2019, nos permiten abrir debate sobre los posibles efectos que generaría un evento pluvial en situaciones de pleamar o bajamar.

Según los antecedentes mencionados anteriormente, la finalidad de esta investigación es determinar si la influencia de la marea, en los cauces del Río Biobío y el Estero Bellavista, generan variaciones en el comportamiento, pudiéndose ver reflejados en las alturas de escurrimiento, o inclusive en las áreas de inundación resultantes. Para esto se realizan modelos hidráulicos bidimensionales, en Hec-Ras, abarcando las zonas mencionadas, los resultados se presentarán tanto como gráficos de altura de escurrimiento, como mapas comparativos de área inundada. De esta manera se podrán estudiar variados casos de combinación marea-tormenta y se establecerá una comparativa entre ellos, con el fin de poder determinar situaciones más, o menos, desfavorables y estas sean proyectadas a la hora de generar obras hidráulicas, o estudios de mitigación de desastres en caso de ser necesarios.

2. ZONA DE ESTUDIO

El estudio se centrará en dos zonas específicas de la región del Biobío. Una de estas es la zona de Tomé, enfocada en la desembocadura del estero Bellavista y parte del estero Nachur, ambos son de origen costero, presentan una pendiente longitudinal de lecho aproximada de $9.3 \cdot 10^{-4} \text{m/m}$ y están canalizados e intervenidos producto de la necesidad de urbanización del sector aledaño.

Por otro lado, tenemos la desembocadura del Río Biobío, en Hualpén, con enfoque especial en el humedal Lenga (al norte, entre el río Biobío y Lenga) y en el humedal Los Batros (al sur del río Biobío por San Pedro de La Paz), el río Biobío es el mayor cauce de la región, posee una pendiente longitudinal de lecho aproximada de $3.6 \cdot 10^{-4} \text{m/m}$ y es de origen cordillerano.

La región se caracteriza por presentar un clima de humedad constante, con un registro anual de precipitaciones de entre 1200 mm y 2000 mm (Clima y vegetación Región del Biobío., s. f.), centrados entre los meses de abril y agosto.

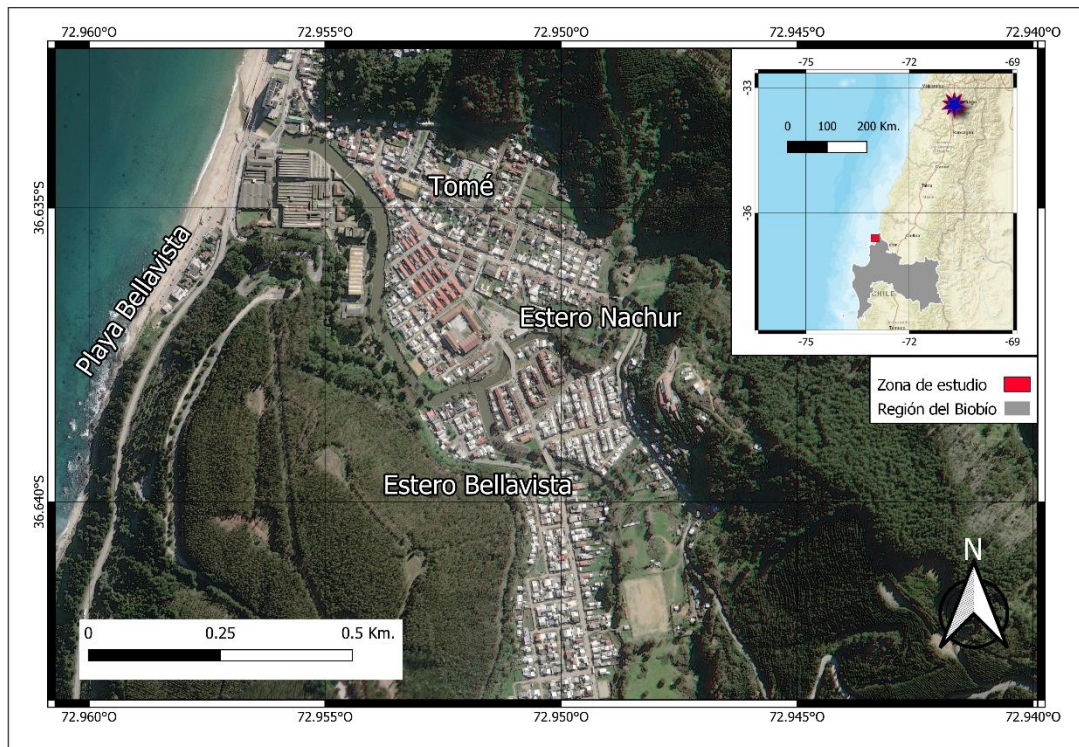


Figura 1: Área de estudio, Sector Tomé; **Fuente:** Elaboración propia.

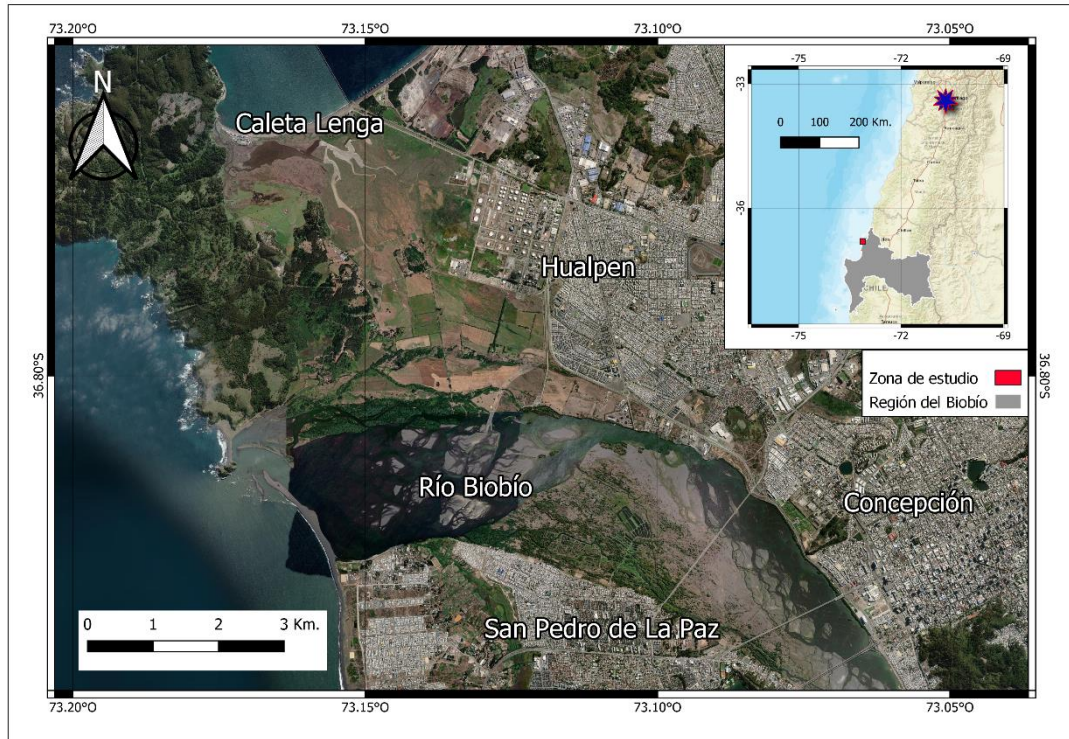


Figura 2: Área de estudio, Sector Río Biobío-Lengua; **Fuente:** Elaboración propia.

3. MÉTODOS

3.1. Descripción del software

El software utilizado para las modelaciones y cálculos hidráulicos de esta investigación es Hec-Ras, el cual fue creado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (US Army Corps of Engineers) y puede descargarse directamente del sitio web de la USACE. El software permite generar simulaciones hidráulicas unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) o mixtas (1D-2D), además, de transporte de sedimentos y calidad de agua. (*HEC-RAS User's Manual*, s. f.)

Para la solución de modelos 2D, Hec-Ras posee dos conjuntos de ecuaciones para aproximaciones. El primer conjunto es *Full momentum*, el cual resuelve las 3 ecuaciones de Saint Venant en 2 dimensiones, correspondientes a la ecuación de conservación de la masa (ecuación 1) y las ecuaciones de conservación de momento (ecuaciones 2 y 3), esta última considera aceleración local, aceleración convectiva, presión hidrostática, viscosidad del flujo, fricción en el lecho y efecto de coriolis. El segundo conjunto es *Diffusion Wave*, que resuelve un sistema de ecuaciones similar, sin embargo, en la ecuación de conservación de momento considera solamente los componentes gravitacionales y de rugosidad.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{xx} h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{yy} h \frac{\partial u}{\partial y} \right) - c_f u + f v + \frac{\tau_{s,x}}{\rho h} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{xx} h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{yy} h \frac{\partial v}{\partial y} \right) - c_f v + f u + \frac{\tau_{s,y}}{\rho h} \quad (3)$$

Donde:

u, v	: Velocidades en los ejes.
H	: Altura de presiones.
g	: Aceleración de gravedad.
h	: Altura del flujo.
ν_{xx}, ν_{yy}	: Coeficientes de viscosidad.
c_f	: Coeficiente de fricción.
f	: Parámetro de Coriolis.
$\tau_{s,x}, \tau_{s,y}$: Tensión del viento en la superficie.

Para los modelos realizados en ambas zonas, se usó la opción de *Full momentum*, debido a que las mareas son una condición importante en el estudio y el manual de usuario del software (páginas 281-282) recomienda su uso para sistemas condicionados por el comportamiento de las mareas.

3.2. Topo-batimetría

Para este estudio en los levantamientos de terreno se utilizaron imágenes aéreas captadas por drones con sensores, además de equipos GPS RTK de manera complementaria, con estos métodos se determinó la topografía y batimetría de cada zona de estudio. Posteriormente los datos se procesaron en el software QGIS (versión 3.26.1), el cual permitió generar los Modelos de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés) que se usaron finalmente en Hec-Ras.

3.3. Condiciones de modelación

3.3.1. Condiciones de borde aguas arriba

Para esta condición se generaron e ingresaron hidrogramas de flujo proyectados para los periodos de retorno de 20, 40, 75 y 100 años. Para la zona de Tomé, en el caso del estero Bellavista, se recopilaron datos de la estación fluviométrica “Estero Bellavista en Tomé” (Lat.-36.639°, Lon -72.949°), perteneciente a la Dirección General de Aguas (DGA), con los cuales se estimó el caudal máximo instantáneo, y debido a la similitud entre la cuenca asociada al estero Bellavista y la cuenca asociada al estero Nachur, por medio de transposición de áreas de cuencas se estimó el caudal asociado al estero Nachur. Para la zona de Lengua-Río Biobío, de igual manera que en el estero Bellavista, se tomaron datos desde una estación fluviométrica perteneciente a la DGA, en este caso de la estación “Río Biobío en desembocadura” (Lat.-36.837°, Lon -73.063°).

3.3.2. Condiciones de borde aguas abajo

Las condiciones aguas abajo ingresadas a los modelos son ciclos de mareas completos, adecuados a la duración de los hidrogramas de caudales de cada modelo. Los datos corresponden al ciclo de marea con mayor altura entre los meses de abril y agosto del 2022, esto debido a la posibilidad de ocurrencia, entre esos meses, de tormentas asociadas a los periodos de retorno definidos. Se determinaron los valores de nivel de reducción de sonda (NRS) y nivel medio del mar (NMM), que se usaron para alinear los datos de marea con los modelos de elevación. Se ocuparon los datos desde siete días previos hasta siete días posteriores de la marea máxima registrada.

Los datos fueron recopilados desde el sitio www.ioc-sealevelmonitoring.org, que entrega fecha, hora y una altura en relación al equipo de medición. Para la desembocadura del estero Bellavista y el Río Lengua se ocuparon los

datos entregados por la estación “Quiriquina” presente en la Isla Quiriquina, de código “*quir*”, y para la desembocadura del Río Biobío se ocupó la estación “Coronel”, de código “*crnl*”, ambas estaciones pertenecientes al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA).

3.3.3. Condiciones iniciales

HEC-RAS permite dos formas de condiciones iniciales, el primero permite ingresar caudal o cota de agua para una zona de modelación, y el segundo es iniciar los cálculos con un inicio seco. En los modelos de Tomé, se ocuparon condiciones con una cota inicial fija, una altura que no varíe los resultados, pero que permite una mayor estabilidad en el modelo y los cálculos que realiza el programa. En los modelos de Río Biobío y Lenga se optó por un inicio seco.

3.3.4. Calibración y validación

Con los registros que se recopilaban de las zonas, estudios hidrológicos, imágenes, datos de estaciones de la DGA e información proporcionada por los habitantes de la zona en base a los distintos eventos que han presenciado, se adecuaron los modelos a las realidades ocurridas en cuanto a zonas de inundación más comunes, alturas de agua y velocidades en algunos puntos estratégicos. El parámetro de rugosidad de Manning es el que se irá variando hasta conseguir los resultados necesarios según los datos recopilados.

3.3.5. Diseño Experimental y selección de resultados

Se determinará un punto de interés para cada zona de estudio, este se definirá al observar el comportamiento de los modelos, cercano a las zonas con desborde más probable según la información recopilada.

Se usarán los caudales correspondientes a $T = 40$ años, debido a que en ambas zonas se asemeja a caudales de desborde estimados, para generar diversos modelos con ciclos de marea fijos y variación en el inicio de la tormenta, según lo determinado como condición de borde aguas abajo y aguas arriba respectivamente. Se estimaron horas claves en base a los tiempos de pleamar y bajamar, y realizando modelos con caudal máximo a esas horas, así como también en las horas previas y posteriores a estas, se determinaron dos modelos correspondientes a los de mayor y de menor cota de agua producida en los puntos de interés de cada zona.

Las horas de máximo caudal de los modelos extremos determinados, se usarán para generar modelos en los demás periodos de retorno definidos. De los modelos finales, los resultados a obtener son las cotas de agua en los puntos de interés y el área de inundación, este último se obtendrá en QGIS con la importación de resultados desde Hec-Ras.

4. RESULTADOS

4.1. Modelo digital de elevación

Para la zona ubicada en Tomé resultó una DEM con resolución de 2.5 m x 2.5 m, ésta abarca desde la zona de la desembocadura del estero Bellavista, hasta un aproximado de 1.8 Km aguas arriba por el cauce del mismo, además, abarca parte del estero Nachur, un aproximado de 550 m desde la confluencia del estero Nachur con el estero Bellavista hacia aguas arriba.

