



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE HIDROLOGÍA**

ESTUDIO HIDRÁULICO Y MODELACIÓN RÍO TRAFAMPULLI

**REALIZADO POR:
OITEC HIDRÁULICA Y MEDIO
AMBIENTE LIMITADA**

S.I.T. N° 525

Santiago, Noviembre 2022

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

MINISTRO DE OBRAS PÚBLICAS
Sr. Juan Carlos García P.

DIRECTOR GENERAL DE AGUAS
Sr. Rodrigo Sanhueza Bravo

JEFE DIVISIÓN DE HIDROLOGÍA
Sr. Luis Alberto Moreno Rubio

INSPECTOR FISCAL
Sr. Marco Larenas Contreras

Preparado por:
OITEC Hidráulica y Medio Ambiente Limitada

JEFE DE PROYECTO
Dr. Alex García L.

PROFESIONALES
Ingeniero Civil Jordan Flores J.
Ingeniero Civil Fernando Henríquez G.
Ingeniero Civil Cristian Adonay B.

Citar este informe como sigue:

Dirección General de Aguas (DGA), 2022. **ESTUDIO HIDRÁULICO Y MODELACIÓN RÍO TRAFAMPULLI**, SIT N°525, MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS, DIVISIÓN DE HIDROLOGÍA. Realizado por: OITEC Hidráulica y Medio Ambiente Limitada.

Índice de contenidos

1	Resumen	1
2	Introducción	3
3	Objetivos.....	6
3.1	General.....	6
3.2	Específicos.....	6
4	Zona de estudio	7
5	Aforos de caudal.....	8
6	Levantamiento Topo-Batimétrico	10
6.1	Monumentación y Vinculación de Puntos de referencia	11
6.2	Levantamiento Batimétrico Mediante GPS Geodésico	13
6.3	Levantamiento Topográfico Mediante LiDAR Aerotransportado	14
6.4	Vuelo Aerofotogramétrico mediante dron.....	15
6.5	Procesamiento de datos	15
7	Análisis Hidrológico.....	17
7.1	Generalidades.....	17
7.2	Caudales medios mensuales	17
7.2.1	Registros fluviométricos	17
7.2.2	Factores de corrección	19
7.2.3	Resultados de caudales medios mensuales	20
7.3	Caudales de crecida.....	20
7.3.1	Análisis de precipitaciones	20
7.3.2	Cuenca Hidrográfica	23
7.3.3	Coeficientes de escorrentía.....	24
7.3.4	Tiempo de concentración.....	24
7.3.5	Intensidad de precipitación.....	25
7.3.6	Método Racional.....	27
7.3.7	Método DGA-AC	28
7.3.8	Método de Verni-King modificado	29
7.3.9	Comparación de métodos	30
7.3.10	Hidrograma de crecida	30
8	Análisis Hidráulico	34
8.1	Modelaciones consideradas.....	35
8.2	Parámetros de modelación	36
8.3	Malla de cálculo.....	36
8.4	Calibración del modelo	38
8.5	Coeficientes de Manning.....	38
8.6	Condiciones iniciales	40
8.7	Condiciones de contorno	40

8.8	Resultados	41
8.8.1	Inundación caudales medios mensuales	41
8.8.2	Inundación caudales de crecida.....	47
8.8.3	Evolución hidrograma de crecida	51
8.8.4	Capacidad de porteo máxima.....	52
8.8.5	Caudal aportante al lago Caburgua.....	53
9	Conclusiones.....	55
10	Referencias Bibliográficas	56
Anexo 1:	Calibración modelo hidráulico	57

Índice de figuras

Figura 1: Ubicación del Proyecto.....	3
Figura 2: Fotografías áreas de la zona de intervención.	4
Figura 3: Fotografías áreas y terrestres de la planicie de inundación en el sector de intervención.....	5
Figura 4: Emplazamiento de Zona de Estudio.....	7
Figura 5: Fotografía área de flujo sobre la planicie aguas abajo del desvío.....	7
Figura 6: Ubicación de aforos realizados.....	8
Figura 7: Aforo con ADV Flowtracker 2.....	9
Figura 8: Polígono a levantar.....	10
Figura 9: Punto de referencia en terreno PR-1.....	11
Figura 10: Punto de referencia en terreno PR-2.....	12
Figura 11: Puntos de Referencia del proyecto.....	12
Figura 12: Levantamiento de puntos batimétricos mediante GPS geodésico.....	13
Figura 13: Vuelo realizado para levantamiento mediante sistema LiDAR.....	14
Figura 14: Nube de puntos generada mediante plataforma LiDARit (sin procesar).....	14
Figura 15: Fotografías capturadas en vuelo aerofotogramétrico.....	15
Figura 16: Ortomosaico de proyecto.....	16
Figura 17: Modelo digital del terreno generado.....	16
Figura 18: Cuenca aportante a zona de estudio y estaciones fluviométricas en Río Trafampulli.....	18
Figura 19: Cuencas en sector de estudio y estación fluviométrica "Río Trafampulli en Rinconada".....	19
Figura 20: Ubicación de estaciones meteorológicas analizadas.....	21
Figura 21: Ajuste de datos a la distribución Normal precipitación máxima en 24 horas.....	22
Figura 22: Cuenca hidrográfica drenante a zona de estudio.....	23
Figura 23: Línea de tendencia Coeficientes de duración 1 a 24 horas.....	26
Figura 24: Línea de tendencia Coeficientes de duración menores a una hora.....	26
Figura 25: Hidrograma de crecida obtenido para un periodo de retorno de 2 años.....	33
Figura 26: Distribución de tamaños de elementos de malla utilizada.....	37
Figura 27: Malla de cálculo utilizada.....	37
Figura 28: Planicies de inundación del río Trafampulli.....	39
Figura 29: Distribución de coeficientes de Manning.....	39
Figura 30: Profundidades obtenidas para Caudal Medio Mensual, Enero.....	41
Figura 31: Profundidades obtenidas para Caudal Medio Mensual, Febrero.....	42
Figura 32: Profundidades obtenidas para Caudal Medio Mensual, Marzo.....	42
Figura 33: Profundidades obtenidas para Caudal Medio Mensual, Abril.....	43
Figura 34: Profundidades obtenidas para Caudal Medio Mensual, Mayo.....	43
Figura 35: Profundidades obtenidas para Caudal Medio Mensual, Junio.....	44
Figura 36: Profundidades obtenidas para Caudal Medio Mensual, Julio.....	44
Figura 37: Profundidades obtenidas para Caudal Medio Mensual, Agosto.....	45

Figura 38: Profundidades obtenidas para Caudal Medio Mensual, Septiembre.....	45
Figura 39: Profundidades obtenidas para Caudal Medio Mensual, Octubre.....	46
Figura 40: Profundidades obtenidas para Caudal Medio Mensual, Noviembre.....	46
Figura 41: Profundidades obtenidas para Caudal Medio Mensual, Diciembre.....	47
Figura 42: Profundidades obtenidas para Caudal de Crecida período de retorno 2 años.	47
Figura 43: Profundidades obtenidas para Caudal de Crecida período de retorno 5 años.	48
Figura 44: Profundidades obtenidas para Caudal de Crecida período de retorno 10 años.	48
Figura 45: Profundidades obtenidas para Caudal de Crecida período de retorno 25 años.	49
Figura 46: Profundidades obtenidas para Caudal de Crecida período de retorno 50 años.	49
Figura 47: Profundidades obtenidas para Caudal de Crecida período de retorno 100 años.	50
Figura 48: Profundidades obtenidas para Caudal de Crecida período de retorno 150 años.	50
Figura 49: Profundidades obtenidas para Capacidad Máxima de Porteo, Río Trafampulli.	52
Figura 50: Profundidades obtenidas para desborde, caudal 21.5 m ³ /s.	53
Figura 51: Curva de descarga, desbordes del río Trafampulli hacia el Lago Caburgua.	54
Figura 52: Puntos de calibración utilizados.....	57
Figura 53: Resultados obtenidos para zona T-ARR.	59
Figura 54: Resultados obtenidos para zona T-ABA.	59
Figura 55: Resultados obtenidos para zona DESB.	60

Índice de tablas

Tabla 1: Resultados hidráulicos de cada aforo.	9
Tabla 2: Puntos de Referencia (UTM, Datum WGS84, Huso 19 Sur).	11
Tabla 3: Caudales Medios Mensuales en estación "Río Trafampulli en Rinconada", m ³ /s.	18
Tabla 4: Factor de Corrección.....	19
Tabla 5: Caudales Medios Mensuales en estación "Río Trafampulli en Rinconada", m ³ /s.	20
Tabla 6: Descripción estaciones meteorológicas analizadas.	21
Tabla 7: Precipitaciones Máximas Anuales, mm.	21
Tabla 8: Resultados del Análisis Estadístico de Precipitaciones.....	22
Tabla 9: Parámetros morfométricos de las cuencas.	23
Tabla 10: Factores de Coeficiente de Escorrentía.	24
Tabla 11: Coeficiente de Escorrentía.	24
Tabla 12: Métodos de cálculo tiempo de concentración.....	24
Tabla 13: Tiempos de Concentración.....	25
Tabla 14: Coeficientes de duración.	26
Tabla 15: Intensidades de precipitación para distintos periodos de retorno.	27
Tabla 16: Caudales de crecida para distintos periodos de retorno, método racional. ...	28
Tabla 17: Valores de QTQ10	28
Tabla 18: Valores de QMD ¹⁰ y Q ¹⁰ para la cuenca.	29
Tabla 19: Caudales de crecida para distintos periodos de retorno, método DGA-AC. .	29
Tabla 20: Valores de CT.	29
Tabla 21: Caudales para periodo de retorno 100 años, método Verni-King Modificado.	29
Tabla 22: Caudales para distintos periodos de retorno mediante los métodos propuestos (m ³ /s).	30
Tabla 23: Parámetros calculados para el hidrograma unitario sintético.	31
Tabla 24: Coeficientes de distribución para el hidrograma unitario sintético.	31
Tabla 25: Hidrograma de crecida obtenido para un periodo de retorno de 2 años.....	33
Tabla 26: Modelaciones consideradas.....	35
Tabla 27: Parámetros utilizados en la modelación realizada.	36
Tabla 28: Resumen calibración realizada.	38
Tabla 29: Condiciones de contorno utilizadas en cada modelación considerada.....	40
Tabla 30: Evolución de la crecida del hidrograma simulado para distintos tiempos de análisis.....	51
Tabla 31: Caudales excedentes hacia el Lago Caburgua.....	53
Tabla 32: Detalle de perfiles analizados para realizar calibración.	57
Tabla 33: Escenarios de calibración considerados.	58
Tabla 34: Resultados calibración para la zona T-ARR.....	58
Tabla 35: Resultados calibración para la zona T-ABA.....	59

Tabla 36: Resultados calibración para la zona DESB.....	60
Tabla 37: Resumen calibración realizada.	60

1 Resumen

La Dirección General de Aguas (D.G.A.) ha solicitado establecer las condiciones hidráulicas en que se desarrolla el flujo del río Trafampulli en las inmediaciones del Lago Caburgua. La zona sujeta al presente estudio se ubica inmediatamente al norte del Lago Caburgua, comuna de Cunco, provincia de Cautín, región de La Araucanía.

El objetivo de este estudio es determinar los aportes de escorrentía superficial del río Trafampulli hacia el Lago Caburgua para escenarios de caudales medios mensuales y escenarios de crecidas extremas.

En la visita a terreno se pudo constatar que el cauce del río Trafampulli se encuentra intervenido con una obra de captación rudimentaria que capta agua desde el río y la conduce por unos 50 metros hacia la planicie de inundación, para luego escurrir por el terreno hacia el lago Caburgua. Para las condiciones observadas durante la campaña de terreno se aforó un caudal total de $4.767 \text{ m}^3/\text{s}$ para el río Trafampulli, de los cuales, el 19% drenaba hacia el lago Caburgua y el 81% restante continuaba hacia aguas abajo.

Para evaluar los aportes naturales que el río Trafampulli drena hacia el lago Caburgua se realizó un levantamiento topográfico, un estudio hidrológico para determinar los caudales de crecida y caudales medios mensuales, y posteriormente se efectuó un análisis hidráulico mediante el modelo hidráulico bidimensional Iber. Esto permitió determinar la capacidad máxima del río Trafampulli antes de desbordar y la distribución de caudales del río hacia aguas abajo respecto de lo que drena hacia el lago.

Los caudales medios mensuales para el río Trafampulli en la zona de estudio van desde los $0.68 \text{ m}^3/\text{s}$ a los $6.64 \text{ m}^3/\text{s}$, asociados a los meses de febrero y junio respectivamente. Los caudales de crecida, asociados a periodos de retorno de 2 a 150 años, están comprendidos entre los $59.19 \text{ m}^3/\text{s}$ y $130.17 \text{ m}^3/\text{s}$. Por otro lado, las crecidas en la zona analizada tendrían una duración estimada de 15 horas, alcanzándose el caudal peak de la crecida aproximadamente a las 5 horas de iniciado el evento de precipitación.

Los resultados de la modelación hidráulica indican que la capacidad de porteo del río Trafampulli es de $20.5 \text{ m}^3/\text{s}$; por lo tanto, no presentaría aportes de caudal superficial hacia el lago Caburgua para caudales menores, entre los que está la serie completa de caudales medios mensuales. Por otro lado, para caudales de crecida sí se producirían aportes hacia el lago, que irían desde el 5% del caudal total para un período de retorno de 2 años hasta un 15% del caudal total para un período de retorno de 150 años.

Con los antecedentes desarrollados se puede concluir que el río Trafampulli en condiciones naturales no drena agua superficialmente hacia el lago Caburgua para

condiciones normales de flujo, y sólo presentaría aportes durante eventos de tormenta relevantes, los cuales representarían un volumen limitado dada su corta duración.

2 Introducción

La Dirección General de Aguas (DGA) ha solicitado establecer las condiciones hidráulicas en que se desarrolla el flujo del río Trafampulli en las inmediaciones del Lago Caburgua. La zona sujeta al presente estudio se ubica inmediatamente al norte del Lago Caburgua, comuna de Cunco, provincia de Cautín, región de La Araucanía (Figura 1).