En la zona de Río Biobío-Lenga la DEM resultante posee una resolución de 2.5 m x 2.5 m, el modelo abarca desde la zona de la desembocadura del Río Biobío, hasta aproximadamente 10.4 Km aguas arriba por el Río Biobío, llegando hasta el puente Chacabuco, además de la zona de Caleta Lenga y parte de la zona urbana de Hualpén, Concepción y San Pedro de La Paz.

4.2. Área de modelación

Las zonas de estudios fueron definidas mediante mallas no estructuradas, definiendo también mediante *breaklines* las zonas límites, con el fin de asegurar una interpolación de batimetría más representativa, que defina claramente la zona de río o estero y la zona de planicie.

Para la zona de Tomé la malla se definió con celdas de 2 m por lado, lo que generó aproximadamente de 142,000 celdas en el área modelada. Por otro lado, para la zona Río Biobío-Lenga, la malla se definió con celdas de 20 m por lado, lo que generó aproximadamente 196,000 celdas para el área modelada.

El tamaño de cada celda, y la cantidad de estas, afecta tanto en la precisión del modelo como en el tiempo que demora en ser calculado.



Figura 3: Modelo de elevación digital, zona de Tomé; **Fuente:** Elaboración propia.

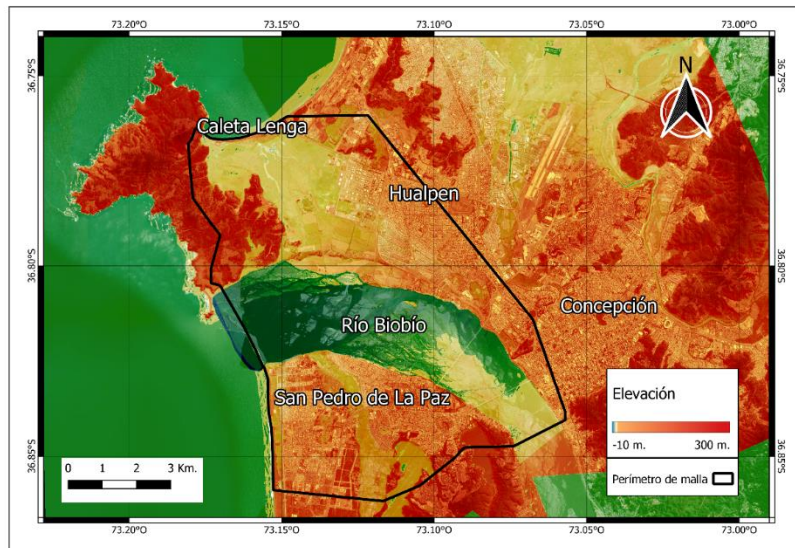


Figura 4: Modelo de elevación digital, zona de Río Biobío-Lenga; **Fuente:** Elaboración propia.

4.3. Condiciones de borde aguas arriba

4.3.1. Tomé

Para esta zona, se modificaron levemente los hidrogramas, definiendo al inicio una zona de aumento escalonada, lo que permitió una mayor estabilidad en los cálculos de los modelos realizados. Los hidrogramas usados fueron los siguientes.

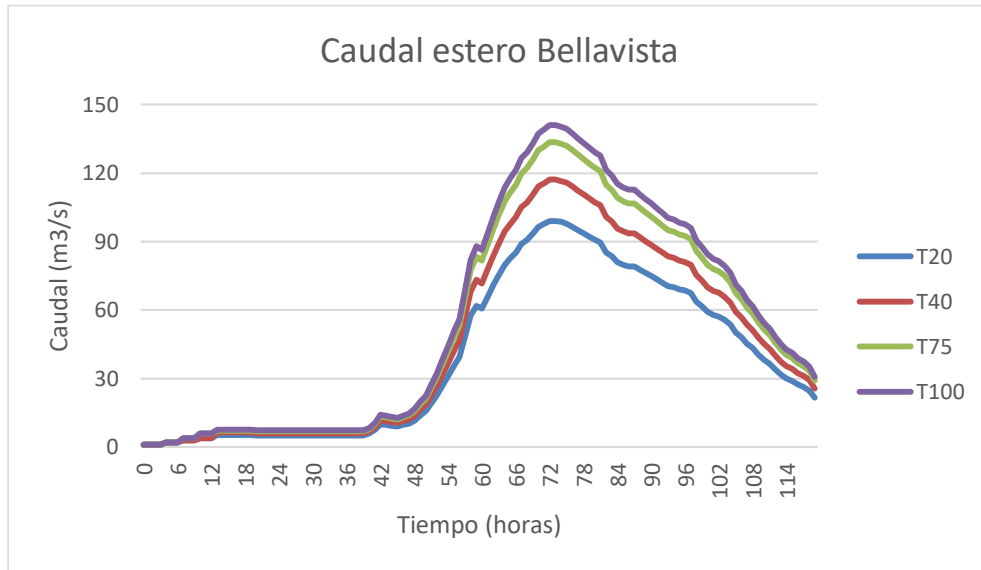


Figura 5: Hidrogramas de caudales, estero Bellavista, Tomé; **Fuente:** Elaboración propia.

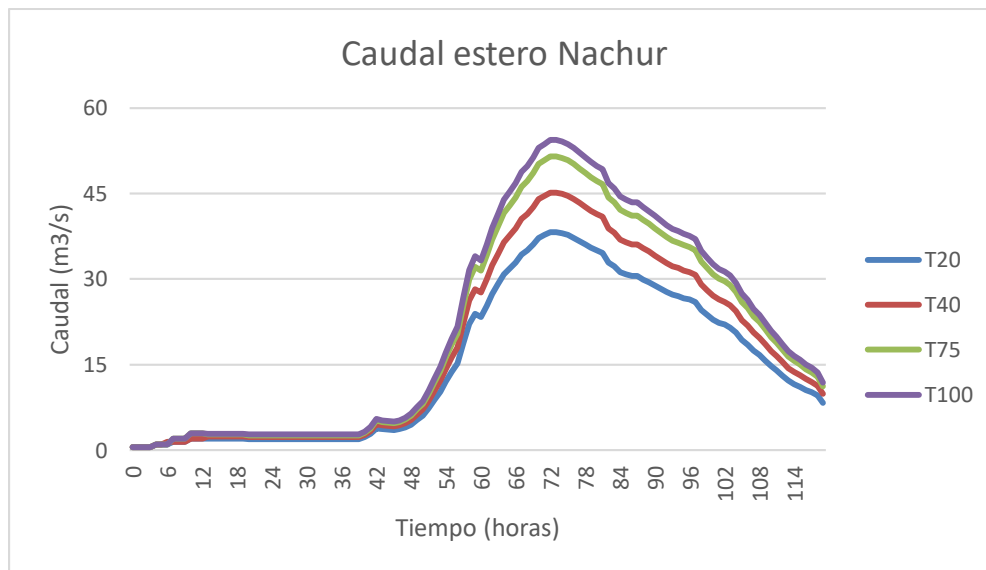


Figura 6: Hidrogramas de caudales, estero Nachur, Tomé; **Fuente:** Elaboración propia.

4.3.2. Río Biobío-Lenga

Los hidrogramas usados fueron los siguientes.

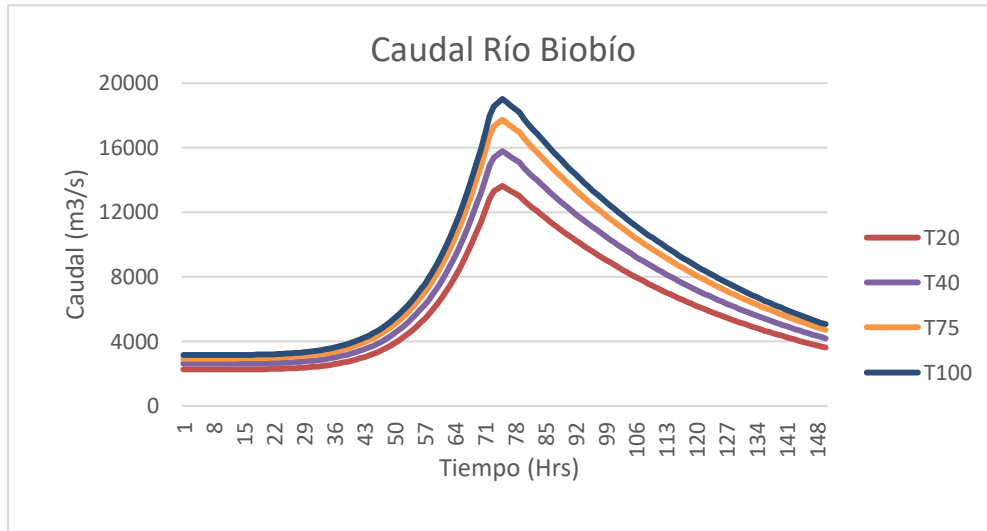


Figura 7 Hidrogramas de caudales, Río Biobío, Concepción-Hualpén; **Fuente:** Elaboración propia.

4.4. Condiciones de borde aguas abajo

Los datos de marea más alta del 2022, entre los meses definidos, ocurrió el 14 de Julio a las 15:15 horas.

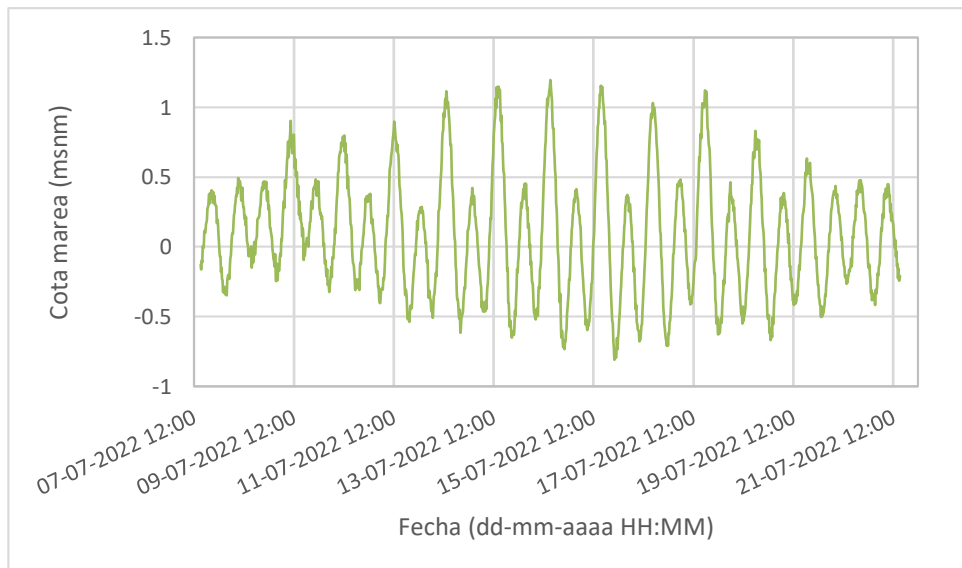


Figura 8: Gráfico de marea, estación “Coronel”; **Fuente:** Elaboración propia.



En los modelos de Río Biobío-Lenga, particularmente en los modelos que iniciaban a las 12, 14 y 15 horas, se tuvo que modificar la altura de marea inicial correspondiente a la estación “Quiriquina”, dejando en 0 m la altura desde las 8:30 horas hasta las 16:15 horas, debido a que con los datos originales se generaban modelaciones inestables.

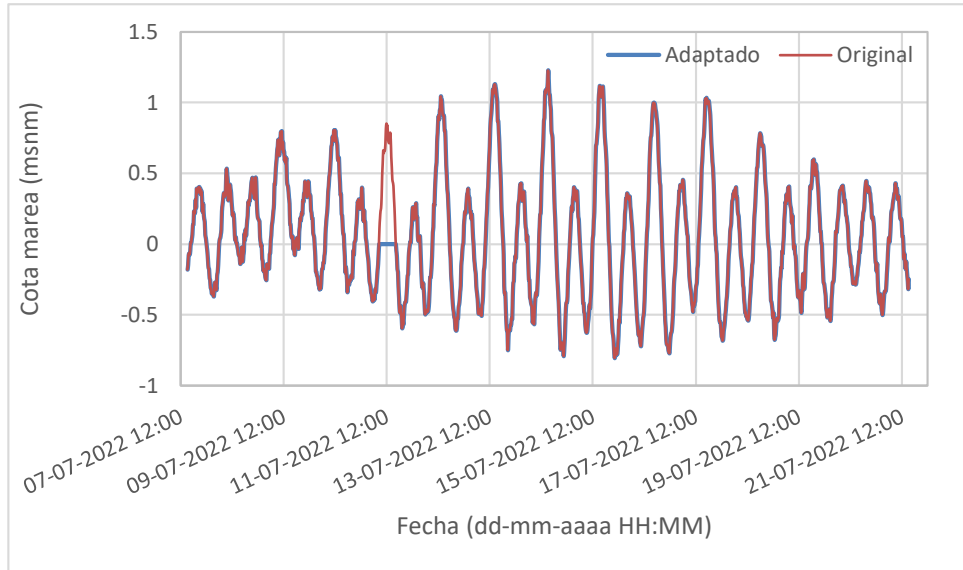


Figura 9: Grafico de marea, estación “Quiriquina”; **Fuente:** Elaboración propia.

4.5. Calibración y validación.

4.5.1. Tomé

Para este caso se usó la tormenta registrada entre el 26 y 28 de junio de 2019 y los respectivos datos de marea. Alarcón et al., (2019), define coeficientes de rugosidad de Manning para la zona de estudio, que fueron validados en esta investigación.

Tabla 1: Valores asignados a coeficientes de Manning. **Fuente:** Elaboración propia.