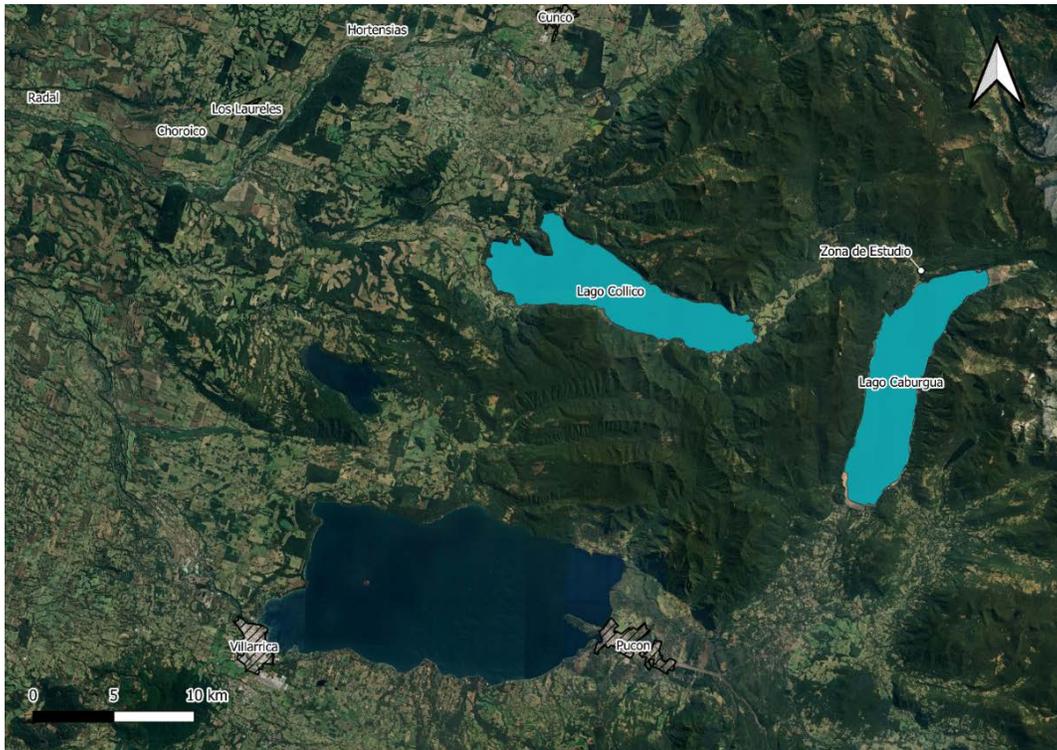


Figura 1: Ubicación del Proyecto.

El río Trafampulli actualmente se encuentra intervenido, drenando un porcentaje considerable de su caudal hacia su ribera izquierda, para luego escurrir por el terreno hacia el lago Caburgua, tal como puede apreciarse en la Figura 2.

El tramo intervenido corresponde a un canal rudimentario, excavado, de unos 50m de largo, sin un final definido, en donde se desvanece sobre el terreno natural. Consecuentemente, el agua que se capta desde el río Trafampulli escurre sobre terreno eminentemente terrestre de la planicie de inundación, y no sobre un cauce definido, para luego dirigirse hacia el lago Caburgua. En la Figura 3 se presentan fotografías de la zona, donde se aprecia el flujo sobre vegetación terrestre y de zonas húmedas, entre arbustos terrestres, lo que indica que la obra existente no genera condiciones hidráulicas naturales para el sector.

Consecuentemente, es necesario desarrollar un estudio que permita caracterizar el comportamiento hidráulico natural del río Trafampulli en la zona de intervención.



Figura 2: Fotografías áreas de la zona de intervención.



Figura 3: Fotografías aéreas y terrestres de la planicie de inundación en el sector de intervención.

3 Objetivos

3.1 General

Establecer las condiciones hidráulicas en que se desarrolla el flujo del río Trafampulli en las inmediaciones del Lago Caburgua.

3.2 Específicos

- Establecer las características topográficas del entorno en estudio.
- Realizar estudio hidrológico para establecer caudales medios mensuales y caudales de crecida en el punto de interés.
- Modelar el tramo del río Trafampulli en estudio mediante software de modelación 2D para distintos escenarios hidrológicos y determinar caudales excedentes que drenen desde el río Trafampulli hacia el lago Caburgua.

Para lo anterior, se hizo una revisión de antecedentes hidrológicos, se realizaron mediciones e inspecciones en terreno, para posteriormente realizar un análisis hidrológico e hidráulico en la zona de estudio.

4 Zona de estudio

La zona de estudio se ubica referencialmente en las coordenadas UTM (m) N: 5.672.237 y E: 261.180, datum WGS84, Huso 19 sur, en la comuna de Cunco, provincia de Cautín, región de La Araucanía, según se presenta en la Figura 4.



Figura 4: Emplazamiento de Zona de Estudio.

Se puede observar que existe una intervención que desvía las aguas del río Trafampulli hacia el lago Caburgua, la cual posee una longitud aproximada de 800 metros y un área de inundación dispersa a lo largo de la planicie sin presentar un cauce definido (Figura 5)



Figura 5: Fotografía área de flujo sobre la planicie aguas abajo del desvío.

5 Aforos de caudal

Se realizaron tres aforos en la zona de estudio, el primero ubicado en la zona de intervención que desvía las aguas del río Trafampulli hacia el Lago Caburgua (Aforo N° 1), el segundo en el río Trafampulli aguas abajo del desvío (Aforo N° 2) y el ultimo en el río Trafampulli aguas arriba del desvío (Aforo N° 3). En la Figura 6 se presenta la ubicación de cada aforo.

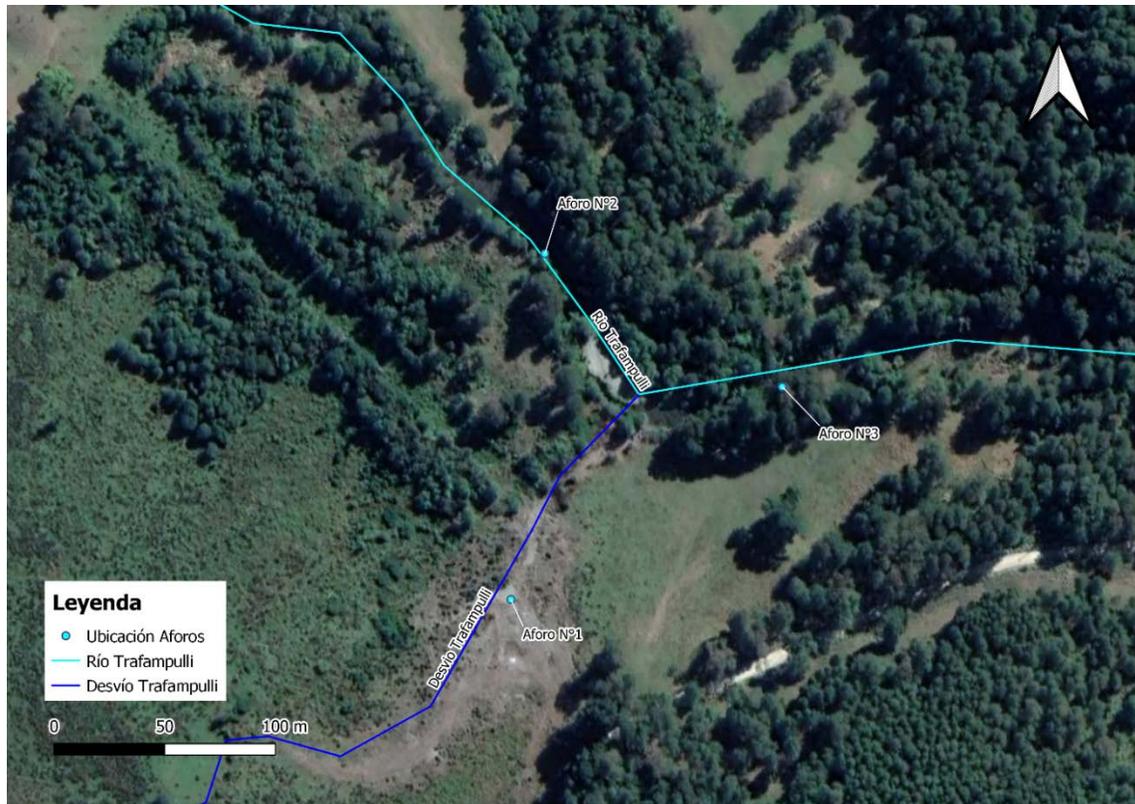


Figura 6: Ubicación de aforos realizados.

Para el registro de datos de velocidad de cada aforo se utilizó un correntímetro acústico Doppler (ADV) marca Sontek modelo Flowtracker 2 (Figura 7), mediante el método de vadeo. Los resultados obtenidos de cada aforo se presentan en la Tabla 1, donde se tiene un caudal total de $4.767 \text{ m}^3/\text{s}$ para el río Trafampulli. Se observa una diferencia de 4% entre el caudal aforado aguas arriba respecto de la suma de los otros dos aforos, lo que está en el rango aceptable de error para este tipo de mediciones.

Tabla 1: Resultados hidráulicos de cada aforo.

Aforo	Ancho sección (m)	Velocidad media (m/s)	Área sección (m ²)	Caudal (m ³ /s)
N°1	8.4	0.63	1.52	0.958
N°2	10.7	0.68	5.91	4.023
N°3	17.0	0.70	6.85	4.767



Figura 7: Aforo con ADV Flowtracker 2.

6 Levantamiento Topo-Batimétrico

Se realizó una campaña de levantamiento topo-batimétrico en la zona de estudio de manera de caracterizar el río Trafampulli y su planicie de inundación, que en su margen izquierdo presenta pendiente con dirección hacia el lago Caburgua. La ubicación del área levantada en relación con las rutas existentes y los cuerpos de agua se muestra en la Figura 8. El polígono levantado presenta un área aproximada de 21.5 ha.

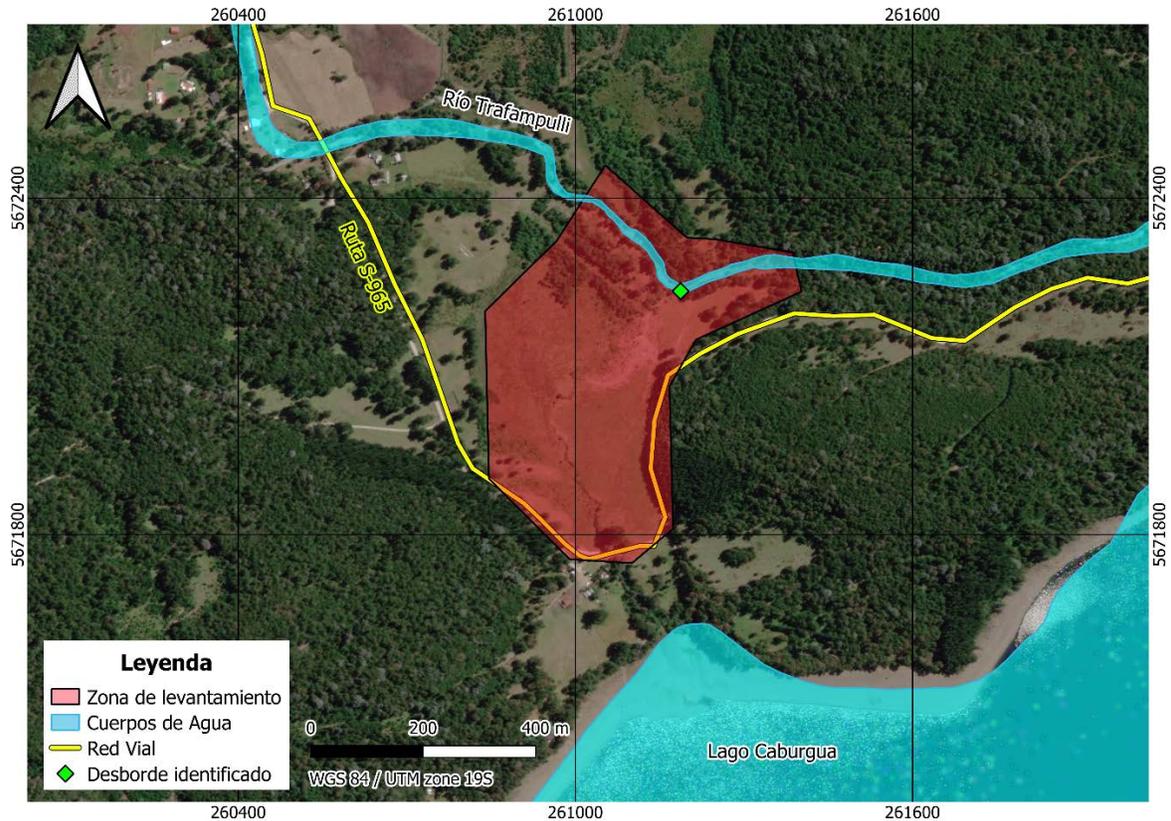


Figura 8: Polígono a levantar.

6.1 Monumentación y Vinculación de Puntos de referencia

Se monumentaron dos PRs, uno cercano a la zona de desborde del Río Trafampulli y otro a un costado de la ruta S-965. Estos dos PRs se levantaron con GPS RTK vinculándolos al punto IGM BIENES NACIONALES TEMUCO3 (ID: BN89).

En la Tabla 2 se indican las coordenadas y elevación de los puntos de referencia, en las Figura 9 y Figura 10 se muestra en terreno el PR-1 y PR-2, respectivamente. En la Figura 11 se presenta la ubicación de los puntos de referencia del proyecto.

Tabla 2: Puntos de Referencia (UTM, Datum WGS84, Huso 19 Sur).

PR	Este (m)	Norte (m)	Cota (m)
PR-1	261158.202	5672204.735	498.749
PR-2	261201.590	5672115.954	501.515



Figura 9: Punto de referencia en terreno PR-1.



Figura 10: Punto de referencia en terreno PR-2.