Descripción	Manning
Lecho de arena	0.035
Lecho de grava	0.039
Zona urbanizada	0.01

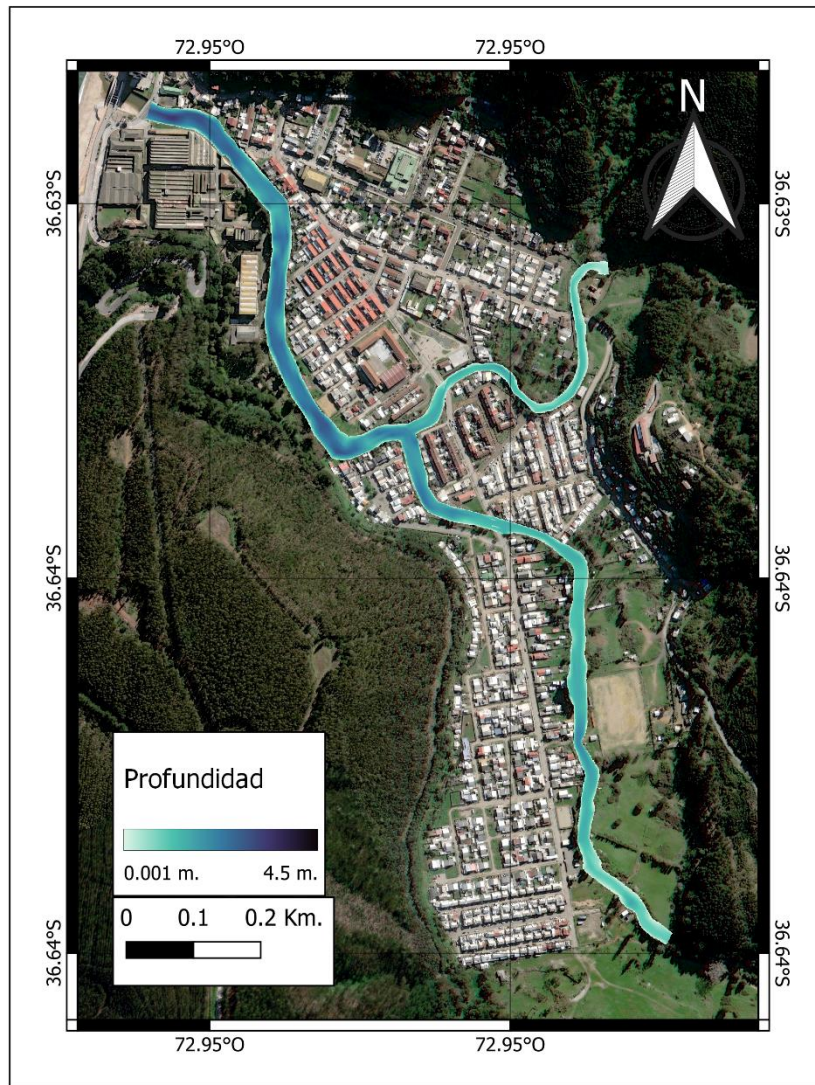


Figura 10: Mapa representativo de profundidades, modelo Tomé; **Fuente:** Elaboración propia.

4.5.2. Río Biobío-Lenga

Los registros de la tormenta ocurrida el 11 de julio de 2006, fueron usados como validación. Van Heemst et al. (2013), define coeficientes de rugosidad de Manning para la zona de estudio, que fueron validados en esta investigación.

Tabla 2: Valores asignados a coeficientes de Manning. **Fuente:** Elaboración propia.

Descripción	Manning
Lecho de Río	0.032
Zona de vegetación	0.038
Zona urbanizada	0.01

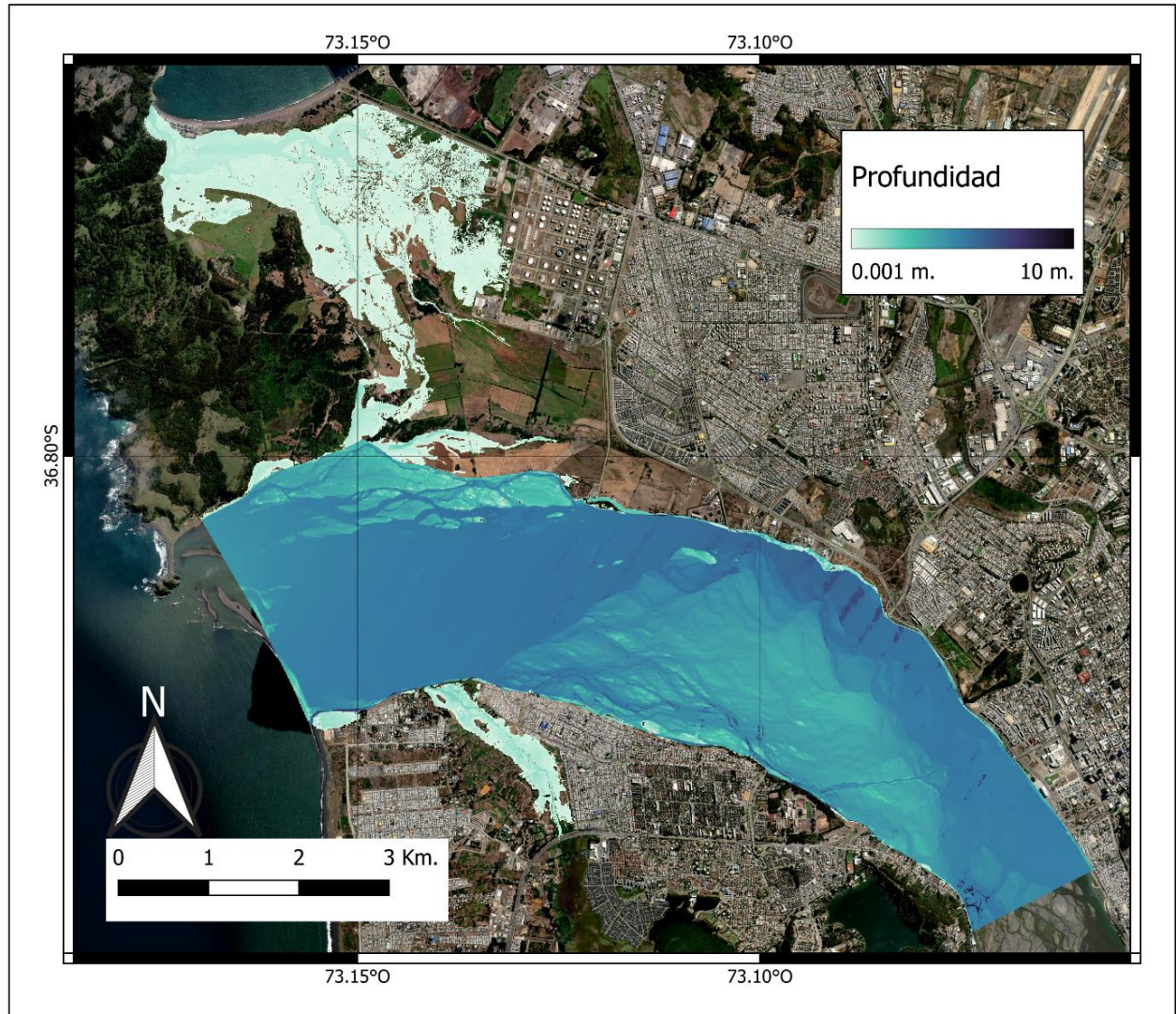


Figura 11: Mapa representativo de profundidades, modelo Río Biobío-Lenga; **Fuente:** Elaboración propia.

4.5.3. Diseños experimentales y selección de datos

Los puntos de interés se definieron a la altura de zonas que demostraron ser más propensas a inundación según los modelos usados para calibrar, en medio de cada corriente de agua.

En el estero Bellavista el punto de interés se definió a 600 m aprox. aguas arriba desde la desembocadura, a 180 m de la confluencia con el estero Nachur. En el río Biobío, el punto de interés se definió a 1100 m aprox. aguas arriba desde la desembocadura, cercano a las zonas de flujo hacia el humedal Lenga y el humedal Los Batros. Los puntos se muestran en la siguiente figura.

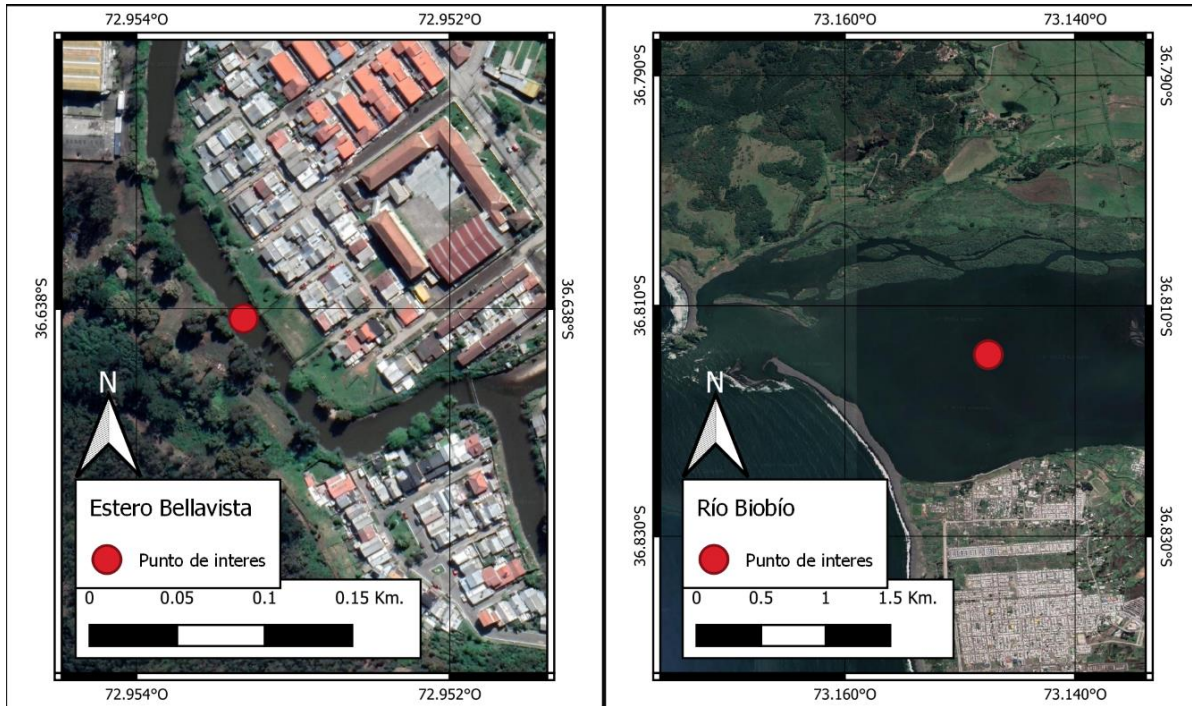


Figura 12: Mapa representativo con puntos de interés en ambas zonas de estudio; **Fuente:** Elaboración propia.

Los gráficos correspondientes a cota de agua, usados para determinar los modelos de mayor y menor cota máxima fueron los siguientes.

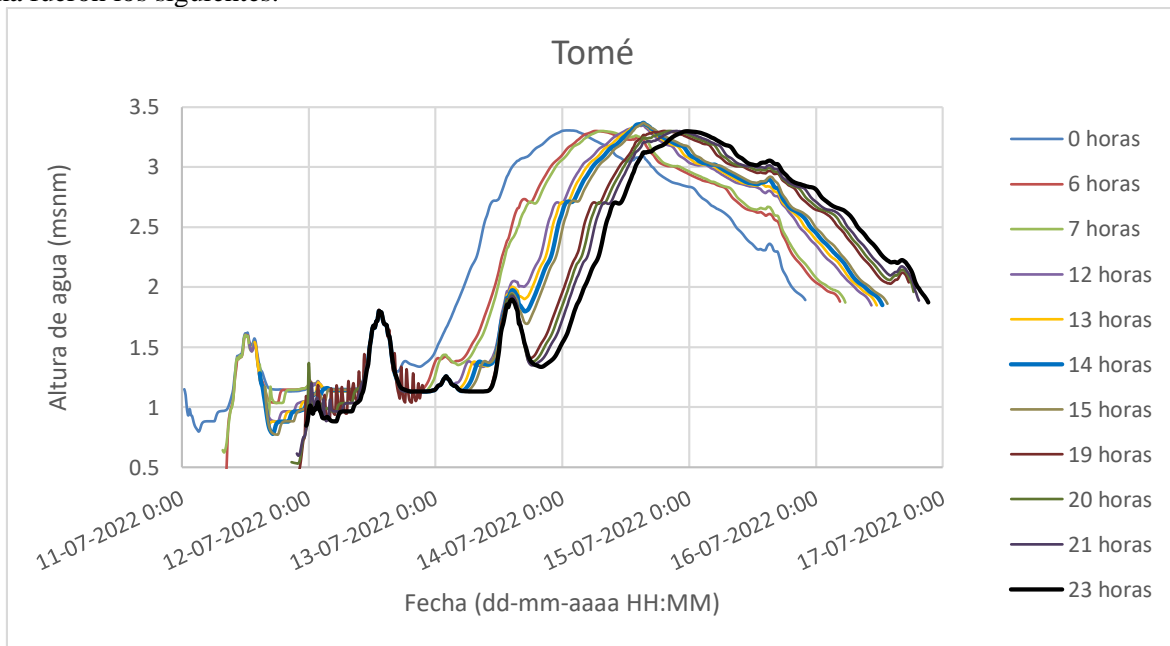


Figura 13: Gráfico comparativo de cota de agua en punto de interés, modelo Hec-Ras de Tomé; **Fuente:** Elaboración propia.

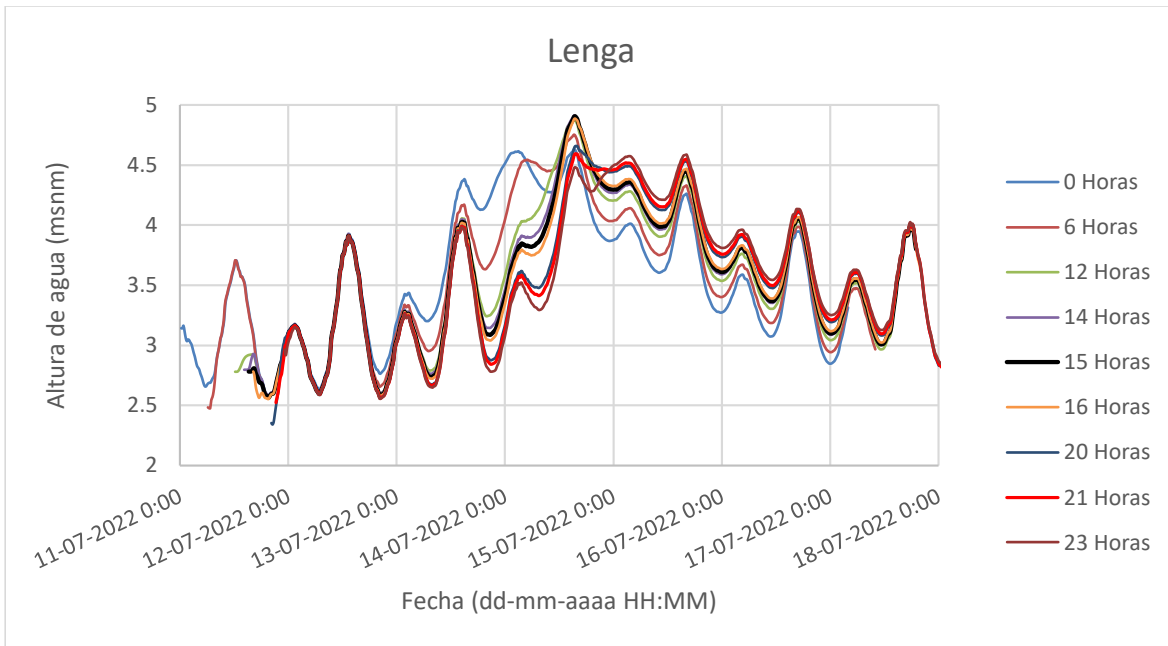


Figura 14: Gráfico comparativo de cota de agua en punto de interés, modelo Hec-Ras de Río Biobío-Lenga;
Fuente: Elaboración propia.