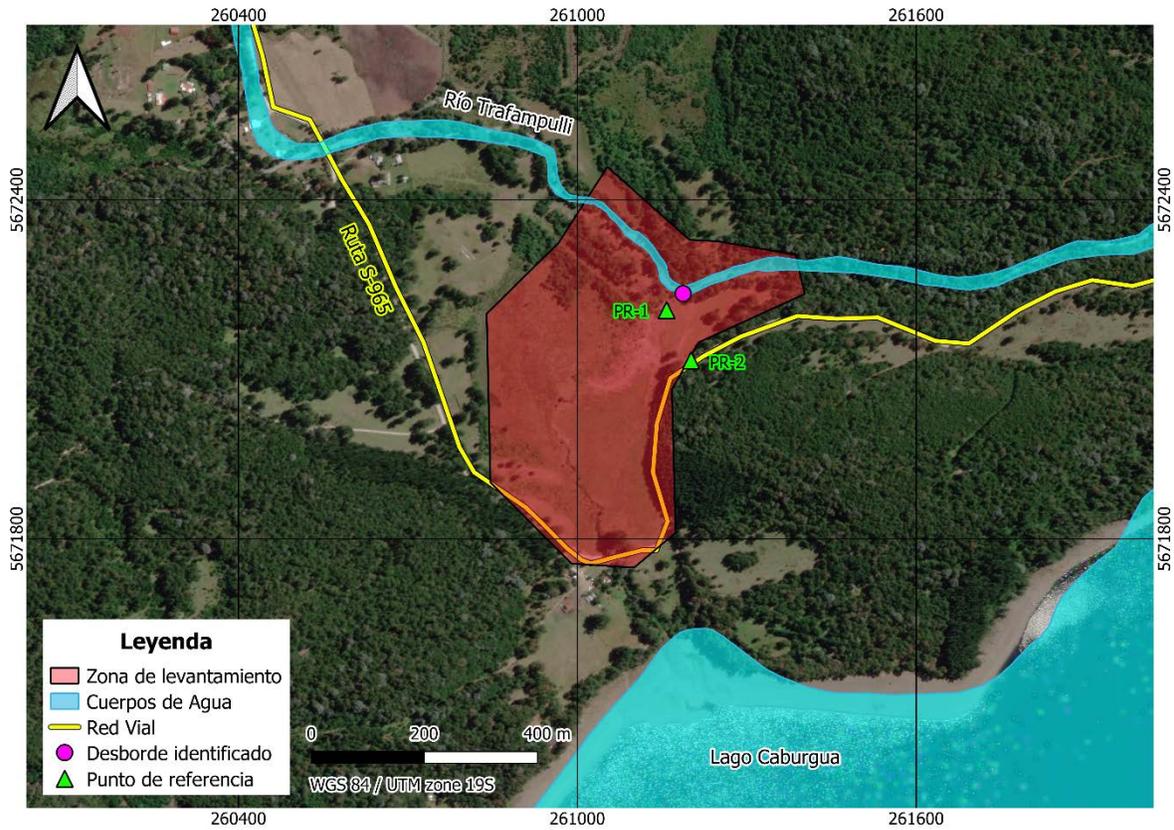


Figura 11: Puntos de Referencia del proyecto.

6.2 Levantamiento Batimétrico Mediante GPS Geodésico

El levantamiento batimétrico del cauce en la zona de estudio se realizó mediante GPS geodésico multifrecuencia marca Spectra Precision modelo SP60, levantando puntos en perfiles transversales del cauce y definiendo sus respectivos límites.

En la Figura 12 se muestran fotografías de los trabajos realizados en el cauce para el levantamiento de puntos batimétricos.



Figura 12: Levantamiento de puntos batimétricos mediante GPS geodésico.

6.3 Levantamiento Topográfico Mediante LiDAR Aerotransportado

El levantamiento topográfico se realizó mediante escaneo LiDAR aerotransportado en dron, realizando un vuelo que cubriera todo el polígono de interés a levantar.

En la Figura 13 se muestra la ruta de vuelo realizada para la captura de datos mediante el sistema LiDAR y en la Figura 14 se presenta la nube de puntos obtenida mediante la plataforma LiDARit.

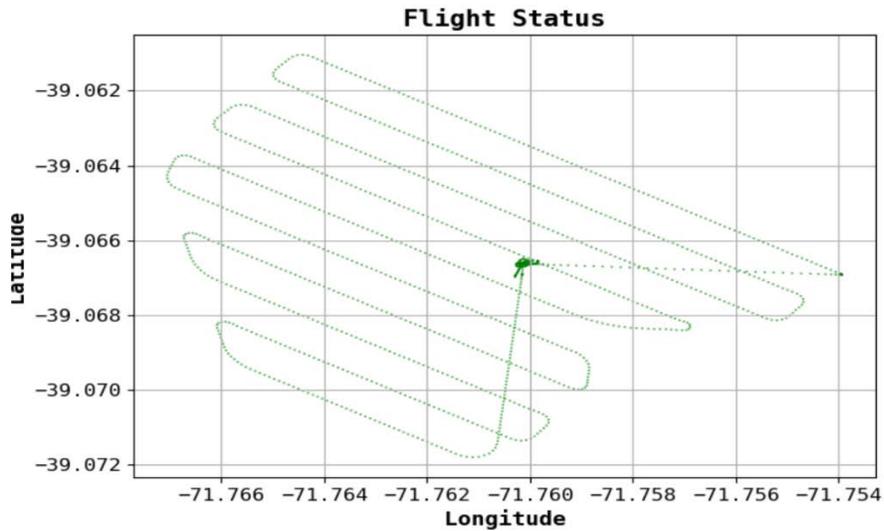


Figura 13: Vuelo realizado para levantamiento mediante sistema LiDAR.

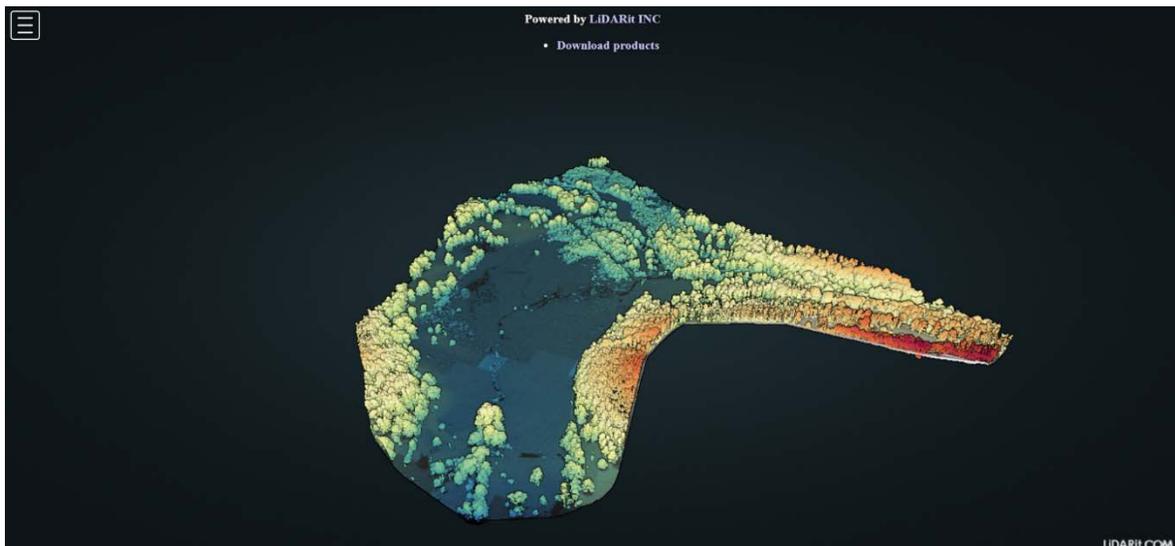


Figura 14: Nube de puntos generada mediante plataforma LiDARit (sin procesar).

6.4 Vuelo Aerofotogramétrico mediante dron

La aerofotogrametría para obtener la Ortomosaico de la zona de estudio se realizó mediante dron, ejecutando un vuelo que cubriera todo el polígono de interés a levantar.

En la Figura 15 se muestran las fotografías realizadas en el vuelo aerofotogramétrico.

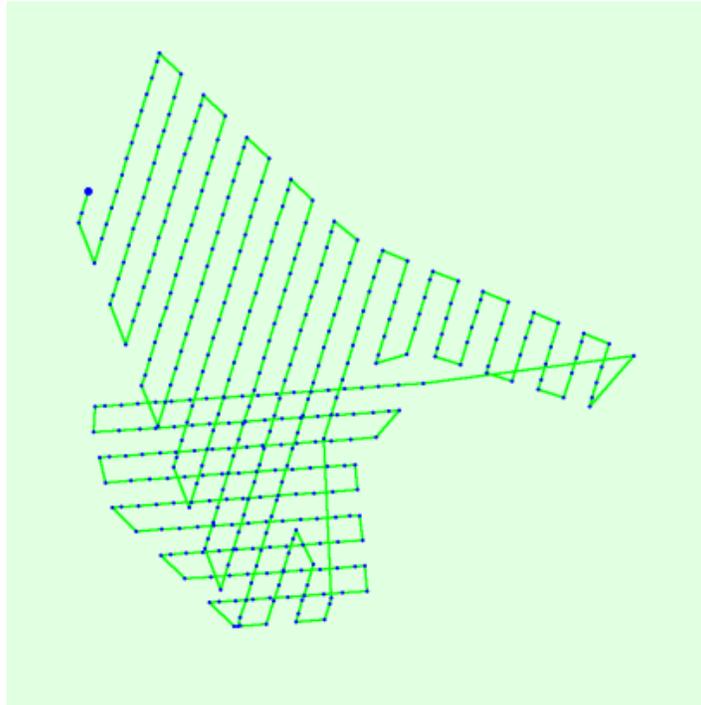


Figura 15: Fotografías capturadas en vuelo aerofotogramétrico.

6.5 Procesamiento de datos

La información fotogramétrica fue procesada en el software Pix4D para generar el ortomosaico (Figura 16). En el caso del sistema LiDAR la plataforma LiDARit entrega la nube de puntos procesada y filtrada. Dado lo anterior se utilizó el software Global Mapper para combinar la topografía del terreno capturada mediante LiDAR y la batimetría capturada mediante GPS, así se procedió a la generación de las curvas de nivel del terreno y modelos digital del terreno (Figura 17).

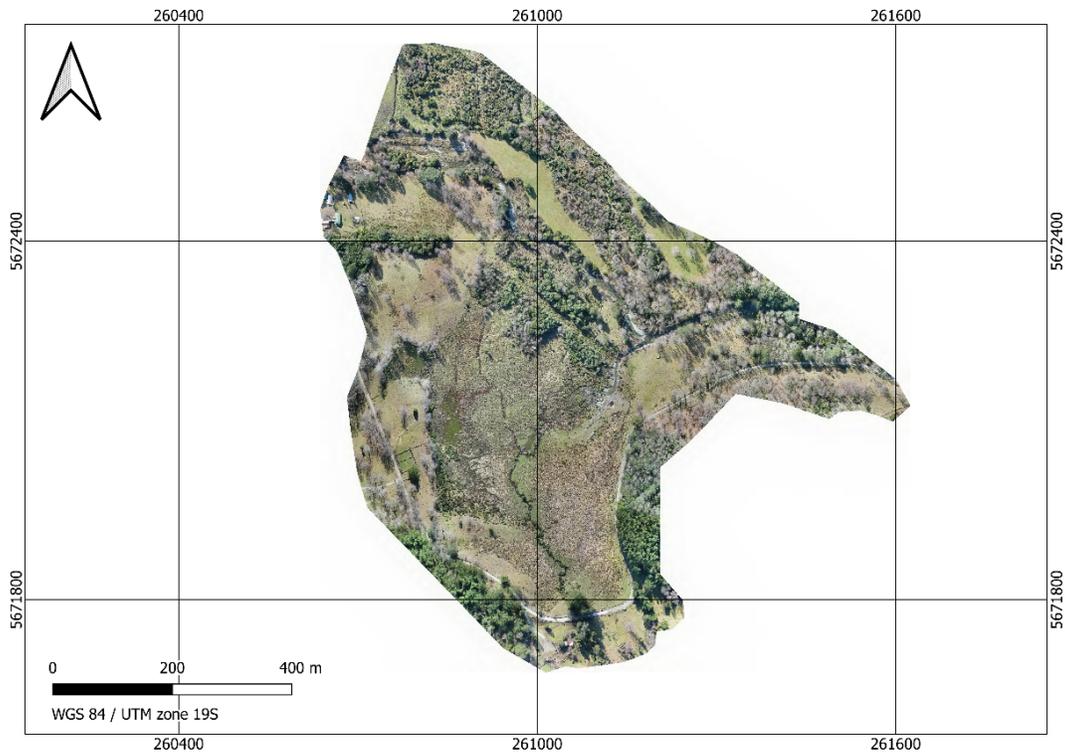


Figura 16: Ortomosaico de proyecto.

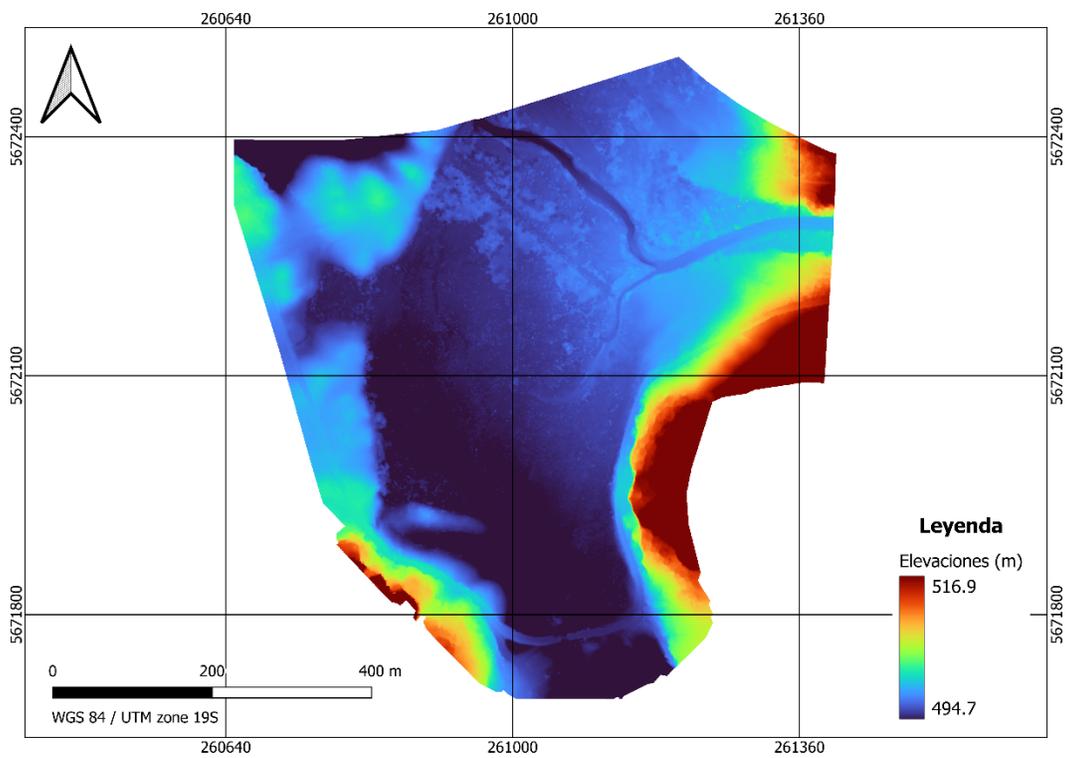


Figura 17: Modelo digital del terreno generado.

7 Análisis Hidrológico

7.1 Generalidades

La zona a estudiar posee una estación fluviométrica ubicada unos 12 km aguas abajo de la zona en estudio. La estación fluviométrica cuenta con un registro corto de caudales medios mensuales, con los cuales, a través del método de transposición de cuencas, se obtuvieron caudales medios mensuales en el sector de interés.

Por su parte, la estimación de caudales para diferentes periodos de retorno se realizó según lo indicado en el "Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica" de la Dirección General de Aguas (DGA). Por lo tanto, se calcularán los caudales de crecida según los métodos DGA-AC, Verni King Modificado y Método Racional.

7.2 Caudales medios mensuales

A continuación, se presenta la estimación de caudales medios mensuales en la zona de estudio mediante transposición de cuencas.

7.2.1 Registros fluviométricos

La cuenca del Río Trafampulli cuenta con registros fluviométricos en dos estaciones las cuales corresponden a "Río Trafampulli en Rinconada" (Cód. BNA 09405007-3) y "Río Trafampulli en Puente N°5" (Cód. BNA 09405009-K), la ubicación de las estaciones se presenta en la Figura 18.

La estación "Río Trafampulli en Puente N°5" se ubica 850 m aguas abajo de la zona de estudio, siendo de instalación muy reciente, por lo cual no se presentan datos de caudales al no contar con curva de descarga asociada. Por otro lado, esta estación ha sufrido daños por vandalismo, generando intermitencia en los datos de nivel de agua registrados. En vista de lo anterior, el Análisis Hidrológico consideró el uso de la estación Fluviométrica "Río Trafampulli en Rinconada" la cual cuenta con registros de caudal desde el año 2016 y se encuentra ubicada 15.4 Km aguas abajo de la zona de estudio. Si bien esta es una serie corta de caudales, corresponde a datos registrados en la cuenca, con los cuales se puede estimar de manera preliminar una serie de caudales medios mensuales e identificar la estacionalidad de los caudales.

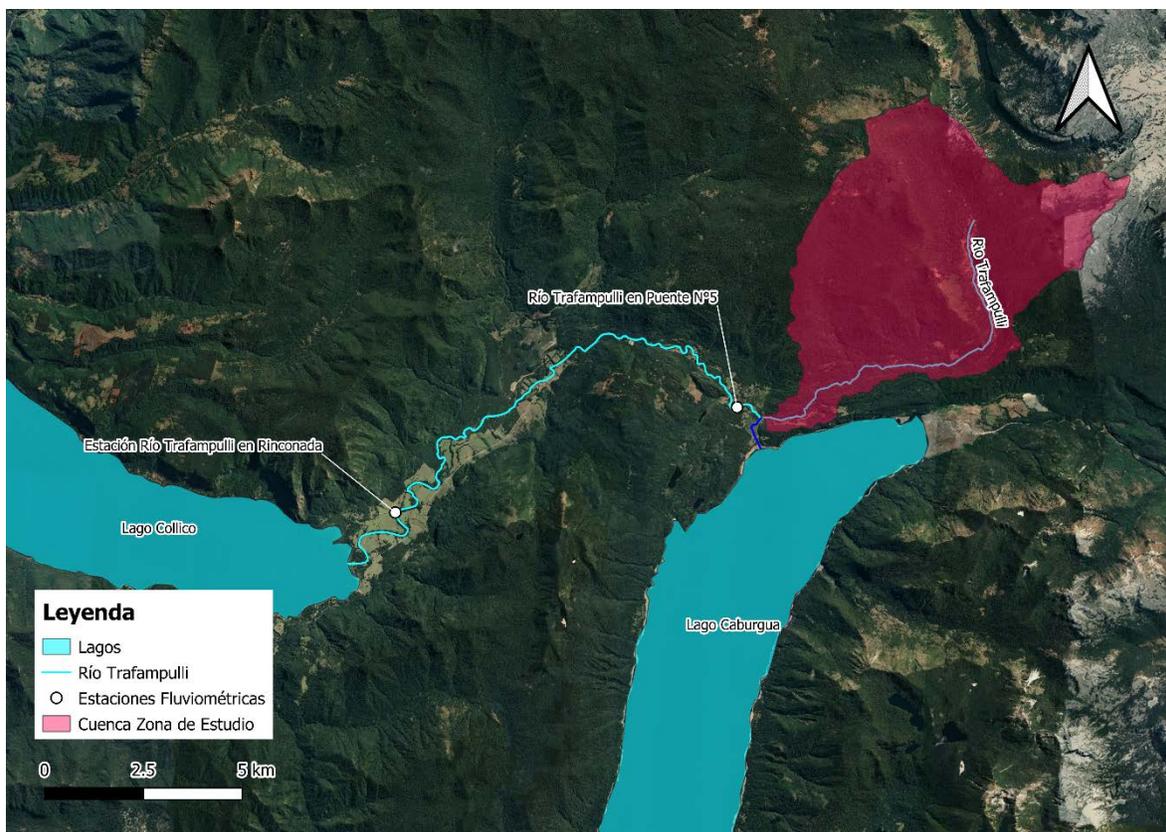


Figura 18: Cuenca aportante a zona de estudio y estaciones fluviométricas en Río Trafampulli.

Para obtener los valores de caudales medios mensuales se utilizó transposición de Cuencas, utilizando la cuenca asociada a la zona en estudio y la cuenca asociada a la Estación Fluviométrica seleccionada. La cuenca asociada a la estación fluviométrica presenta un área de 150 km², mientras que la cuenca que drena hacia el área en estudio es de 39.89 km². En la Tabla 3 se presentan los valores de caudales medios mensuales registrados en la estación "Río Trafampulli en Rinconada", los cuales fueron utilizados para realizar la transposición de cuencas.

Tabla 3: Caudales Medios Mensuales en estación "Río Trafampulli en Rinconada", m³/s.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
2016					3.45	3.45	13.85	27.35	10.02	9.56		
2017			4.27	5.77	10.15	26.47	14.43	21.01	14.12	26.67	15.69	
2018			4.12	11.84	13.17	33.37	28.94	24.88	43.78	34.71	25.11	8.29
2019	5.16	1.50	2.79	2.41	14.53	32.30	41.69	24.69	12.94	12.57	10.53	
2020	2.42	1.88	1.03	1.08	6.17	23.16			8.34	7.03	5.75	4.83
2021	5.20	4.28	2.70	2.38	11.39	31.09	11.54	21.89	10.37	7.29	3.18	1.45
Promedio	4.26	2.55	2.98	4.70	9.81	24.97	22.09	23.96	16.60	16.31	12.05	4.86

7.2.2 Factores de corrección

En la Figura 19 se pueden observar la cuenca que drena al sector en estudio y la cuenca asociada a la estación "Río Trafampulli en Rinconada", por otro lado, en la Tabla 4 se presentan las áreas aportantes de cada cuenca. A partir de estos datos se obtiene el factor de corrección por áreas de $F_A = 0.27$.

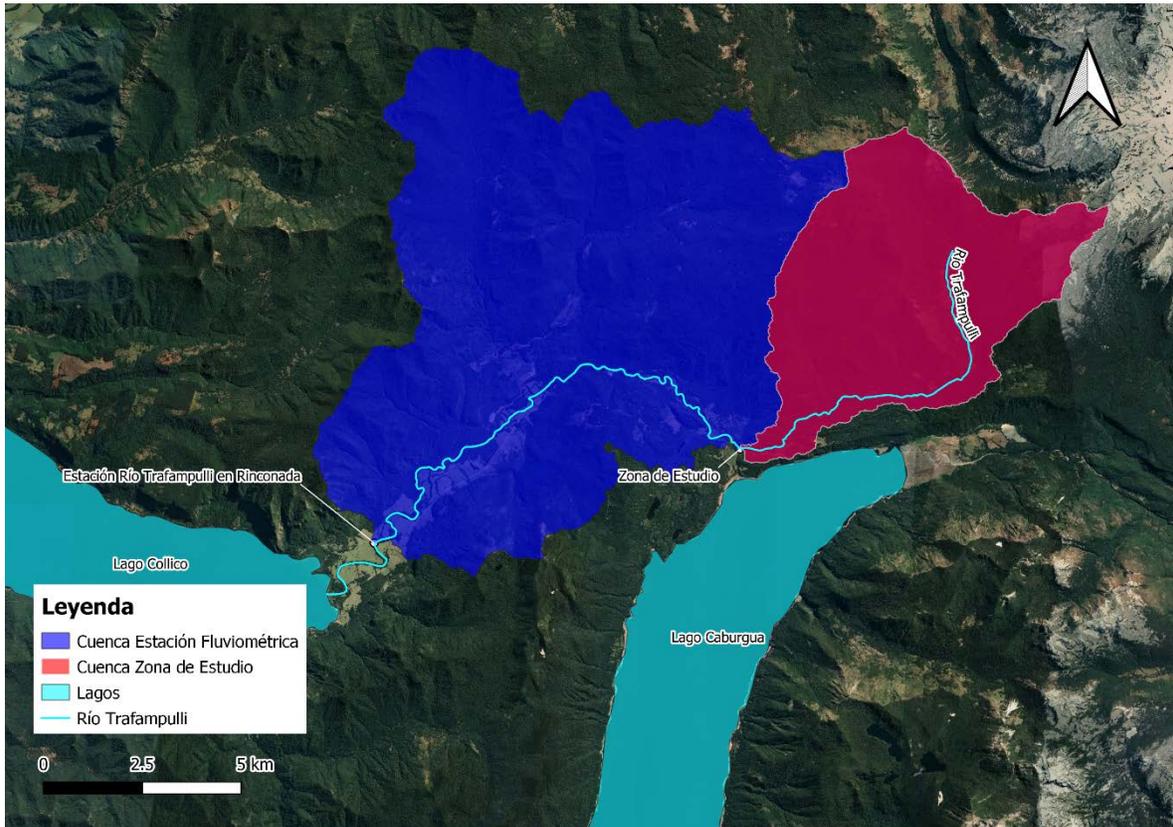


Figura 19: Cuencas en sector de estudio y estación fluvimétrica "Río Trafampulli en Rinconada".

Tabla 4: Factor de Corrección.

Características	Valor (km ²)	Factor de corrección
Estación "Río Trafampulli en Rinconada"	150	$F_A = 0.27$
Sector en estudio	38.98	

7.2.3 Resultados de caudales medios mensuales

A partir de los caudales medios mensuales de la estación "Río Trafampulli en Rinconada" descritos en el punto 7.2.1, se realiza un ajuste por el factor de corrección correspondiente, mediante la ecuación:

$$Q_{Zona\ de\ Estudio} = F \times Q_{Estación\ Fluviométrica}$$

Lo caudales medios mensuales obtenidos para la zona de estudio se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5: Caudales Medios Mensuales en estación "Río Trafampulli en Rinconada", m³/s.

Sector	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
E. Río Trafampulli en Rinconada	4.26	2.55	2.98	4.69	9.81	24.98	22.09	23.96	16.59	16.31	12.05	4.86
Zona de estudio	1.13	0.68	0.79	1.25	2.61	6.64	5.87	6.37	4.41	4.34	3.20	1.29

7.3 Caudales de crecida

A continuación, se presenta la estimación de caudales para diferentes periodos de retorno en la zona de estudio mediante los métodos Racional, DGA-AC y Verni King Modificado.

7.3.1 Análisis de precipitaciones

Para la estimación de los caudales de crecida es importante comprender como varía la precipitación en la zona de interés. En primer lugar, se evaluaron tres estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio (Figura 20), analizando la clasificación climática de Köppen-Geiger, altitud y subcuenca a la cual pertenecen. Según se observa en la Tabla 6, las estaciones "Lago Caburgua" y "Lago Tinquilco" pertenecen a la misma zona climática que la zona de estudio, asociada a un clima templado lluvioso con leve sequedad estival. De las estaciones analizadas, la estación "Lago Tinquilco" es la más cercana a la zona de estudio y posee una altitud de 835 m.s.n.m. la cual se acerca a la altitud media de la cuenca aportante al sector en análisis la cual es de 1191 m.s.n.m., por lo tanto, para el presente análisis se utilizarán los registros de precipitación de la estación "Lago Tinquilco".



Figura 20: Ubicación de estaciones meteorológicas analizadas.

Tabla 6: Descripción estaciones meteorológicas analizadas.

Estación	Distancia (km)	Clima Köppen-Geiger	Altitud (msnm)	Subcuenca BNA
Lago Caburgua	13.5	Cfb (s)	547	0941
Lago Tinquilco	12	Cfb (s)	835	0941
Lago Tricauco	30.6	Csb	573	0940

El análisis de precipitaciones se efectuó en base a los datos registrados en la Estación Lago Tinquilco (Código BNA 09416002-2), la cual ha registrado valores diarios de precipitación desde 1996 y se ubica a 12 km al suroriente de la zona de estudio. Así, se efectúa un análisis de Máximos Anuales, en donde se considera la precipitación máxima diaria registrada en cada año, y adicionalmente, se calcula la precipitación máxima horaria, como $P_{24} = 1.1 P_D$. En la Tabla 7 se presentan los valores de precipitación.

A partir de los datos de precipitación, se efectuó un análisis estadístico, a fin de conocer las precipitaciones en 24 horas asociadas a distintos periodos de retorno. En la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos, de los cuales, se decide adoptar las precipitaciones calculadas mediante la distribución Normal, debido a que presenta la mejor bondad de ajuste.

Tabla 7: Precipitaciones Máximas Anuales, mm.

Año	P _D	P ₂₄	Año	P _D	P ₂₄
1996	63.80	70.18	2009	121.50	133.65
1997	165.50	182.05	2010	167.00	183.70
1998	107.00	117.70	2011	102.00	112.20
1999	158.80	174.68	2012	83.30	91.63
2000	130.50	143.55	2013	83.50	91.85
2001	193.20	212.52	2014	68.00	74.80
2002	193.00	212.30	2015	87.00	95.70
2003	168.60	185.46	2016	104.00	114.40
2004	145.10	159.61	2017	99.50	109.45
2005	146.80	161.48	2018	145.00	159.50
2006	157.10	172.81	2019	116.50	128.15
2007	105.00	115.50	2020	119.00	130.90
2008	112.00	123.20			

Tabla 8: Resultados del Análisis Estadístico de Precipitaciones.