Para la zona de Tomé, a pesar de la similitud de los resultados, la hora que genera mayor cota de agua es con caudal máximo en las condiciones de borde aguas arriba a las 14 horas, y la situación que genera menor cota de agua se produce con un caudal máximo a las 23 horas en la condición de borde aguas arriba.

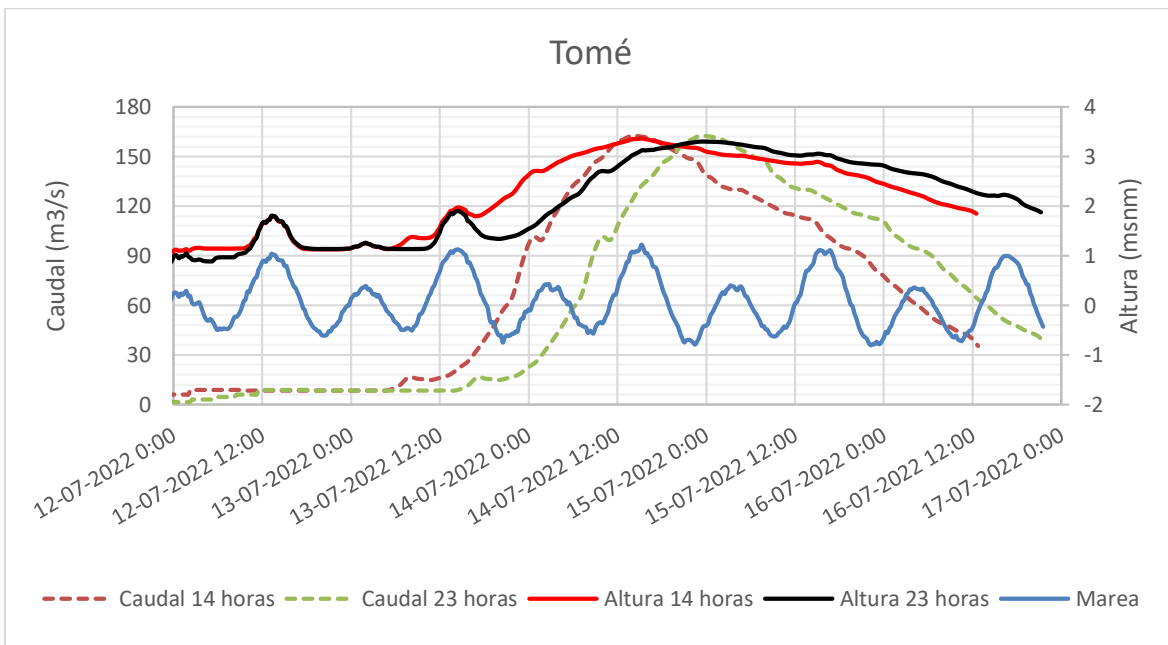


Figura 15: Gráfico comparativo caudal-marea-cota, en punto de interés, modelo Hec-Ras Tomé;
Fuente: Elaboración propia.

En la zona de Río Biobío-Lenga, con el hidrograma que posee máximo caudal a las 15 horas se generó la máxima altura de agua, en cambio a el hidrograma que posee máximo caudal a las 23 horas fue el que generó un máximo de altura menor.

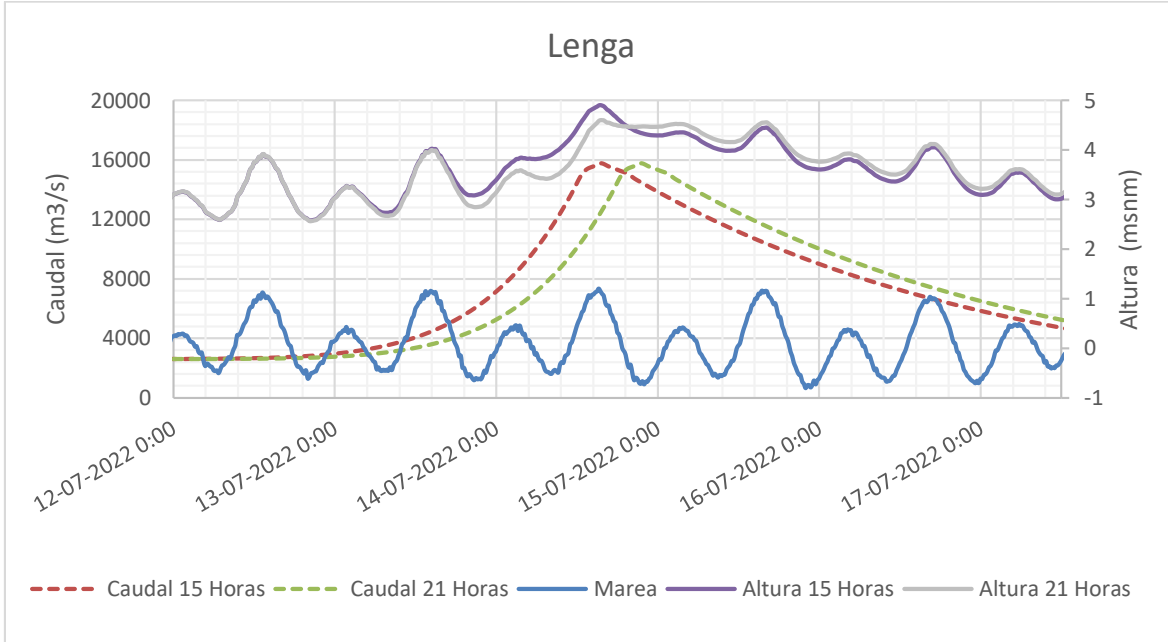


Figura 16: Gráfico comparativo caudal-marea-cota, en punto de interés, modelo Hec-Ras Río Biobío-Lenga; **Fuente:** Elaboración propia.

4.5.4. Tomé

4.5.4.1. Periodo de retorno de 20 años

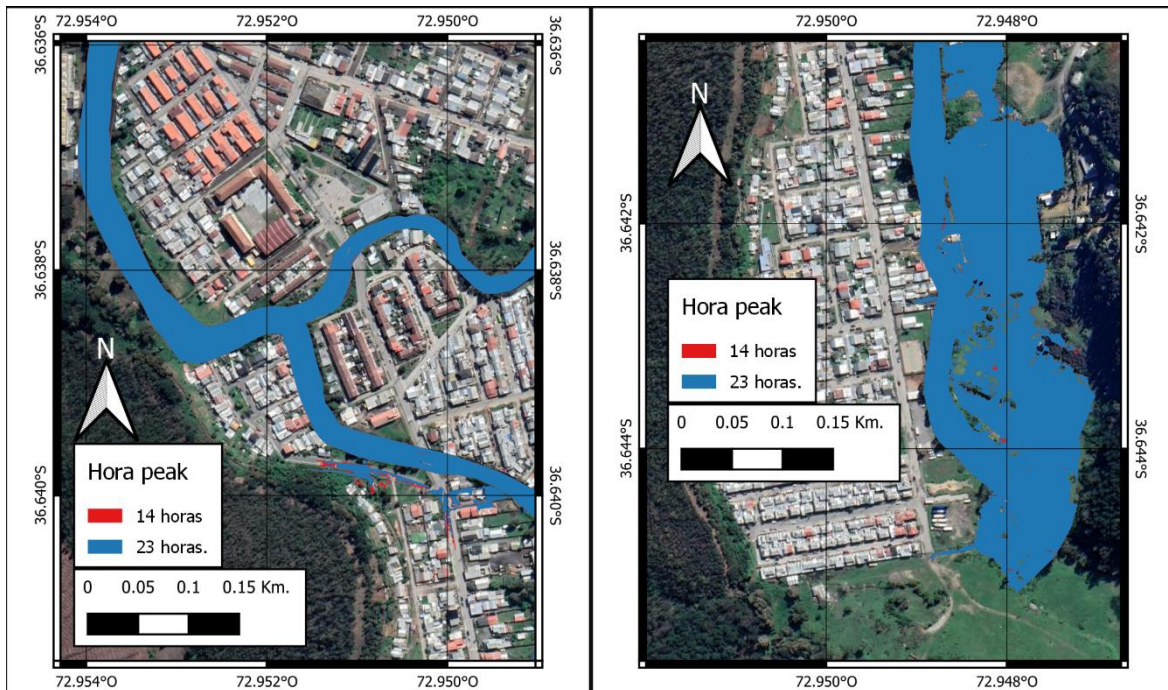


Figura 17: Mapa comparativo áreas inundadas; **Fuente:** Elaboración propia.

4.5.4.2. Periodo de retorno de 40 años

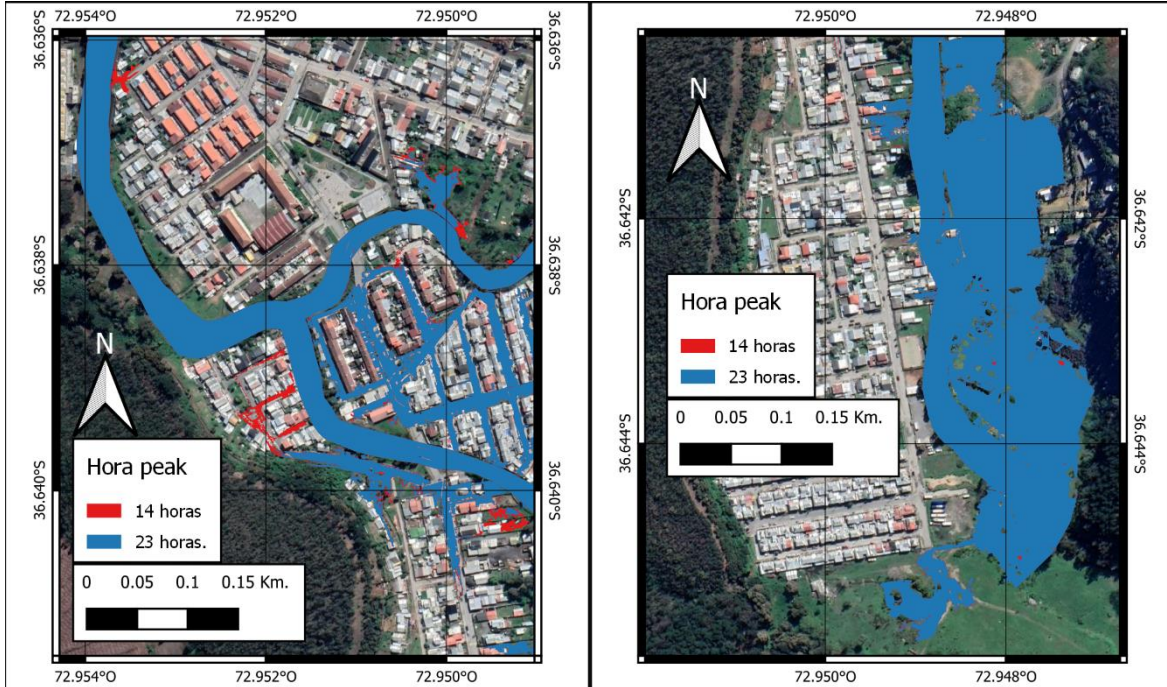


Figura 18: Mapa comparativo áreas inundadas; **Fuente:** Elaboración propia.

4.5.4.3. Periodo de retorno de 75 años

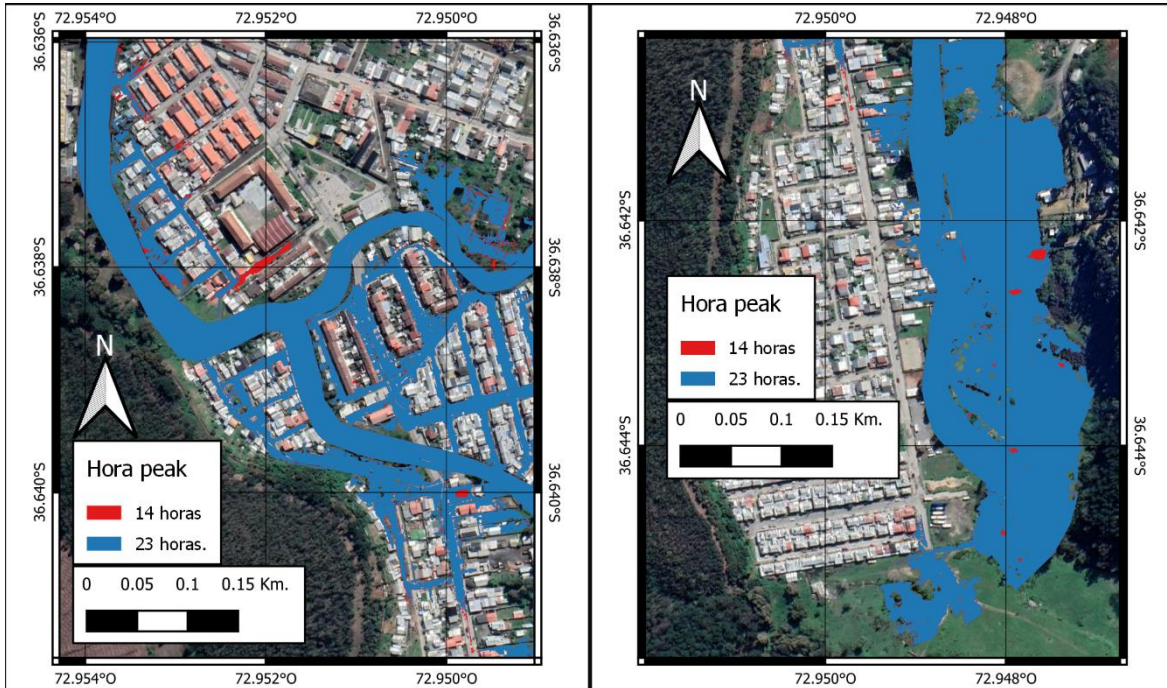


Figura 19: Mapa comparativo áreas inundadas; **Fuente:** Elaboración propia.