Distribución	P ₂₄ (mm) para periodo de retorno T (años)							Valor - p	
	2	5	10	25	50	100	150	K - S	Chi 2
Normal	138.3	172.4	190.2	209.2	221.5	232.6	238.6	0.91645	0.40495
Log-Pearson 3	134.7	172.0	193.7	218.3	234.9	250.4	258.9	0.84797	0.75555
Lognormal (3P)	135.5	170.7	190.9	213.9	229.5	244.2	252.4	0.81989	0.73329
Gamma	134.3	170.7	192.1	216.7	233.6	249.6	258.5	0.79017	0.75079
Gumbel Max	131.6	167.4	191.2	221.1	243.4	265.4	278.3	0.57072	0.72976

Por su parte, la distribución Normal presenta el mejor ajuste gráfico para valores extremos de precipitación (Figura 21).

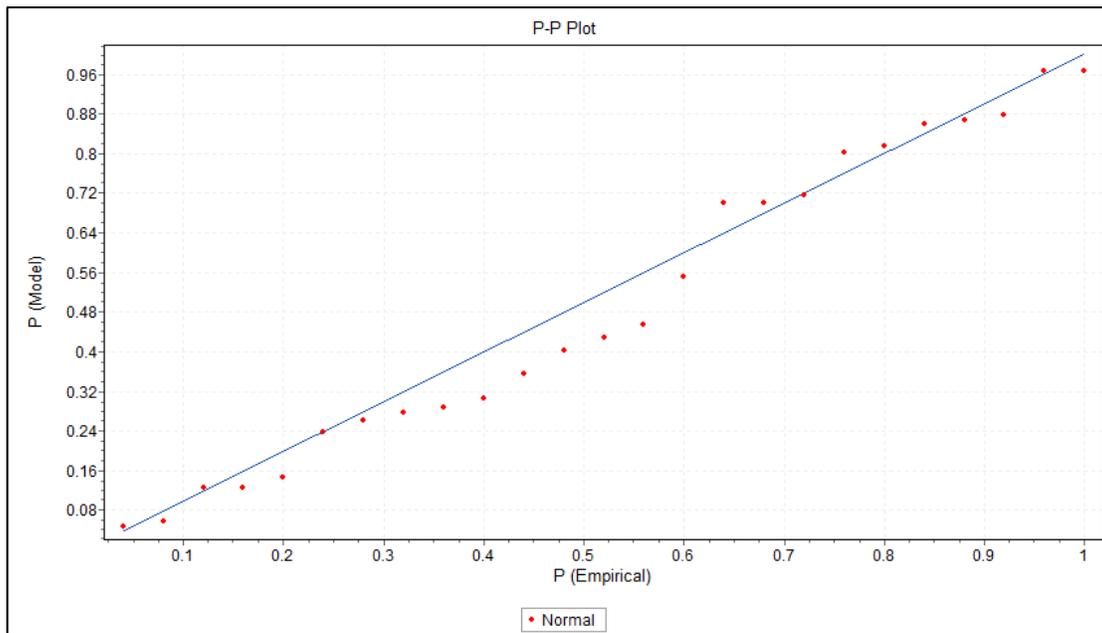


Figura 21: Ajuste de datos a la distribución Normal precipitación máxima en 24 horas.

7.3.2 Cuenca Hidrográfica

Para determinar las principales características de la cuenca hidrográfica que drena hacia la zona de estudio, se utilizó el Modelo de Elevación Digital ALOS Palsar, de resolución 12.5 metros por píxel, suministrado por JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) según se puede observar en la Figura 22, lo que fue complementado con las observaciones en terreno, de imágenes aéreas y satelitales.



Figura 22: Cuenca hidrográfica drenante a zona de estudio.

Los parámetros morfométricos de la cuenca fueron calculados mediante las herramientas de análisis hidrológico con las que cuenta el software de información geográfica QGis, el que permite definir la red hídrica, mapa de pendientes, cuencas, entre otros. En la Tabla 9 se detallan los parámetros de las cuencas.

Tabla 9: Parámetros morfométricos de las cuencas.

Parámetro	Símbolo	Valor
Área (km ²)	A	39.89
Longitud de Cauce (km)	L	14.69
Longitud desde el centro de gravedad (km)	L _g	10.11
Desnivel Máximo (m)	H	1157
Desnivel Medio (m)	H _m	639.54
Pendiente Media	S	0.37

7.3.3 Coeficientes de escorrentía

Para el cálculo del coeficiente de escorrentía de la cuenca se utilizan los términos C_1 , C_2 , C_3 y C_4 recomendados en el Manual de Carreteras (Tabla 3.702.503.B). En la Tabla 10 se indican los valores adoptados, junto con la descripción correspondiente.

El valor del coeficiente de escorrentía para períodos de retorno bajos es $C=0.52$. Para períodos de retorno mayores se amplifica, como se indica en la Tabla 11.

Tabla 10: Factores de Coeficiente de Escorrentía.

Factor	Valor	Descripción
C_1 Relieve	0.30	Escarpado con pendientes mayores que 30%.
C_2 Infiltración	0.08	Normales, bien drenados, textura mediana, limos arenosos, suelos arenosos.
C_3 Cobertura Vegetal	0.04	Buena a excelente; 90% del área con praderas, bosques o cobertura equivalente.
C_4 Almacenamiento Superficial	0.10	Baja; sistema de cauces superficiales pequeños bien definidos, sin zonas húmedas.
C	0.52	Coeficiente de escorrentía

Tabla 11: Coeficiente de Escorrentía.

	Periodo de retorno				
	10	25	50	100	150
Factor	1.00	1.10	1.20	1.25	1.30
C	0.52	0.57	0.62	0.65	0.68

7.3.4 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración, t_c , corresponde al tiempo que tarda la partícula de agua más alejada en la cuenca en llegar al punto donde se estima el caudal. Este tiempo fue calculado en base a las ecuaciones indicadas en la Tabla 12.

Tabla 12: Métodos de cálculo tiempo de concentración.

Método	Ecuación	Condición
1. Norma Española	$t_c = 0.3 \frac{L^{0.76}}{S^{0.19}}$	$1 \text{ km}^2 \leq A \leq 3000 \text{ km}^2$ $0.25 \text{ h} \leq t_c \leq 24 \text{ h}$
2. California	$t_c = 0.95 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$	$2 \text{ km}^2 \leq A$
3. Giandotti	$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5 L}{0.8 \sqrt{Hm}}$	$\frac{L}{5.4} \leq t_c \leq \frac{L}{3.6}$

Al evaluar estas formulaciones con los parámetros morfométricos de la cuenca se obtienen los tiempos de concentración indicados en la Tabla 13. Se adopta el valor obtenido con el método de la Norma Española, ya que la cuenca en estudio cumple con las condiciones propuestas por el método y presenta una velocidad media coherente con la pendiente del cauce en estudio.

Tabla 13: Tiempos de Concentración.

Formulación	t_c Cuenca (h)	Condición	V media (m/s)
Norma Española	2.79	Cumple	1.46
California	1.40	Cumple	2.91
Giandotti	2.34	No Cumple	1.75

7.3.5 Intensidad de precipitación

La intensidad de precipitación está determinada por la precipitación, de duración igual al tiempo de concentración del área aportante (Tabla 13), con la siguiente ecuación:

$$i_{t_c}^T = \frac{P_{t_c}^T}{t_c}$$

$$i_{t_c}^T = \frac{CD * P_{24}^T}{t_c}$$

Donde:

$i_{t_c}^T$: Intensidad de la precipitación para tiempo de concentración t_c y período de retorno T.

$P_{t_c}^T$: Precipitación para tiempo de concentración t_c y período de retorno T.

CD : Coeficiente de duración.

Los coeficientes de duración permiten calcular la intensidad de interés a partir de la precipitación de 24 horas. Los CD para la zona de interés se obtuvieron del MC Vol 3 (2022), estos pertenecen a la estación pluviográfica Temuco. Para duraciones mayores a 1 hora se obtienen directamente, mientras que para duraciones menores a 1 hora (y mayores a 5 minutos) se estiman a partir de la ecuación de Bell (1959).

A los coeficientes tabulados en el MC (Tabla 14) se calculó su línea de tendencia (Figura 23 y Figura 24) para determinar valores para las duraciones de interés.

Tabla 14: Coeficientes de duración.

d (min)	d (h)	CD	d (min)	d (h)	CD
5	0.08	0.061	240	4.00	0.500
10	0.17	0.095	360	6.00	0.590
15	0.25	0.120	480	8.00	0.670
20	0.33	0.134	600	10.00	0.730
30	0.50	0.166	720	12.00	0.790
40	0.67	0.179	840	14.00	0.840
50	0.83	0.197	1080	18.00	0.910
60	1.00	0.210	1440	24.00	1.000
120	2.00	0.320			

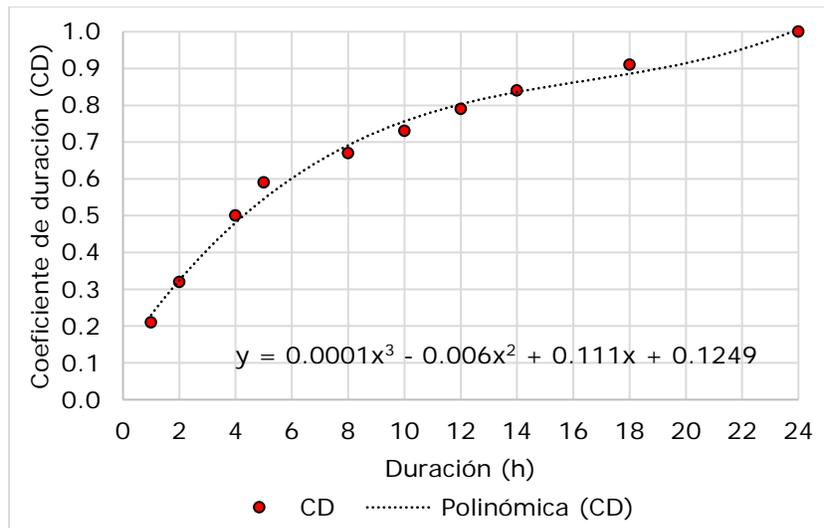


Figura 23: Línea de tendencia Coeficientes de duración 1 a 24 horas.

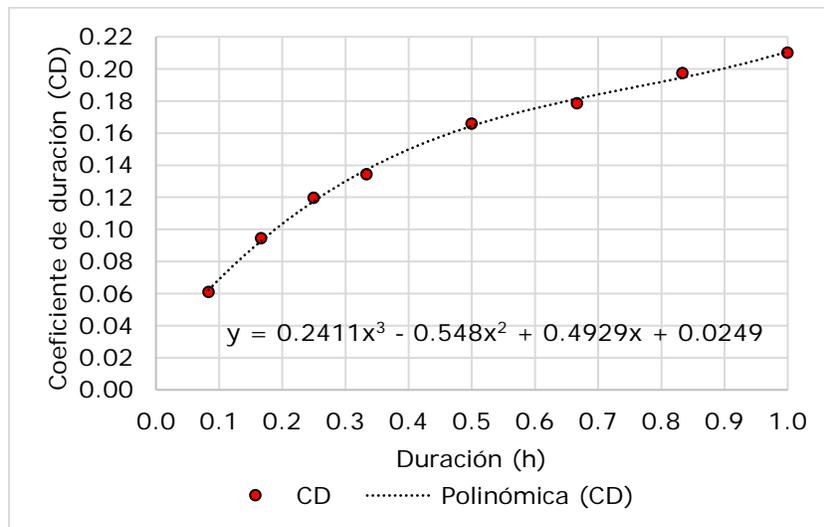


Figura 24: Línea de tendencia Coeficientes de duración menores a una hora.

Efectuando un ajuste polinómico, la función de mejor ajuste entre duración, d , y coeficiente de duración, CD , está dada por:

Entre 1 y 24 horas:

$$CD = 1 \cdot 10^{-4} d^3 - 0.006 d^2 + 0.111 d + 0.1249$$

Menores a una hora:

$$CD = 0.2411 d^3 - 0.548 d^2 + 0.4929 d + 0.0249$$

Según el tiempo de concentración obtenido en el punto 7.3.4 se obtiene el coeficiente de duración para la cuenca el cual es 0.39.

Las intensidades de precipitación para distintos periodos de retorno se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15: Intensidades de precipitación para distintos periodos de retorno.

T (años)	CD	P_{24}^T (mm)	t_c (h)	I^T (mm/h)
2	0.39	138.3	2.79	19.32
5	0.39	172.4	2.79	24.09
10	0.39	190.2	2.79	26.58
25	0.39	209.2	2.79	29.23
50	0.39	221.5	2.79	30.95
100	0.39	232.6	2.79	32.50
150	0.39	238.6	2.79	33.34
2	0.39	138.3	2.79	19.32
5	0.39	172.4	2.79	24.09

7.3.6 Método Racional

El método racional asume como principal hipótesis que el caudal peak esperado se da al mismo tiempo que una partícula de agua termina de recorrer la cuenca analizada, y es válido para cuenca menores a 1000 ha o 10 km².

La fórmula del método racional modificado es:

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{3.6}$$

Donde Q es el caudal máximo instantáneo en m³/s, c es el coeficiente de escorrentía, i es la intensidad de lluvia para el periodo de detorno analizado en mm/hr, y A el área aportante de la cuenca en km².

Así, los resultados de caudales para un periodo de retorno de 100 años se indican en la Tabla 16.

Tabla 16: Caudales de crecida para distintos periodos de retorno, método racional.

T (años)	C	I ^T (mm/h)	A (km ²)	Q ^T (m ³ /s)
2	0.52	19.32	39.89	111.35
5	0.52	24.09	39.89	138.81
10	0.52	26.58	39.89	153.14
25	0.57	29.23	39.89	185.28
50	0.62	30.95	39.89	214.01
100	0.65	32.50	39.89	234.10
150	0.68	33.34	39.89	249.74

7.3.7 Método DGA-AC

El Método DGA-AC se basa en las siguientes ecuaciones, con las que se obtiene el caudal instantáneo máximo para diferentes periodos de retorno:

$$QMD^{10} = (2 \times 10^{-3}) \times (A)^{0.973} \times (P_{24}^{10})^{1.224}$$

$$Q^{10} = a \cdot QMD^{10}$$

$$Q^T = Q^T / Q^{10} \times Q^{10}$$

Donde:

QMD¹⁰ : Caudal Medio Diario asociado a T = 10 años (m³/s).

A : Área de la cuenca (km²).