4.5.4.4. Periodo de retorno de 100 años

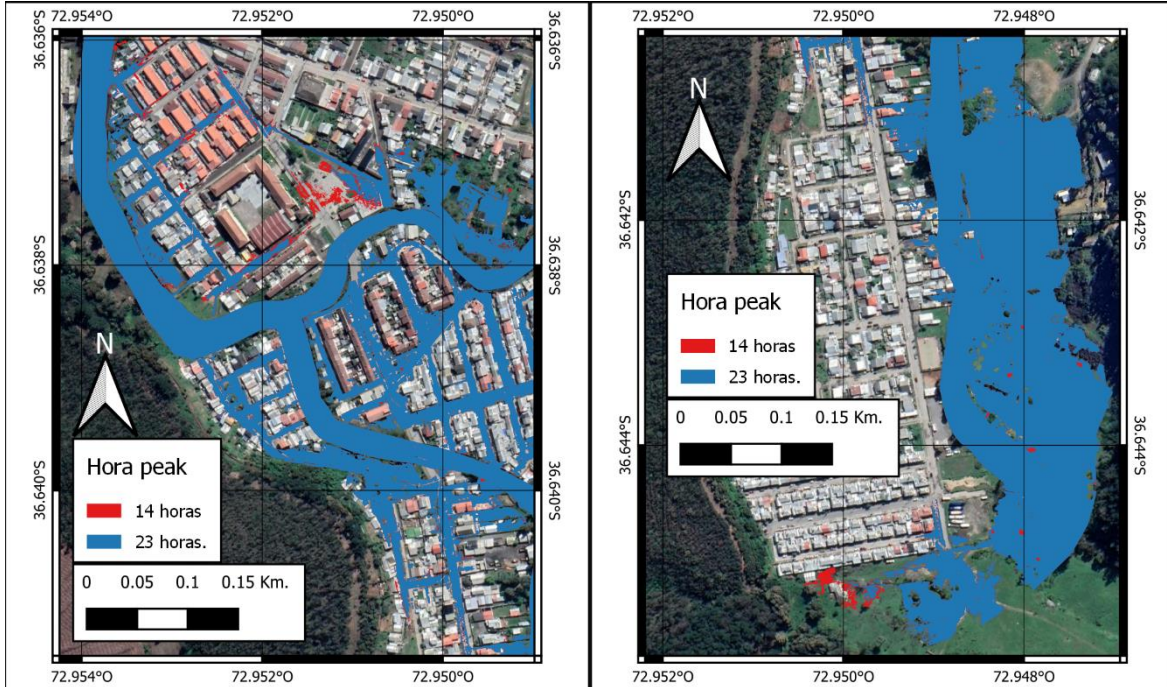


Figura 20: Mapa comparativo áreas inundadas; **Fuente:** Elaboración propia.

4.5.5. Río Biobío-Lenga

4.5.5.1. Periodo de retorno de 20 años

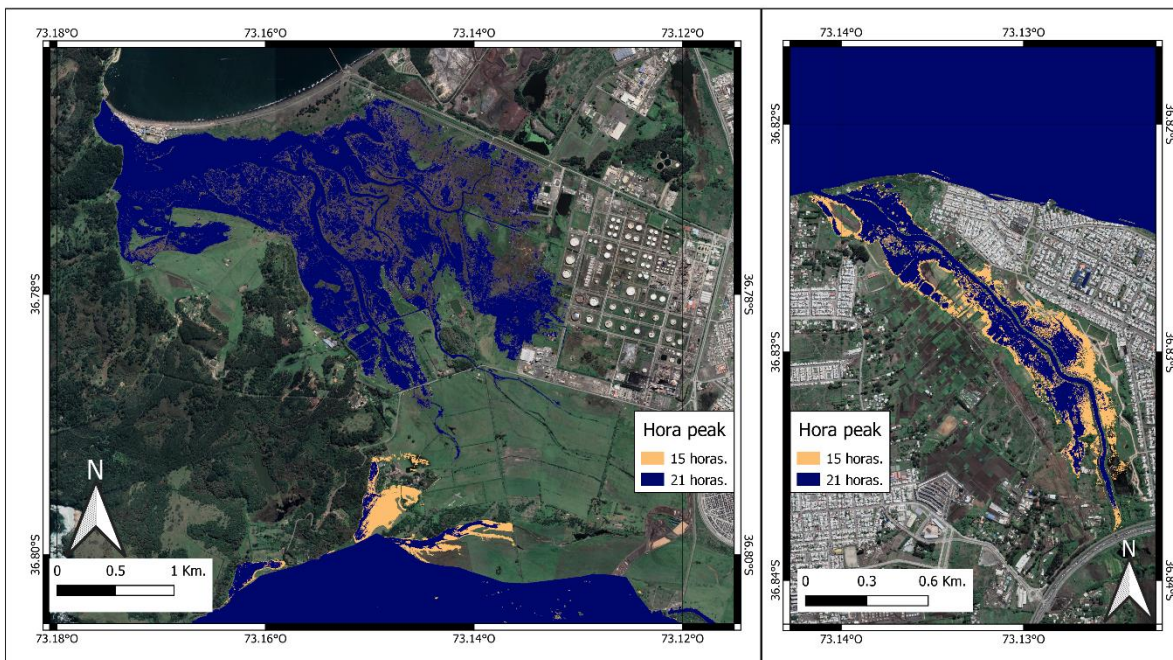


Figura 21: Mapa comparativo áreas inundadas; **Fuente:** Elaboración propia.

4.5.5.2. Periodo de retorno de 40 años

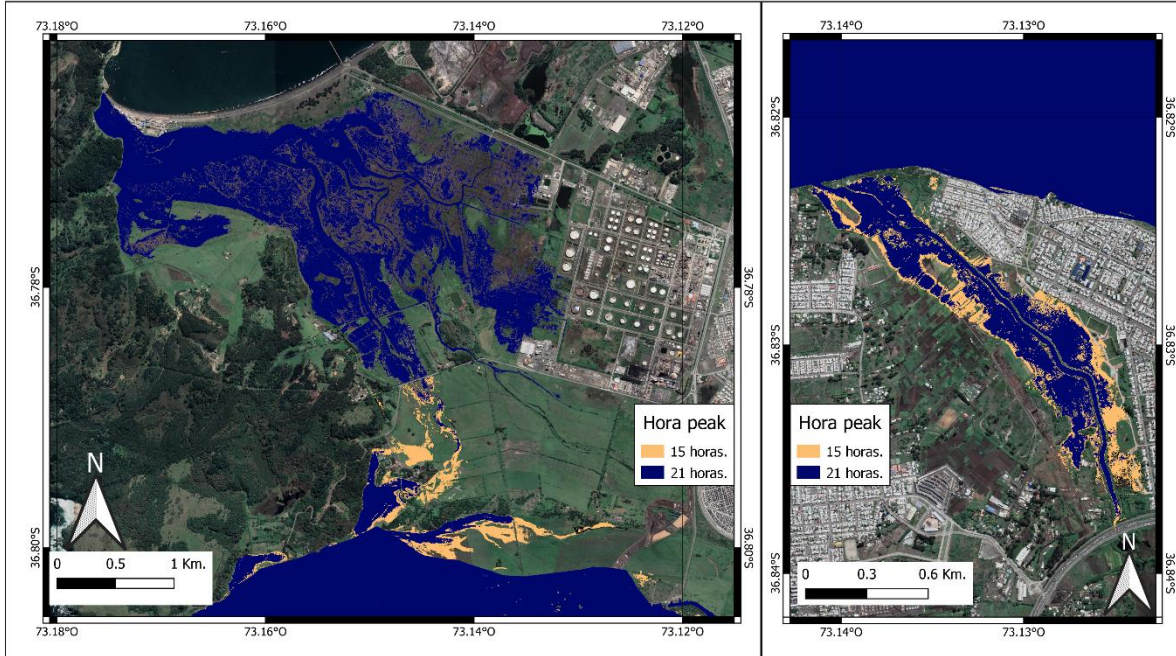


Figura 22: Mapa comparativo áreas inundadas; **Fuente:** Elaboración propia.

4.5.5.3. Periodo de retorno de 75 años

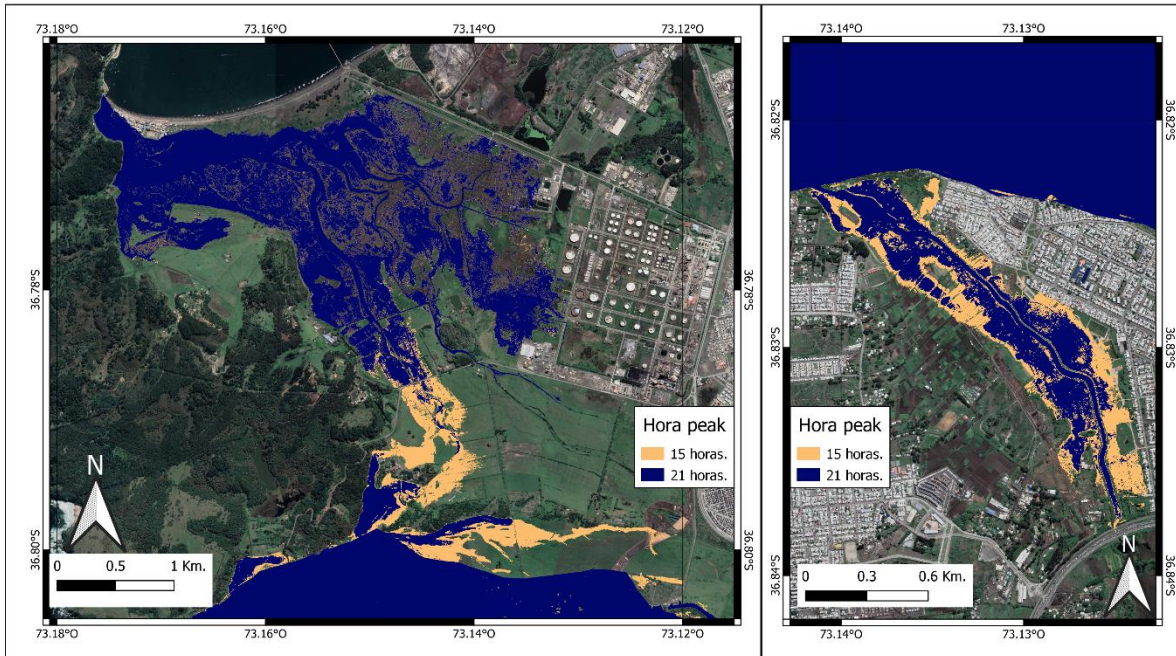


Figura 23: Mapa comparativo áreas inundadas; **Fuente:** Elaboración propia.

4.5.5.4. Periodo de retorno de 100 años

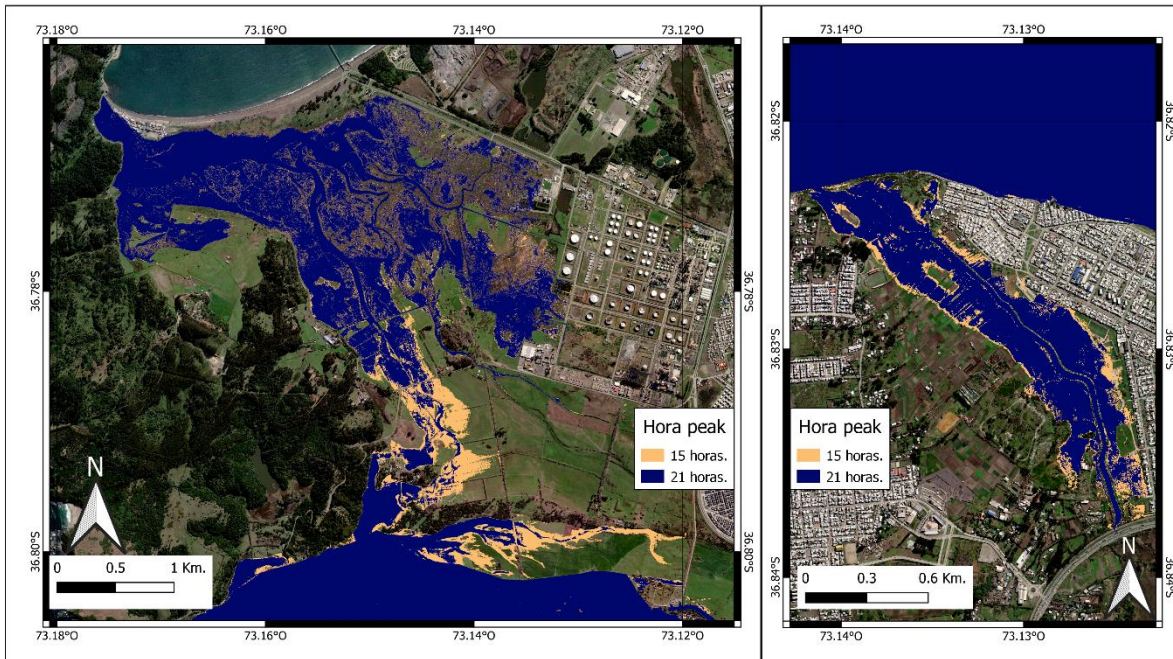


Figura 24: Mapa comparativo áreas inundadas; **Fuente:** Elaboración propia.

Los mapas de área de inundación para cada situación y periodo de retorno correspondiente al modelo de Tomé, están en los anexos desde el A al H, de la misma manera para los modelos de Río Biobío-Lenga, están en los anexos desde el I al P.

4.5.6. Resumen de resultados

4.5.6.1. Tomé

Tabla 3: Valores de altura máximos y diferencia de área, modelo de Tomé. **Fuente:** Elaboración propia.

Periodo de retorno	Cota máxima (m)		Diferencia entre Cotas máximas (cm)	Diferencia de área de inundación (m ²)
	14 horas	23 horas.		
T = 20	3.23	3.15	8	944.70
T = 40	3.44	3.37	7	3,336.78
T = 75	3.61	3.56	5	3,367.60
T = 100	3.69	3.64	5	3,792.85

4.5.6.2. Río Biobío-Lenga

Tabla 4: Valores de altura máximos y diferencia de área, modelo de Río Biobío-Lenga.

Fuente: Elaboración propia.

Periodo de retorno	Cota máxima (m)		Diferencia entre Cotas máximas (cm)	Diferencia de área de inundación (m ²)
	15 horas	21 horas.		
T = 20	4.75	4.49	26	458,919.91
T = 40	4.93	4.62	31	548,684.92
T = 75	5.09	4.75	34	1,139,325.00
T = 100	5.20	4.85	35	1,075,447.65

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se analizaron los resultados de los modelos bidimensionales ajustados a los escenarios de calibración, con la finalidad de identificar y cuantificar la incidencia de las mareas en los patrones de inundación, y determinar la sensibilidad de dichos modelos a los valores variables de mareas reales.