P₂₄¹⁰ : Precipitación de 24 h asociada a T = 10 años (m³/s).

Q¹⁰ : Caudal de crecida asociado a T = 10 años (m³/s).

a : Coeficiente de amplificación (1.19 para la zona de estudio).

Q^T/Q¹⁰ : coeficiente según Tabla 17.

Q^T : Caudal instantáneo máximo de crecida asociado a T años (m³/s).

Tabla 17: Valores de Q^T/Q¹⁰

T (años)	Q ^T /Q ¹⁰
2	0.68
5	0.87
10	1.00
25	1.16
50	1.28
100	1.40
150	1.48

Al evaluar las ecuaciones para la cuenca en estudio se tienen los siguientes valores de QMD¹⁰ y Q¹⁰:

Tabla 18: Valores de QMD¹⁰ y Q¹⁰ para la cuenca.

T (años)	QMD ¹⁰ (m ³ /s)	Q ¹⁰ (m ³ /s)
10	0.7338	1.372

Los resultados obtenidos de caudales de crecida para distintos periodos de retorno se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19: Caudales de crecida para distintos periodos de retorno, método DGA-AC.

T (años)	Q ^T /Q ¹⁰	P ₂₄ ¹⁰ (mm)	A (km ²)	QMD ¹⁰ (m ³ /s)	α	Q ^T (m ³ /s)
2	0.68	190.2	39.89	44.51	1.19	36.02
5	0.87	190.2	39.89	44.51	1.19	46.08
10	1.00	190.2	39.89	44.51	1.19	52.97
25	1.16	190.2	39.89	44.51	1.19	61.44
50	1.28	190.2	39.89	44.51	1.19	67.80
100	1.40	190.2	39.89	44.51	1.19	74.16
150	1.48	190.2	39.89	44.51	1.19	78.39

7.3.8 Método de Verni-King modificado

El caudal de crecida definido en el método de Verni-King modificado está dado por la ecuación:

$$Q = C^T \times 0.00618 \times (P_{24}^T)^{1.24} \times A^{0.88}$$

Para la zona de estudio, se tiene que $C^{10} = 0.89$, mientras que los valores de C^T/C^{10} y de C^T se presentan en la Tabla 20. Al evaluar la ecuación, se obtienen los caudales para distintos periodos de retorno, los que se indican en la Tabla 21.

Tabla 20: Valores de C^T .

T (años)	C ¹⁰	C ^T /C ¹⁰	C ^T
2	0.89	0.93	0.83
5	0.89	0.98	0.87
10	0.89	1.00	0.89
25	0.89	1.01	0.90
50	0.89	1.02	0.91
100	0.89	1.03	0.92
150	0.89	1.04	0.93

Tabla 21: Caudales para periodo de retorno 100 años, método Verni-King Modificado.

T (años)	C ¹⁰	C ^T /C ¹⁰	C ^T	P ₂₄ ^T (mm)	A (km ²)	Q ^T (m ³ /s)
2	0.89	0.93	0.83	138.3	39.89	59.19
5	0.89	0.98	0.87	172.4	39.89	81.98
10	0.89	1.00	0.89	190.2	39.89	94.49
25	0.89	1.01	0.90	209.2	39.89	107.40
50	0.89	1.02	0.91	221.5	39.89	116.42
100	0.89	1.03	0.92	232.6	39.89	124.91
150	0.89	1.04	0.93	238.6	39.89	130.17

7.3.9 Comparación de métodos

En la Tabla 22 se presentan los resultados de los caudales obtenidos mediante los tres métodos propuestos. El método racional es aplicable para cuencas con áreas menores a 20 km², por otro lado, los métodos DGA-AC y Verni-King modificado son aplicables para cuencas con áreas mayores a 20 km², siendo estos dos últimos métodos aplicables en la cuenca en estudio, la cual posee un área de 39.89 km². Se opta por utilizar los resultados de caudales de crecidas calculados con el método de Verni-King modificado por presentar valores más conservadores que los obtenidos con el método de DGA-AC.

Tabla 22: Caudales para distintos periodos de retorno mediante los métodos propuestos (m³/s).

Método	T (años)						
	2	5	10	25	50	100	150
Racional	111.35	138.81	153.14	185.28	214.01	234.10	249.74
DGA-AC	36.02	46.08	52.97	61.44	67.80	74.16	78.39
Verni-King Modificado	59.19	81.98	94.49	107.40	116.42	124.91	130.17

7.3.10 Hidrograma de crecida

Con objetivo de analizar el comportamiento de una crecida recurrente en la zona de estudio, se obtuvo el hidrograma de crecida asociado a un periodo de retorno de 2 años, utilizando el caudal calculado en el punto 7.3.9 del presente informe; y para caracterizar la forma del hidrograma se utilizó el método del Hidrograma Unitario Sintético tipo Linsley (HUS Linsley).

El HUS Linsley es un método que permite estimar mediante la relación precipitación-escorrentía el hidrograma de crecida considerando un caudal peak. El método tiene validez para cuencas pluviales o pluvio-nivales, ubicadas entre la III^a y X^a región y con áreas comprendidas entre 10 y 4500 km².

Primero, se deben obtener los parámetros básicos para la construcción del hidrograma unitario sintético tipo Linsley, el cual está definido para una precipitación efectiva (P_e) de magnitud igual a 1 mm y de duración igual a 0.18 veces el tiempo al peak, ósea considera un tiempo unitario $t_u = t_p/5.5$. Para el cálculo de los parámetros se divide el país en 3 grandes zonas, según lo dispuesto en DGA (1995), la cuenca aportante se ubican en la zona III (VIII-X) teniéndose las siguientes relaciones:

$$t_p = 1.351 \cdot \left(L_p \frac{L_g}{S^{0.5}} \right)^{0.237}$$

$$t_B = 5.428 \cdot t_p^{0.717}$$

$$q_p = 172.775 \cdot t_p^{-0.835}$$

Donde:

- t_p : Tiempo al peak (hrs)
- L_p : Largo del cauce principal (km)
- L_g : Longitud desde el centro de gravedad hasta el punto de salida (km)
- S : Pendiente media de la cuenca (m/m)
- t_B : Tiempo base del hidrograma (hrs)
- q_p : Caudal peak del hidrograma unitario sintético (lt/s/mm/km²)

Se desea generar el hidrograma en base a una lluvia de duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, para lograr esto se debe estimar varios hidrogramas unitarios sintéticos, que se denominarán pulsos, cada uno con un tiempo unitario (t_u) tal que la suma de estos sea igual al tiempo de concentración de la cuenca (t_c), posteriormente estos hidrogramas se sumarán con un desfase dado por el tiempo unitario rectificado. Por esta razón se divide el tiempo de concentración en un número dado y este valor pasa a ser un tiempo unitario rectificado (t_r), el cual debe cumplir con las siguientes características:

-El valor t_r no deberá ser corregido en más del 50% de t_u

-Si t_r queda dentro del siguiente intervalo no se modifican los valores del HUS.

$$0.9t_u < t_r < 1.1t_u$$

-Si t_r queda fuera del intervalo anterior, se modifica q_p y t_B en función del t_p' determinado por la siguiente expresión:

$$t_p' = t_p + 0.25(t_r - t_u)$$

Los valores obtenidos para los parámetros antes mencionados se presentan en la Tabla 23 para la cuenca analizada.

Tabla 23: Parámetros calculados para el hidrograma unitario sintético.

Parámetro	Valor
t_p (hrs)	4.97
t_B (hrs)	17.14
q_p (Its/mm/km ²)	45.28
t_u (hrs)	0.90
t_r (hrs)	0.93

Para definir la forma del HUS se utiliza la Tabla 24 utilizando los valores calculados para q_p y t_p' , donde el tiempo final del hidrograma estará dado por t_b . Se debe comprobar que el hidrograma determinado corresponda un hidrograma de volumen unitario, cuando esto no ocurre se corrigió proporcionalmente la diferencia de volumen detectada.

Tabla 24: Coeficientes de distribución para el hidrograma unitario sintético.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
0.00	0.00	1.30	0.80
0.30	0.20	1.50	0.60
0.50	0.40	1.80	0.40
0.60	0.60	2.30	0.20
0.75	0.80	2.70	0.10
1.00	1.00		

Una vez determinado y ajustado el HUS, se superpuso la cantidad de pulsos determinada para la cuenca, desfasados en t_r' , y su resultado se multiplica por el área de la cuenca y la precipitación efectiva caída para cada HUS, la cual se consideró de carácter unitaria ya que interesa conocer solo la forma del hidrograma. Posteriormente se corrigió el hidrograma para ajustarlo al caudal determinado en el punto 7.3.9 (59.19 m³/s) utilizando la siguiente expresión:

$$Q_{Hid}(t) = Q_{HUS}(t) \cdot \frac{Q_{T=2}}{Q_{Max_{HUS}}}$$

Donde:

- $Q_{Hid}(t)$: Caudal del hidrograma de crecida en el tiempo t (m³/s)
- $Q_{HUS}(t)$: Caudal del hidrograma unitario tipo Linsley en el tiempo t (m³/s)
- $Q_{T=2}$: Caudal de crecida obtenido para el proyecto para T=2 años (m³/s)
- $Q_{Max_{HUS}}$: Caudal máximo del hidrograma unitario tipo Linsley (m³/s)

Por otro lado, se aproximó el caudal base del hidrograma de crecida como el caudal medio mensual del mes de junio, estimado en el punto 7.2.3 del presente informe alcanzando un valor de 6.64 m³/s. La elección de dicho caudal refleja una condición probable a generarse previo al comienzo de un escenario de crecida.

El hidrograma obtenido se presenta en la Figura 25 y los valores tabulados se presentan en la Tabla 25.

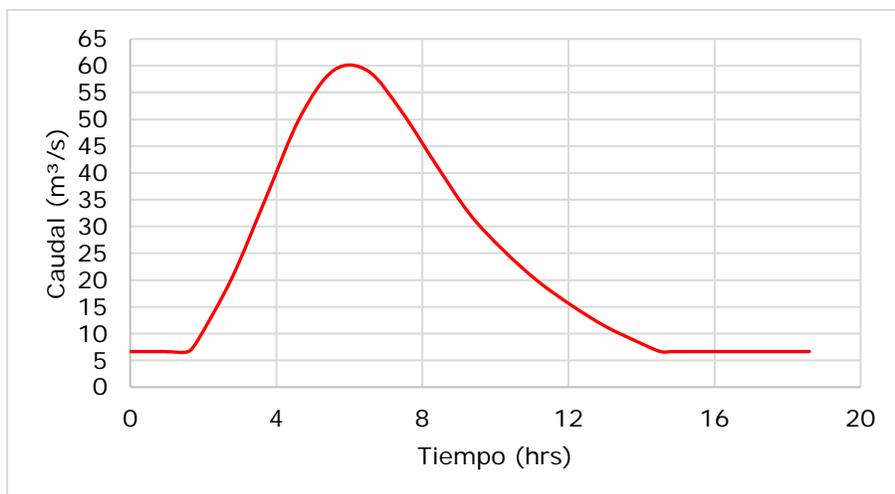


Figura 25: Hidrograma de crecida obtenido para un periodo de retorno de 2 años.

Tabla 25: Hidrograma de crecida obtenido para un periodo de retorno de 2 años.

Tiempo (hrs)	Q (m³/s)	Tiempo (hrs)	Q (m³/s)
0.0	6.64	10.2	25.47
0.9	6.64	11.2	19.79
1.6	6.64	12.1	15.25
1.9	8.86	13.0	11.32
2.8	20.46	14.0	8.29
3.7	35.41	14.5	6.64
4.7	50.39	14.9	6.64
5.6	59.19	15.8	6.64
6.5	59.04	16.7	6.64
7.4	51.38	17.7	6.64
8.4	41.59	18.6	6.64
9.3	32.28		

El hidrograma de crecidas obtenidos muestra que la duración de las crecidas en la zona analizada alcanza un tiempo estimado de 15 horas, tiempo transcurrido entre el momento en que se inicia la onda de crecida y en el que esta termina, alcanzándose el caudal peak de la crecida en un tiempo aproximado de 5 horas.

8 Análisis Hidráulico

A partir de los caudales calculados en el Análisis Hidrológico, se efectúa un Análisis Hidráulico, a fin de conocer el comportamiento de los caudales de crecida y caudales medios mensuales.

Dado que en la situación actual el río Trafampulli se encuentra intervenido producto de una modificación realizada en su ribera izquierda (o sur), se consideró la topografía base solo para realizar la respectiva calibración del modelo. Dado que el objetivo del presente estudio es establecer las condiciones hidráulicas naturales del cauce analizado, se ajustó la topografía restableciendo las cotas naturales en la zona intervenida. Esto fue realizado utilizando la información topográfica asociada a las zonas no afectadas por la intervención, ajustando las cotas mediante la interpolación de datos topográficos medidos en el terreno adyacente.

El análisis a realizar comprende estudiar el desborde del río Trafampulli frente a distintos caudales, situación que posee un comportamiento de carácter fuertemente bidimensional. Por lo tanto, el modelo hidráulico a utilizar será el software Iber en su versión 3.1. Este software corresponde a un modelo hidráulico y de calidad de aguas bidimensional, lo que permite modelar adecuadamente la hidrodinámica de la zona de estudio, característica fundamental para representar el efecto de los desbordes sobre la planicie de inundación.

Iber permite modelar flujo en ríos y estuarios, logrando simular la hidrodinámica fluvial; rotura de presas; transporte de sedimento; evaluación de inundaciones, entre otras. Cuenta con distintos módulos de cálculo acoplados entre sí, entre los cuales se encuentran el módulo hidrodinámico, el módulo de transporte sólido no-estacionario, el módulo de turbulencia y el módulo de calidad de aguas. Este modelo resuelve las ecuaciones de cada módulo sobre mallas bidimensionales no estructuradas, utilizando el método de volúmenes finitos. Las mallas pueden ser mixtas, formadas por elementos triangulares y/o cuadrangulares. Particularmente, el módulo a utilizar en el presente análisis corresponde al módulo hidrodinámico, el cual resuelve las ecuaciones de Saint Venant 2D promediadas en profundidad, las cuales se presentan en la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial t}(hU_x) + \frac{\partial}{\partial x}\left(hU_x^2 + g\frac{h^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}(hU_xU_y) = -gh\frac{\partial Z_b}{\partial x} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial y})$$
$$\frac{\partial}{\partial t}(hU_y) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hU_y^2 + g\frac{h^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(hU_xU_y) = -gh\frac{\partial Z_b}{\partial y} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial y})$$

Donde:

- h : Profundidad del flujo (m).
- t : Instante t de simulación (s).
- U_x y U_y : Velocidad promediada en vertical para componente x e y (m/s).
- g : Aceleración de gravedad (m/s²).
- Z_b : Cota de fondo (m).
- $\tau_{b,x}$ y $\tau_{b,y}$: Fricción debida al rozamiento del fondo para componente x e y (Pa).
- ρ : Densidad del flujo (kg/m³).
- ν_t : Viscosidad turbulenta (Pa*s).

A su vez el módulo resuelve la ecuación de conservación de la masa en cada elemento, la cual se presenta a continuación:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = 0$$

Donde:

- h : Profundidad del flujo (m).
- t : Instante t de simulación (s).
- U_x y U_y : Velocidad promediada en vertical para componente x e y (m/s).

8.1 Modelaciones consideradas

Se realizaron diversos modelos numéricos para los distintos objetivos contemplados dentro del presente estudio, los cuales se presentan en la Tabla 26 y se adjuntan en el Anexo Modelos Hidráulicos. Los modelos realizados se pueden organizar en 4 grupos: Calibración, Caudales recurrentes, Evaluación de capacidad y Caudales de crecida.

Tal como fue señalado anteriormente, solo en los modelos de calibración se utilizó la topografía base, en el resto de modelos analizados se realizó el ajuste de la topografía a cotas naturales del terreno.

Tabla 26: Modelaciones consideradas.

ID Modelo	Grupo	Objetivo
DGA_Caburgua_Aforo	Calibración	Calibración del modelo con datos de terreno
DGA_Caburgua_QMM	Caudales recurrentes	Evaluar comportamiento del cauce frente a caudales medios mensuales
DGA_Caburgua_Capacidad	Evaluación capacidad	Evaluar capacidad máxima del cauce previo desborde hacia lago Caburgua
DGA_Caburgua_Desborde		Evaluar comportamiento del desborde generado hacia el lago Caburgua

ID Modelo	Grupo	Objetivo
DGA_Caburgua_T2	Caudales de crecida	Evaluar escenarios de crecida del cauce
DGA_Caburgua_T5		
DGA_Caburgua_T10		
DGA_Caburgua_T25		
DGA_Caburgua_T50		
DGA_Caburgua_T100		
DGA_Caburgua_T150	Hidrograma de crecida	Evaluar evento de inundación recurrente
DGA_Caburgua_T2_HID		

8.2 Parámetros de modelación

En la Tabla 27 se presentan los parámetros generales utilizados en los modelos, los cuales fueron seleccionados en base a lo señalado por los autores del modelo en Bladé et al. (2014) y en CEDEX (2010).

Tabla 27: Parámetros utilizados en la modelación realizada.

Parámetro	Descripción
Tiempo máximo simulación (s)	36000
Esquema numérico	1er Orden
CFL (máximo)	0.45
Δt_{max} (s)	1
Límite seco-mojado (m)	0.005

8.3 Malla de cálculo

Para seleccionar un tamaño de malla adecuado se buscó una combinación equilibrada entre estabilidad de resultados y tiempos de cálculo, seleccionando los elementos de tipo triangular por ser los más adecuados para superficies irregulares como lo es el fondo del cauce y planicies de inundación. Teniendo en cuenta estos criterios se obtuvo una malla compuesta por 312284 elementos con un tamaño mínimo 0.5 m y máximo 5 m por cada lado de elemento, la distribución de los tamaños de malla puede apreciarse en la Figura 26 y la malla generada en la Figura 27.

El área abarcada para el dominio de cálculo comprende un tramo de 530 m del río Trafampulli y un área de 29.5 ha, donde se incluye el cauce y sus planicies de inundación.

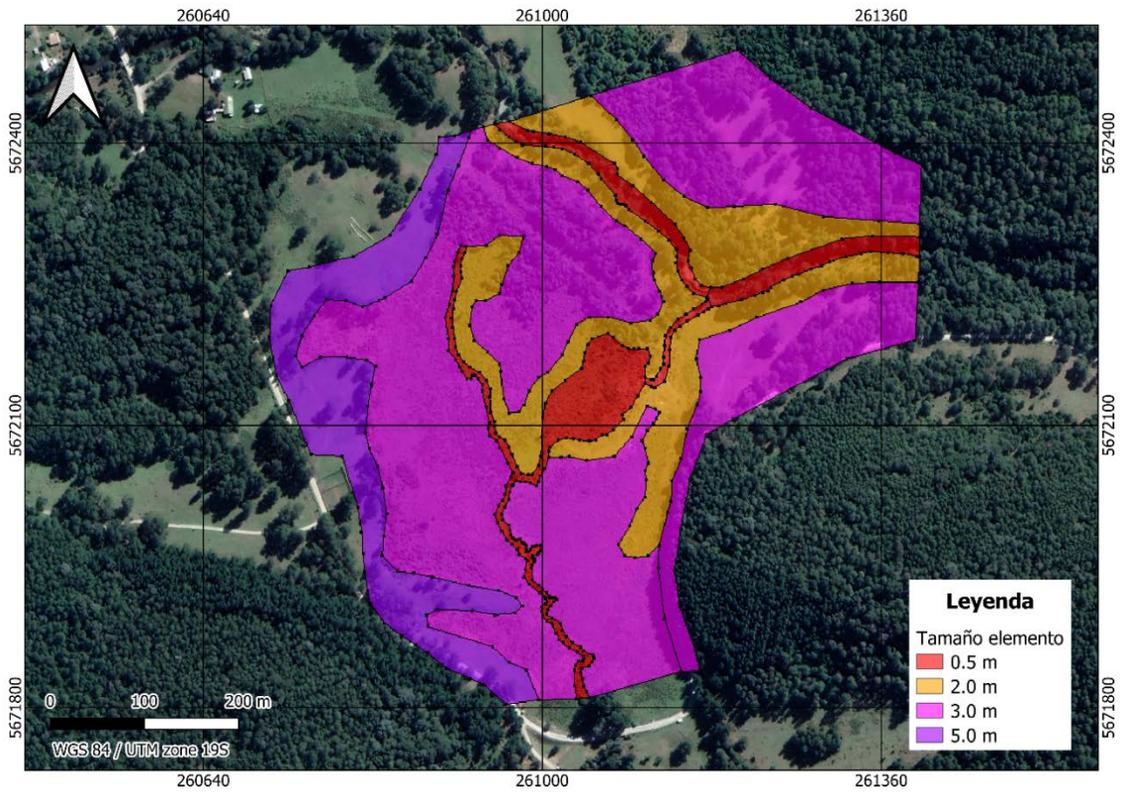


Figura 26: Distribución de tamaños de elementos de malla utilizada.

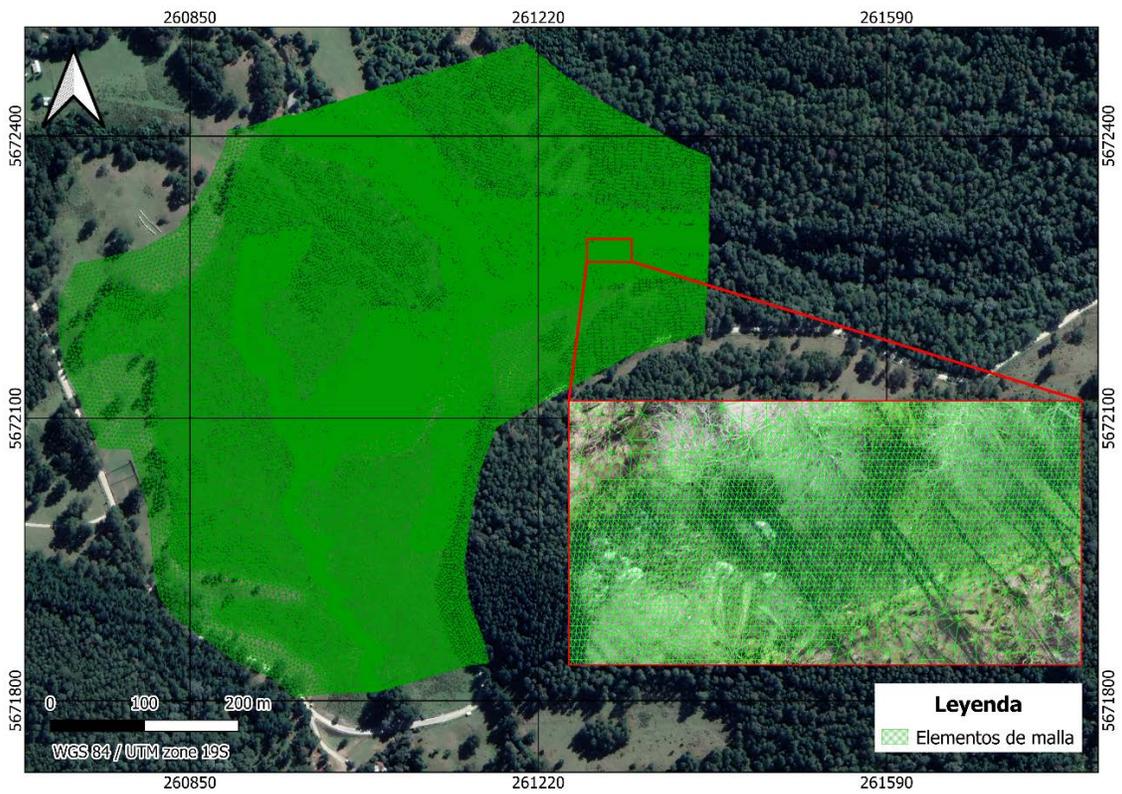


Figura 27: Malla de cálculo utilizada.

8.4 Calibración del modelo

Con objetivo de realizar la calibración del modelo, se tomaron las cotas de pelo de agua del cauce registradas al momento de realizar los aforos presentados en la sección 5. Lo anterior permitió comparar las profundidades del agua simulada con las medidas en terreno para el caudal aforado.

El parámetro de calibración utilizado fue el coeficiente de rugosidad de Manning, simulando para cada escenario el caudal aforado aguas arriba del punto de desborde, variando el coeficiente de Manning en los distintos tramos del cauce. La selección del coeficiente fue realizada mediante los indicadores de bondad de ajuste (R^2 , eficiencia de Nash-Sutcliffe y *Percent Bias*) y según la *performance* de cada uno según lo planteado en Moriasi (2015). El resumen de la calibración realizada para los valores de Manning seleccionados se presenta en la Tabla 28, la calibración se presenta en detalle en el Anexo 1 del presente informe.

Tabla 28: Resumen calibración realizada.

ID	Tramo	Manning seleccionado	Bondad de ajuste			Performance		
			R^2	NSE	PBIAS	R^2	NSE	PBIAS
T-ARR	Aguas arriba desborde	0.055	0.998	0.976	-0.016	Very Good	Very Good	Very Good
T-ABA	Aguas arriba desborde	0.045	0.999	0.997	-0.002	Very Good	Very Good	Very Good
DESB	Desborde	0.040	0.995	0.992	0.003	Very Good	Very Good	Very Good

8.5 Coeficientes de Manning

Tal como fue señalado anteriormente, los coeficientes de rugosidad para el cauce fueron obtenidos mediante la calibración realizada. Para el resto del modelo se utilizó el coeficiente $n=0.08$, correspondiente a Vegetación dispersa, el cual es sugerido por el software en base a los datos de uso de suelo presentes en CORINE *Land Cover Database*, descripción que es coincidente con lo visualizado en terreno en las planicies de inundación (Figura 28) La distribución de los coeficientes de Manning se presenta en la Figura 29.



Figura 28: Planicies de inundación del río Trafampulli.

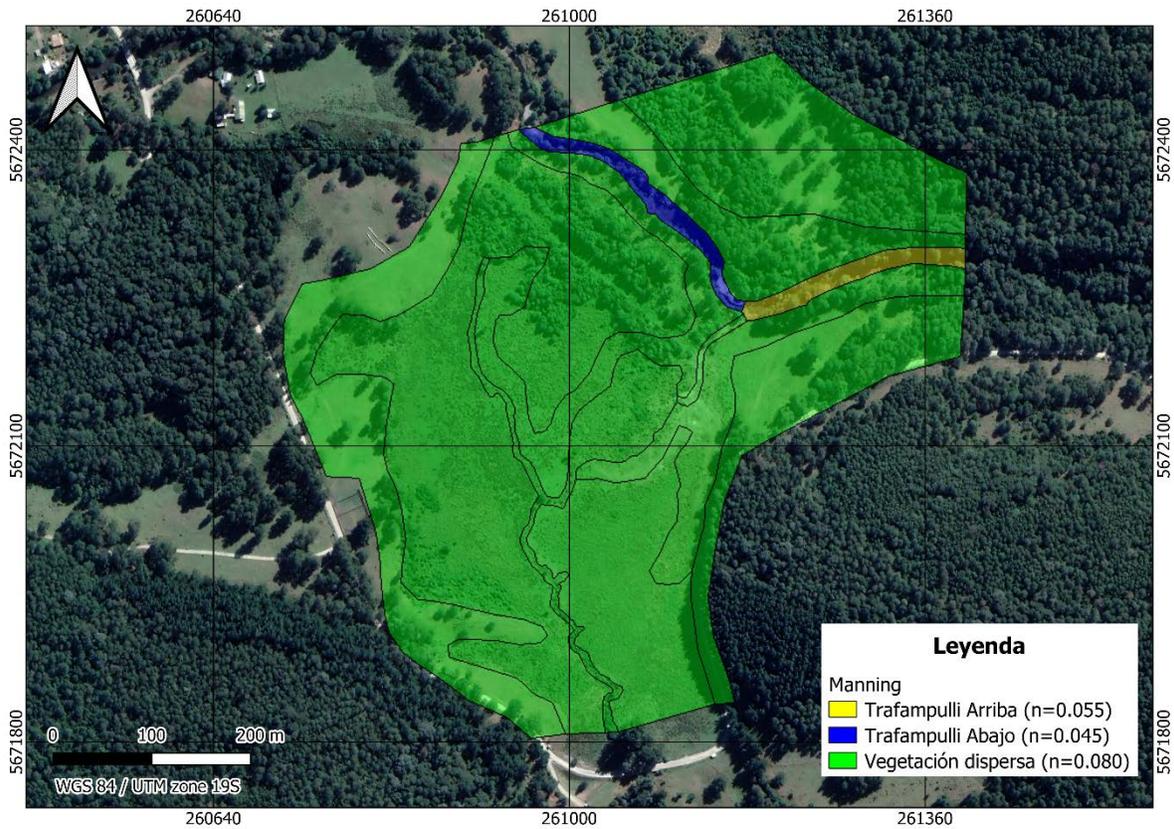


Figura 29: Distribución de coeficientes de Manning.