La recopilación de información hidrológica, sobre el terreno y topográfica de alta calidad en la zona a estudiar resulta de gran importancia, un modelo de elevación detallado permite resultados más cercanos a la realidad, así como un completo y correcto análisis hidrológico permite plantear situaciones más similares a las posibles.

Ambas zonas de estudio demuestran distintas respuestas a las situaciones planteadas. En Tomé, se demuestra que a altos periodos de retorno la incidencia de la marea es leve y no hay gran variación en las zonas inundadas, esto responde a que la zona de inundación más recurrente se encuentra aguas arriba de la confluencia entre ambos esteros, en zonas donde la marea influye en menor grado, sin embargo, la poca incidencia en cota de agua se debe a la mayor pendiente longitudinal y canalización del estero. Por otro lado, en Río Biobío-Lenga, el sector humedal Lenga y el humedal Los Batros, demuestran un comportamiento más variado, con áreas de inundación altamente influenciadas por la marea y su comportamiento, lo que se correlaciona con la topografía del sector, ya que, el humedal posee una planicie de menor pendiente y se ubica cercano a la desembocadura del río.

Llevando las situaciones a un caso más concreto. Según especificaciones de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), cada obra debe tener una altura de revancha (distancia vertical libre mínima entre el espejo de agua y la construcción) de 1 m. Ubicándonos en el río Biobío con un periodo de retorno de 40 años, se estima una diferencia de 31 cm entre la situación de mayor y de menor cota máxima en el punto de interés, lo que se expresa en una reducción en 31% de la altura de revancha. Lo anterior puede provocar cambios en el diseño de una obra y todo lo que conlleva.

Finalmente, se concluye que la incidencia de la marea en los patrones de inundación, tiene una gran relación a las características geomorfológicas del cauce a estudiar, por lo tanto, se recomienda no dejar de lado la variable de cota de marea en los modelos hidráulicos, e idealmente sea analizada como ciclos de marea y se incluya la variación de la cota de la misma en el tiempo. Todo lo anterior, con el propósito de que se generen predicciones más acertadas respecto al comportamiento de los cauces, lo que permite a su vez estudios más detallados y análisis de mejor calidad.

6. AGRADECIMIENTOS

En primera instancia quiero agradecer enormemente a mis padres Alexis y Valeska, quienes me han dado su apoyo incondicional toda mi vida, más aún en este gran proceso, y siempre me han motivado a ser cada vez mejor persona, estudiante y, en un futuro próximo, profesional. Dejando en claro que nada de esto hubiese sido posible sin ellos. También agradecer a mis hermanas, abuelo y tíos, que me han acompañado en todo momento.

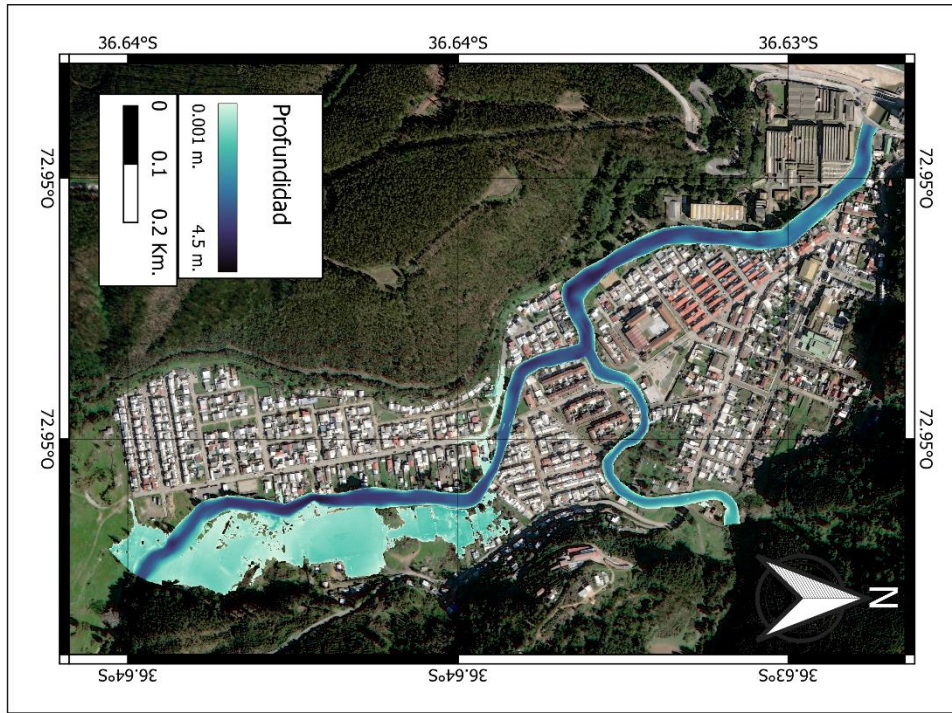
Agradecer a cada compañero que me brindo una ayuda o palabra de aliento en mi periodo universitario. Destacando a los que han estado presentes desde un inicio y más este último tiempo: Ignacio Arriagada, Rose-Marie Oróstegui, Víctor Castillo, Sebastián Matus, Nicolás Sáez, Nicolás Martínez, entre otros. Gracias por su compañía en los buenos y malos momentos.

Por último, agradecer a todos los profesores que me instruyeron durante esta travesía.

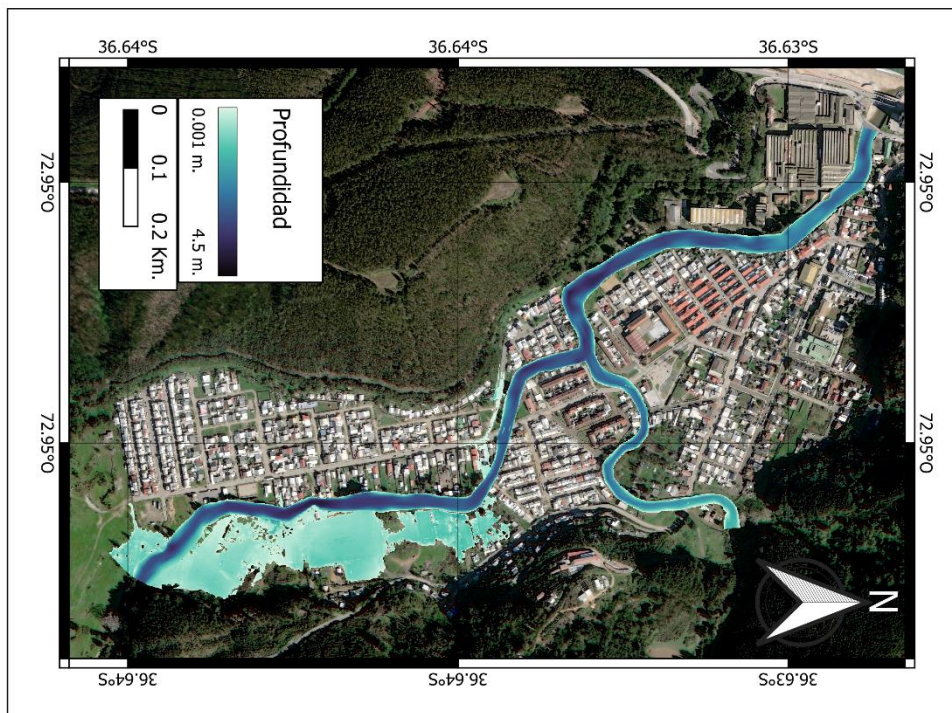
7. REFERENCIAS

- Alarcón, S., Caamaño, D., & Villagrán, M.** (2019). *Caracterización de las inundaciones fluviales del sector Bellavista, Comuna de Tomé*. 18.
- Bevacqua, E., Maraun, D., Vousdoukas, M. I., Voukouvalas, E., Vrac, M., Mentaschi, L., & Widmann, M.** (2019). Higher probability of compound flooding from precipitation and storm surge in Europe under anthropogenic climate change. *Science Advances*, 5(9), eaaw5531. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw5531>
- EM-DAT.** (2022). *2021 Disasters in numbers* [Data set]. EM-DAT. <https://doi.org/10.1787/eee82e6e-en>
- Haigh, I. D., Wadey, M. P., Wahl, T., Ozsoy, O., Nicholls, R. J., Brown, J. M., Horsburgh, K., & Gouldby, B.** (2016). Spatial and temporal analysis of extreme sea level and storm surge events around the coastline of the UK. *Scientific Data*, 3(1), 160107. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.107>
- Harrison, L. M., Coulthard, T. J., Robins, P. E., & Lewis, M. J.** (2022). Sensitivity of Estuaries to Compound Flooding. *Estuaries and Coasts*, 45(5), 1250–1269. <https://doi.org/10.1007/s12237-021-00996-1>
- HEC-RAS User's Manual.* (s. f.). 735.
- Radio Bío Bío.** (2013, junio 1). *Cerca de 400 afectados deja inundación por desborde de estero Bellavista en Tomé*. <https://www.biobiochile.cl/noticias/2013/06/01/inundaciones-por-desborde-de-rio-en-tome-esta-afectando-a-vecinos-del-sector-de-bellavista.shtml>
- Rojas, O., Mardones, M., Arumí, J. L., & Aguayo, M.** (2014). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: Causas, recurrencia y efectos geográficos. *Revista de geografía Norte Grande*, 57, 177–192. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022014000100012>
- Sa'adi, Z., Ismail, A. Z., Yusop, Z., & Mohamad Yusof, Z.** (2022). Effect of the tide on flood modeling and mapping in Kota Tinggi, Johor, Malaysia. *Natural Hazards*, 112(3), 2053–2081. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05256-4>
- Soberon, A.** (2015). *RASTREO DE LA CRECIDA MAXIMA REGISTRADA EN EL RIO BIOBIO, APLICADO A LA VERIFICACION HIDRAULICA DEL PUENTE LLACOLEN, REGION DEL BIOBIO, CHILE*.
- Van Heemst, C., Willems, J., Weller, A., Van Verseveld, H., Caamaño, D., & Aránguiz, R.** (2013). Flood defence alternatives for the lower Bío Bío River, Chile. *Obras y Proyectos*, 14, 22–33. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132013000200002>
- Yévenes, J., Caamaño, D., & Villagrán, M.** (2022). *Cuantificación amenaza por inundación fluvial para comunidad Caleta Lengua, Comuna de Hualpén*.
- Zheng, F., Westra, S., & Sisson, S. A.** (2013). Quantifying the dependence between extreme rainfall and storm surge in the coastal zone. *Journal of Hydrology*, 505, 172–187. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.054>

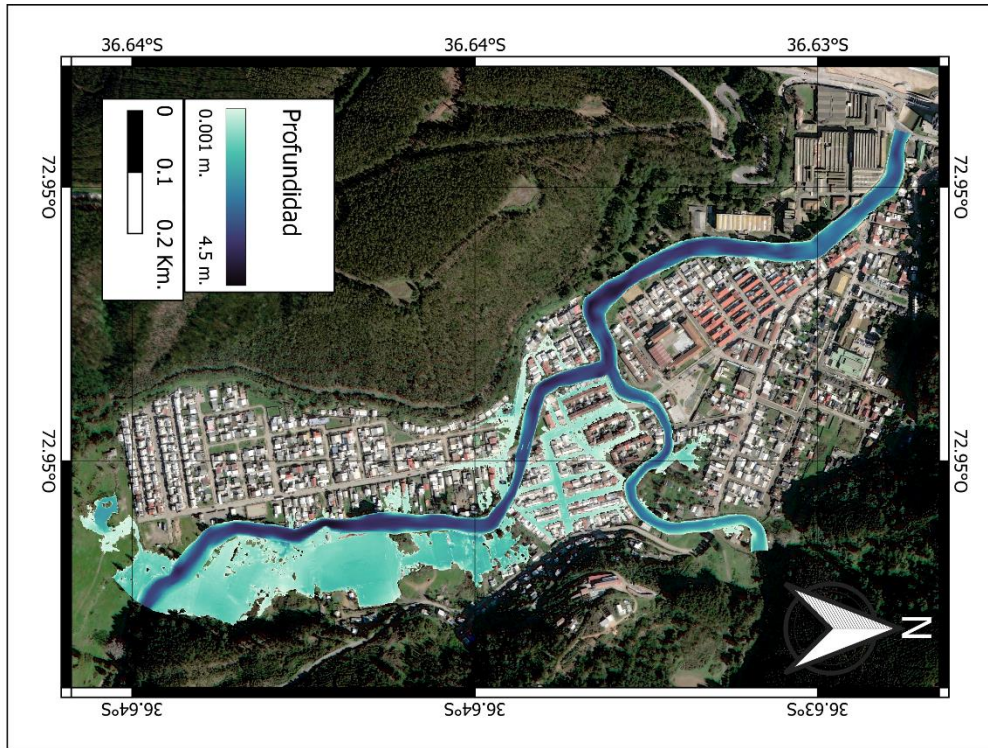
8. ANEXOS



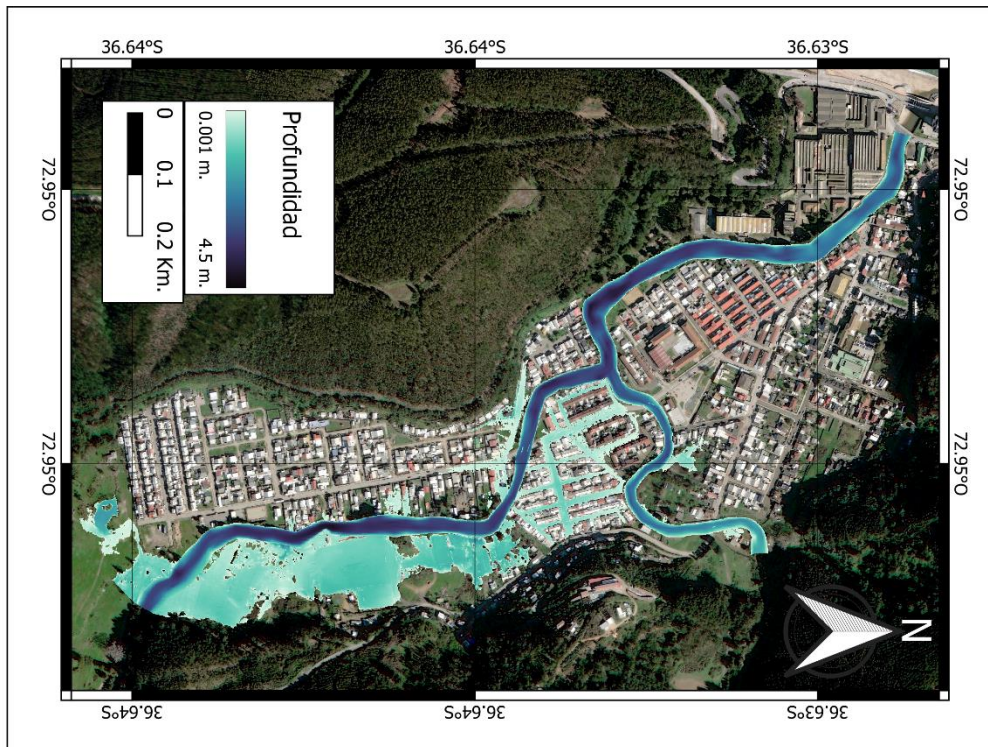
ANEXO A: Mapa de profundidades, modelo 14 horas, T = 20 años, Tomé. **Fuente:** Elaboración propia.



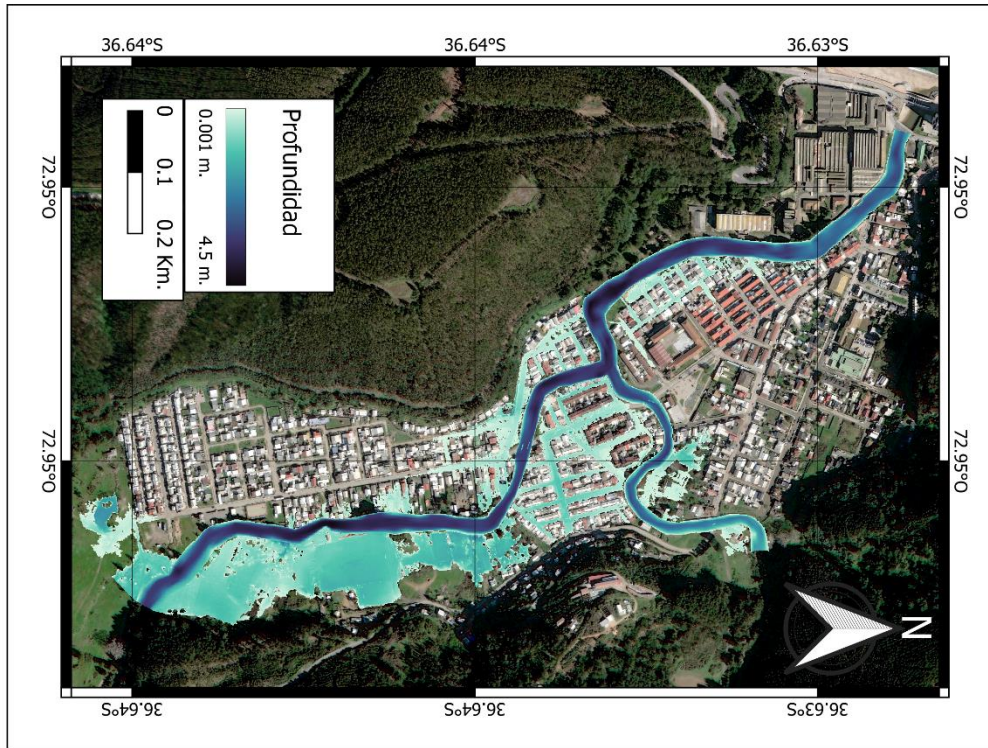
ANEXO B: Mapa de profundidades, modelo 23 horas, T = 20 años, Tomé. **Fuente:** Elaboración propia.



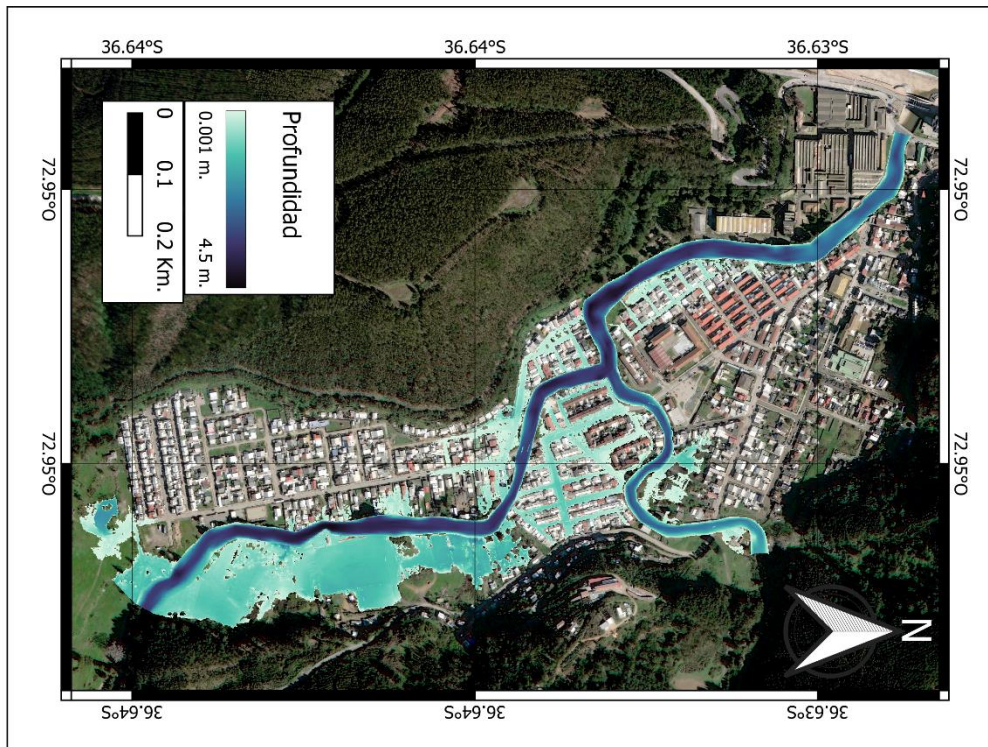
ANEXO C: Mapa de profundidades, modelo 14 horas, T = 40 años, Tomé. **Fuente:** Elaboración propia.



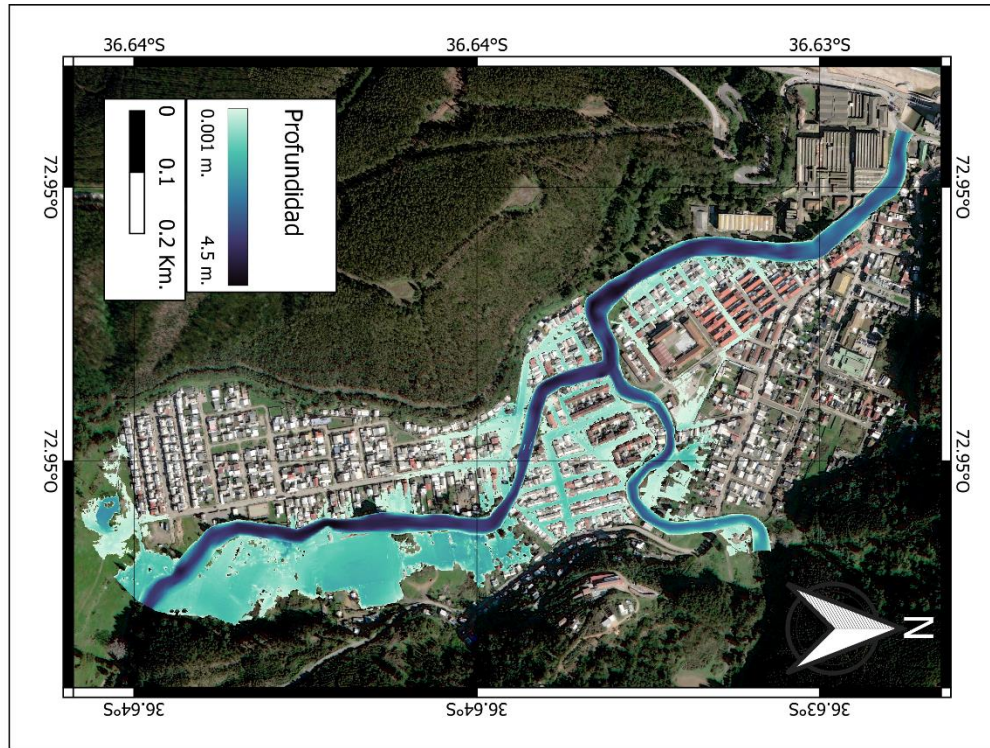
ANEXO D: Mapa de profundidades, modelo 23 horas, T = 40 años, Tomé. **Fuente:** Elaboración propia.



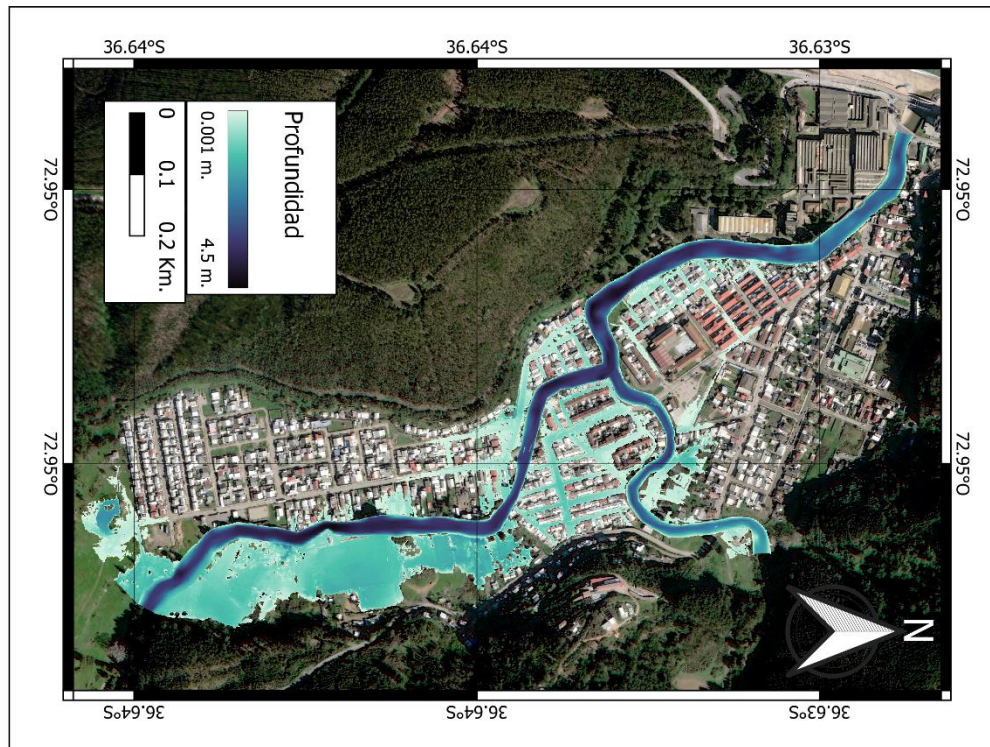
ANEXO E: Mapa de profundidades, modelo 14 horas, T = 75 años, Tomé. **Fuente:** Elaboración propia.



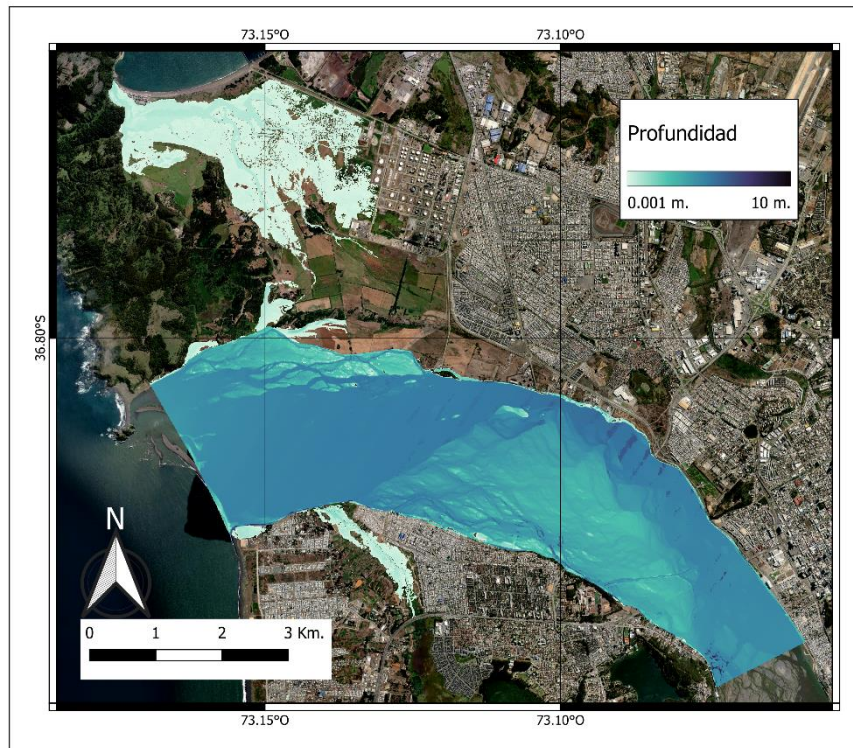
ANEXO F: Mapa de profundidades, modelo 23 horas, T = 75 años, Tomé. **Fuente:** Elaboración propia.



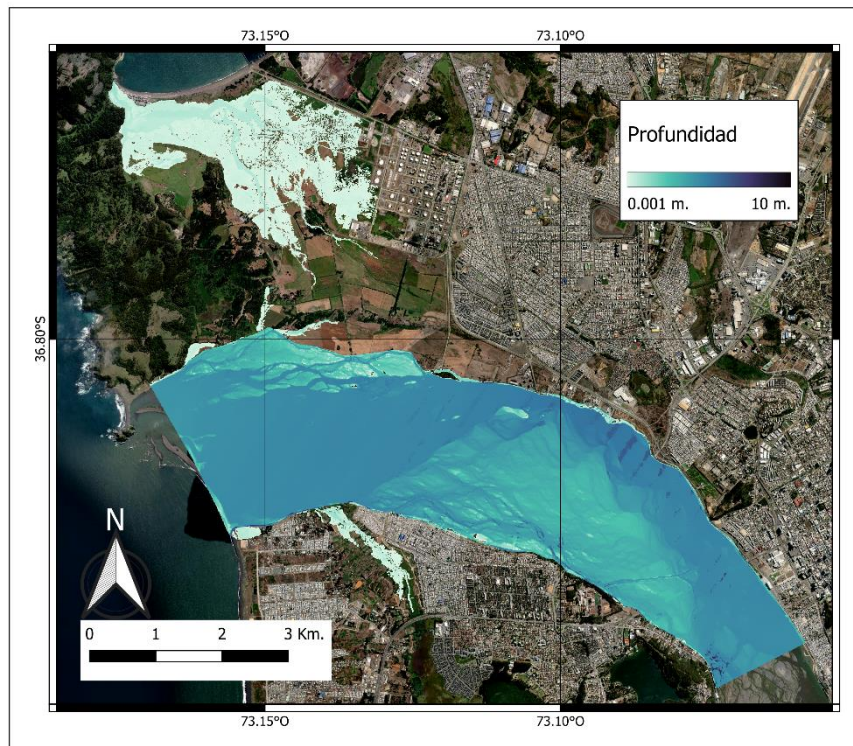
ANEXO G: Mapa de profundidades, modelo 14 horas, T = 100 años, Tomé. **Fuente:** Elaboración propia.



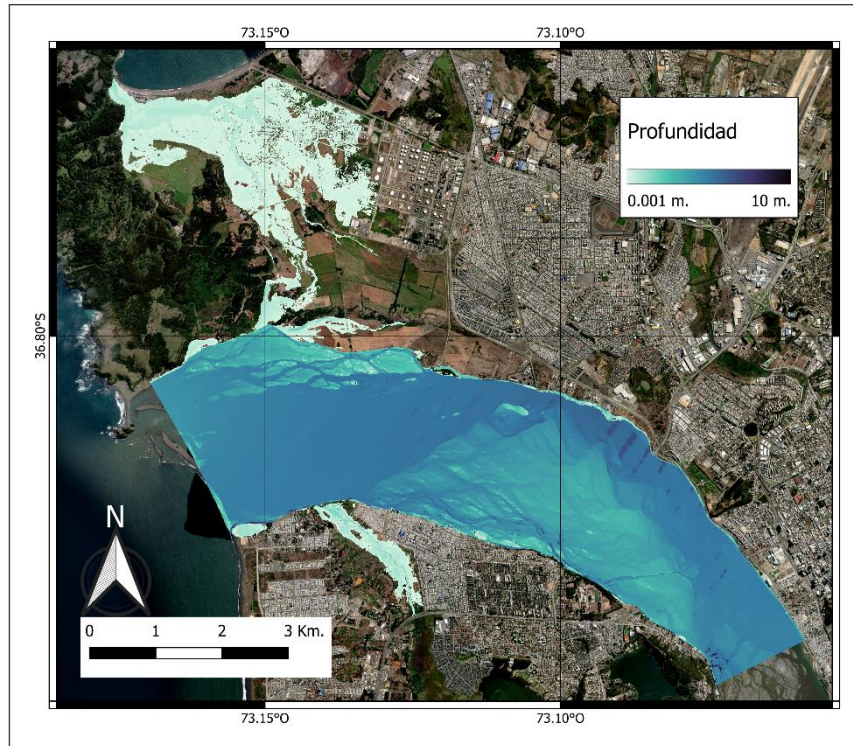
ANEXO H: Mapa de profundidades, modelo 23 horas, T = 100 años, Tomé. **Fuente:** Elaboración propia.



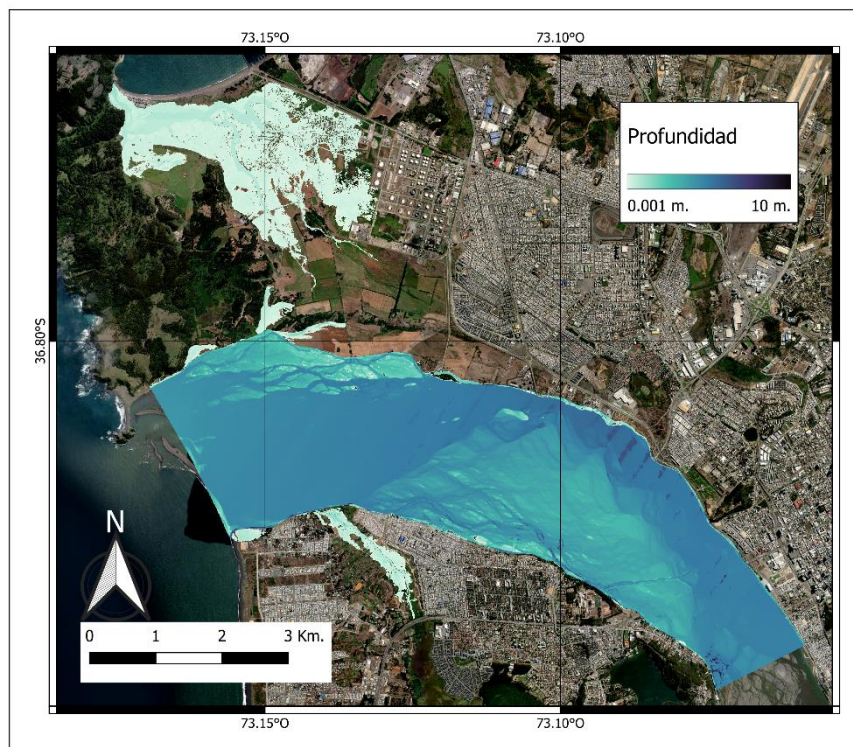
ANEXO I: Mapa de profundidades, modelo 15 horas, T = 20 años, Río Biobío. **Fuente:** Elaboración propia.



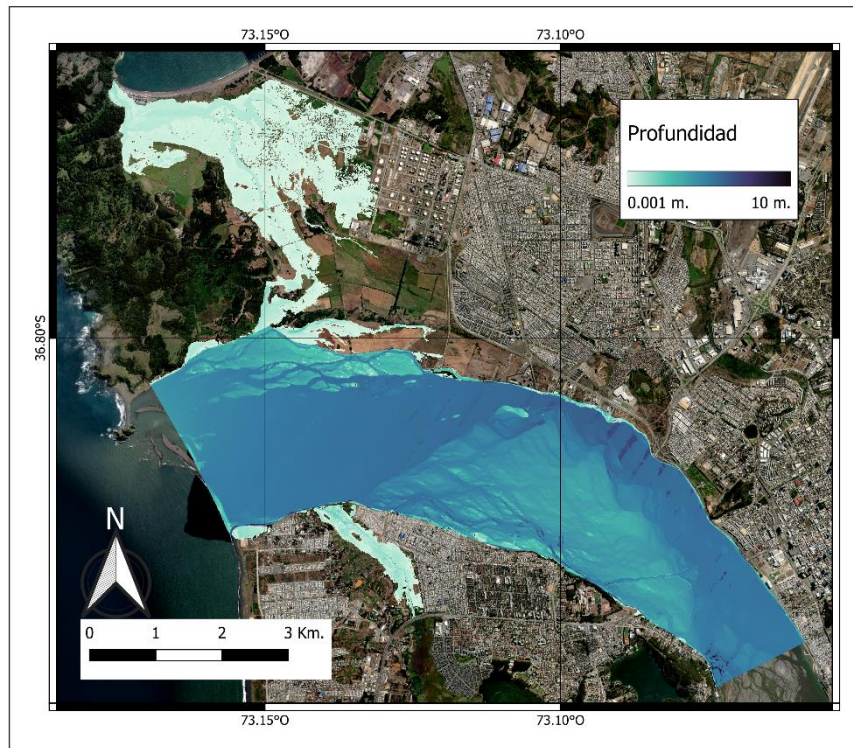
ANEXO J: Mapa de profundidades, modelo 21 horas, T = 20 años, Río Biobío. **Fuente:** Elaboración propia.



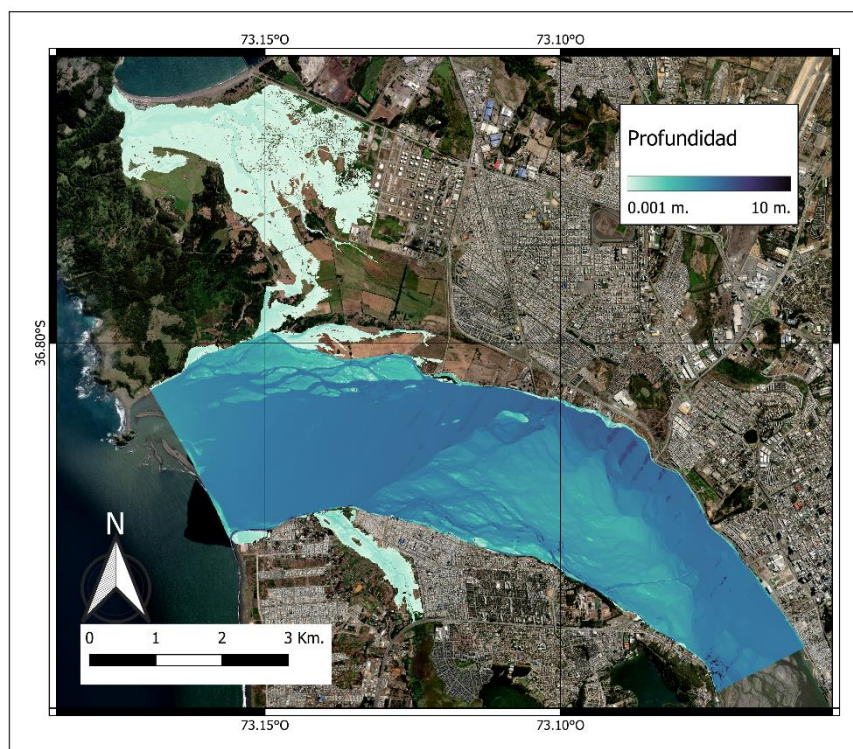
ANEXO K: Mapa de profundidades, modelo 15 horas, T = 40 años, Río Biobío. **Fuente:** Elaboración propia.



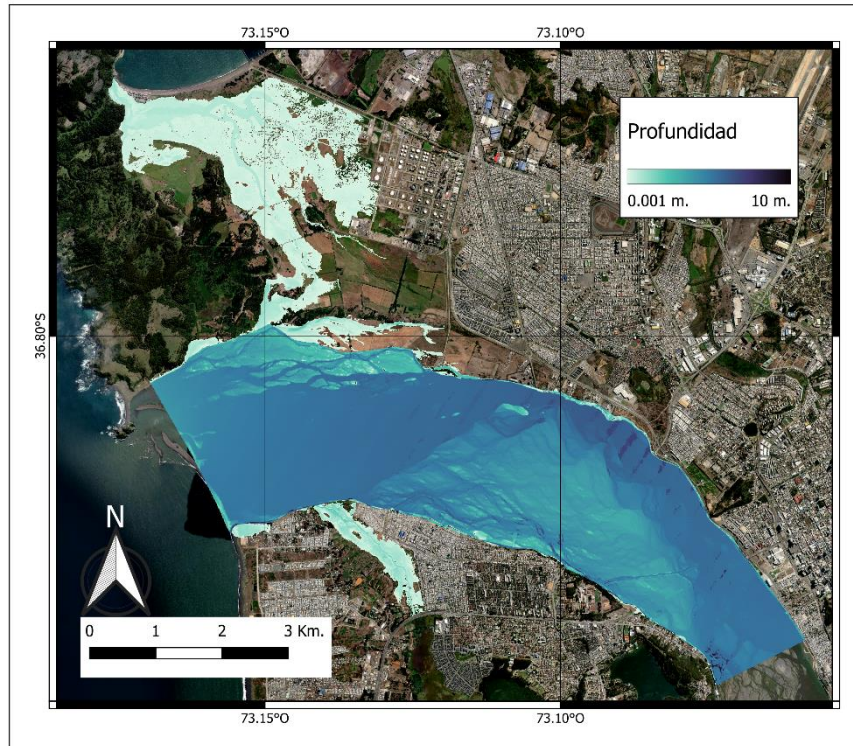
ANEXO L: Mapa de profundidades, modelo 21 horas, T = 40 años, Río Biobío. **Fuente:** Elaboración propia.



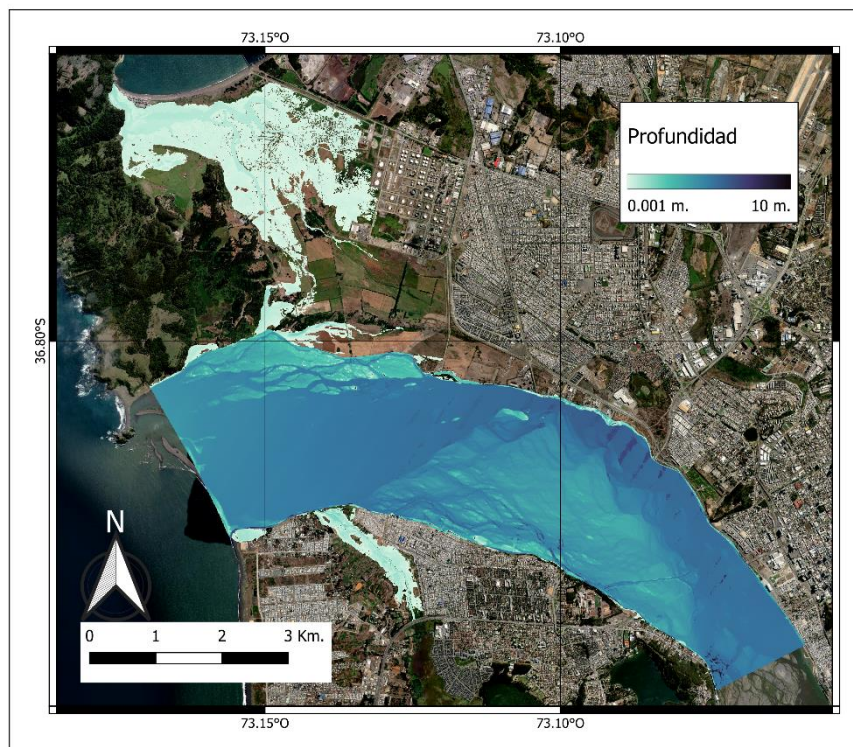
ANEXO M: Mapa de profundidades, modelo 15 horas, T = 75 años, Río Biobío. **Fuente:** Elaboración propia.



ANEXO N: Mapa de profundidades, modelo 21 horas, T = 75 años, Río Biobío. **Fuente:** Elaboración propia.



ANEXO O: Mapa de profundidades, modelo 15 horas, T = 100 años, Río Biobío. **Fuente:** Elaboración propia.



ANEXO P: Mapa de profundidades, modelo 21 horas, T = 100 años, Río Biobío. **Fuente:** Elaboración propia.