8.6 Condiciones iniciales

Para obtener una condición inicial estable se simularon 7200 segundos con la respectiva condición de contorno de cada modelo, así se consiguió generar condiciones hidráulicas estables para posteriormente proceder al análisis de resultados.

8.7 Condiciones de contorno

Se asignaron condiciones de contorno en la entrada del cauce al modelo y en las zonas donde se produce la salida del flujo, en la Tabla 29 se presenta en detalle las condiciones de contorno utilizada en cada modelo realizado.

Tabla 29: Condiciones de contorno utilizadas en cada modelación considerada.

ID Modelo	Entrada		Salida
	Descripción	Valor	
DGA_Caburgua_Aforo	Resultado aforo de caudal aguas arriba de desborde	4.767 m ³ /s	
DGA_Caburgua_QMM	Caudales medios mensuales mediante hidrograma escalonado		
DGA_Caburgua_Capacidad	Caudal máximo portado por el cauce sin desbordar hacia el lago Caburgua	20.5 m ³ /s	
DGA_Caburgua_Desborde	Caudal con el que se comienza a producir desborde hacia el lago Caburgua	21.5 m ³ /s	Altura Normal
DGA_Caburgua_T2		59.19 m ³ /s	
DGA_Caburgua_T5		81.98 m ³ /s	
DGA_Caburgua_T10	Caudales de crecida para cada periodo de retorno	94.49 m ³ /s	
DGA_Caburgua_T25		107.40 m ³ /s	
DGA_Caburgua_T50		116.42 m ³ /s	
DGA_Caburgua_T100		124.91 m ³ /s	
DGA_Caburgua_T150		130.17 m ³ /s	
DGA_Caburgua_T2_HID	Hidrograma de crecida	Q _{max} = 59.19 m ³ /s	

8.8 Resultados

A continuación, se presentan los resultados de los modelos hidráulicos ejecutados para los caudales medios mensuales y caudales de crecida para distintos períodos de retorno.

8.8.1 Inundación caudales medios mensuales

De la Figura 30 a la Figura 41 se presentan las profundidades obtenidas en el modelo para los caudales medios mensuales de enero a diciembre, donde se aprecia que dichos caudales son conducidos por el río Trafampulli sin presentar desbordes en el tramo en estudio. Las profundidades de escurrimiento son menores a 1 m de profundidad, alcanzando una profundidad máxima de 0.96 m para el mes de junio.

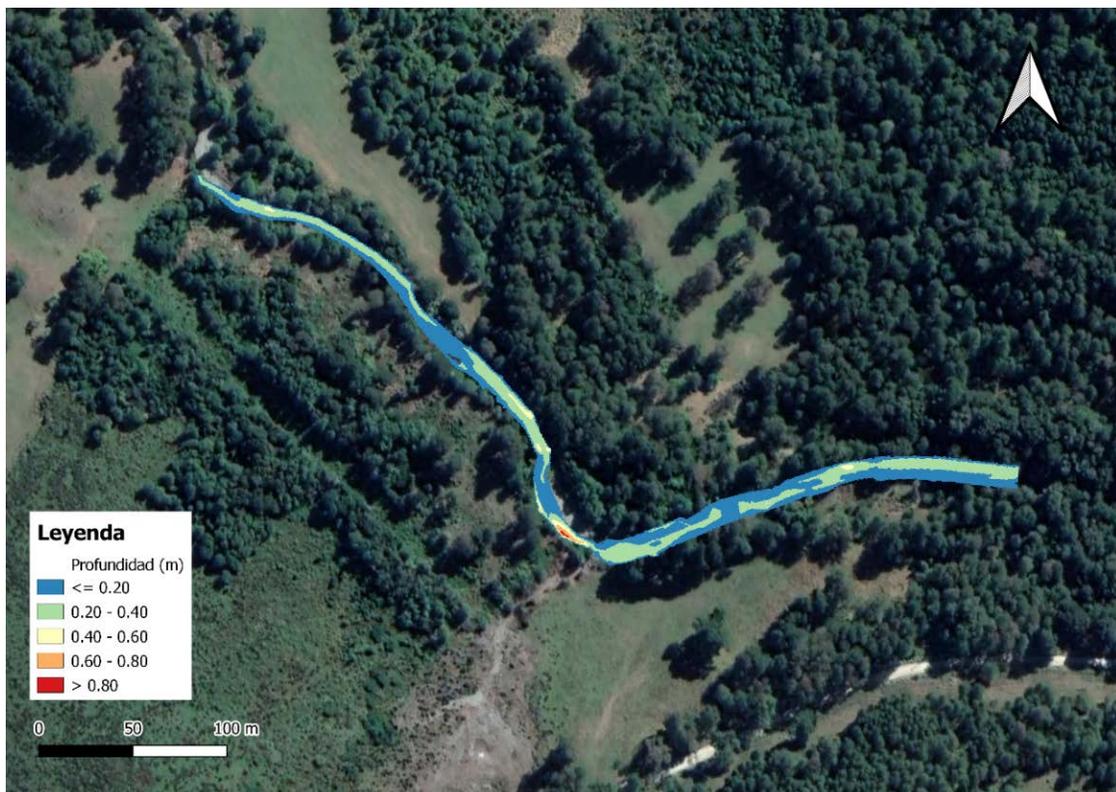


Figura 30: Profundidades obtenidas para Caudal Medio Mensual, Enero.



Figura 31: Profundidades obtenidas para Caudal Medio Mensual, Febrero.

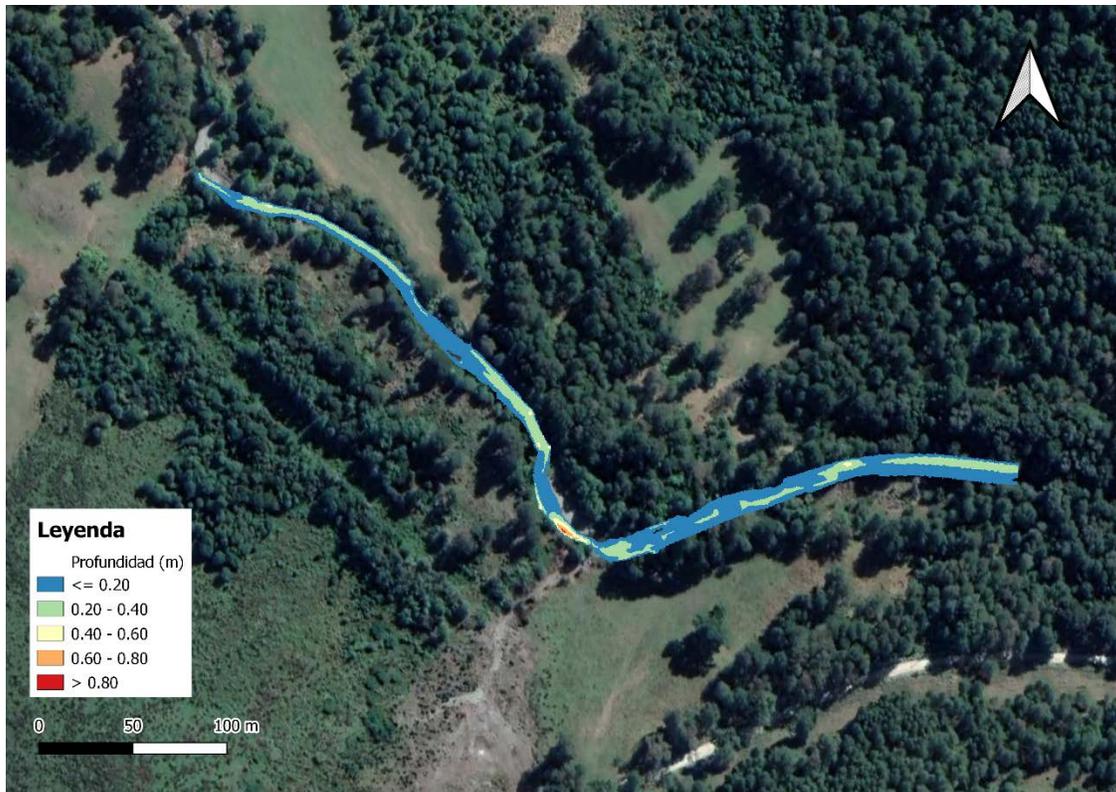


Figura 32: Profundidades obtenidas para Caudal Medio Mensual, Marzo.

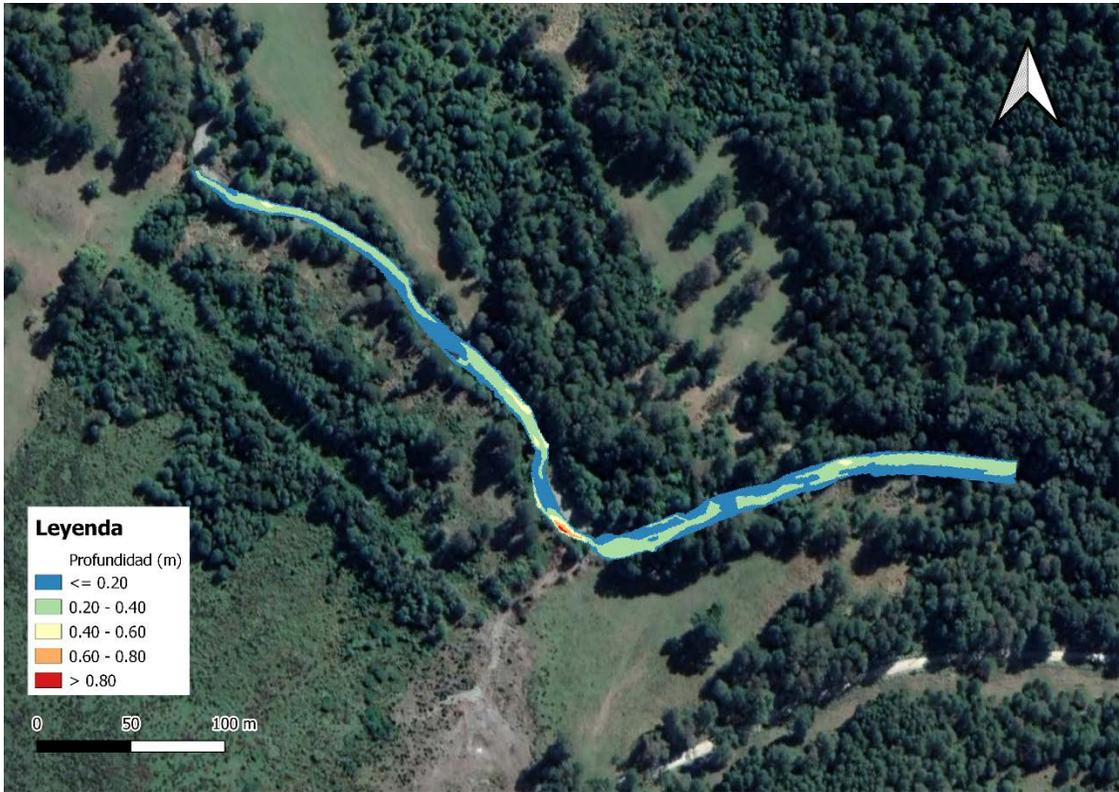


Figura 33: Profundidades obtenidas para Caudal Medio Mensual, Abril.



Figura 34: Profundidades obtenidas para Caudal Medio Mensual, Mayo.

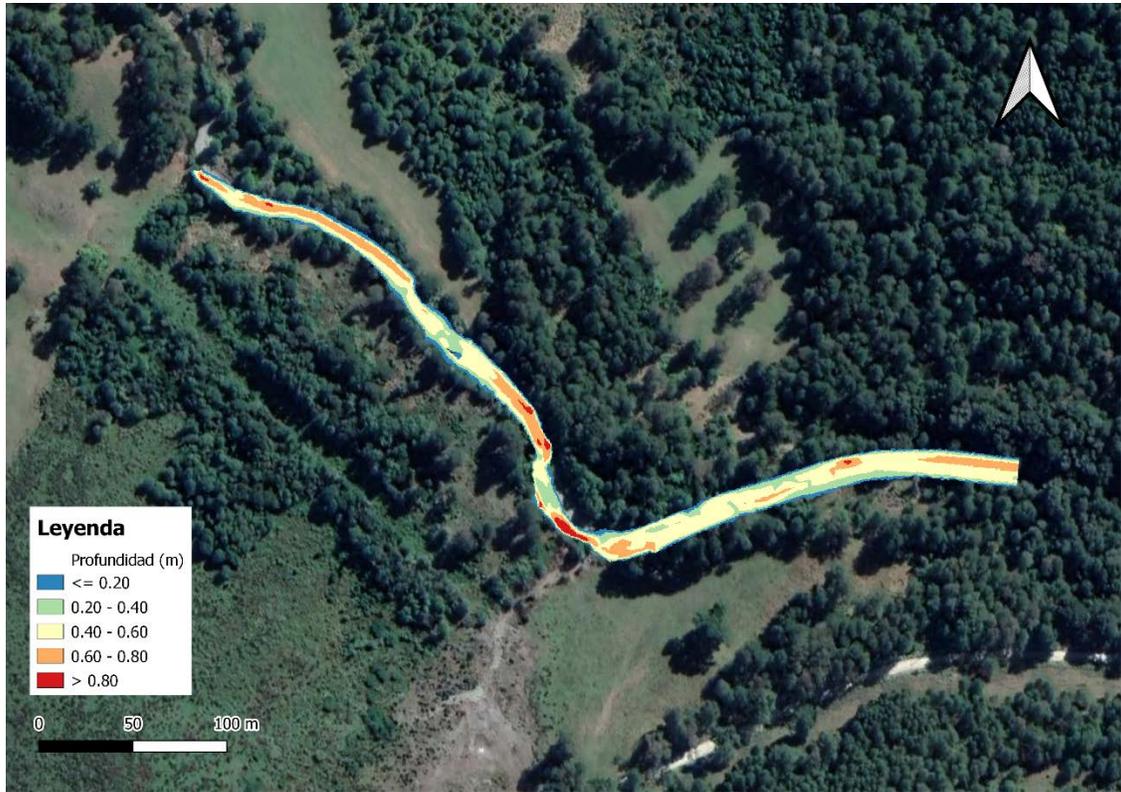


Figura 35: Profundidades obtenidas para Caudal Medio Mensual, Junio.

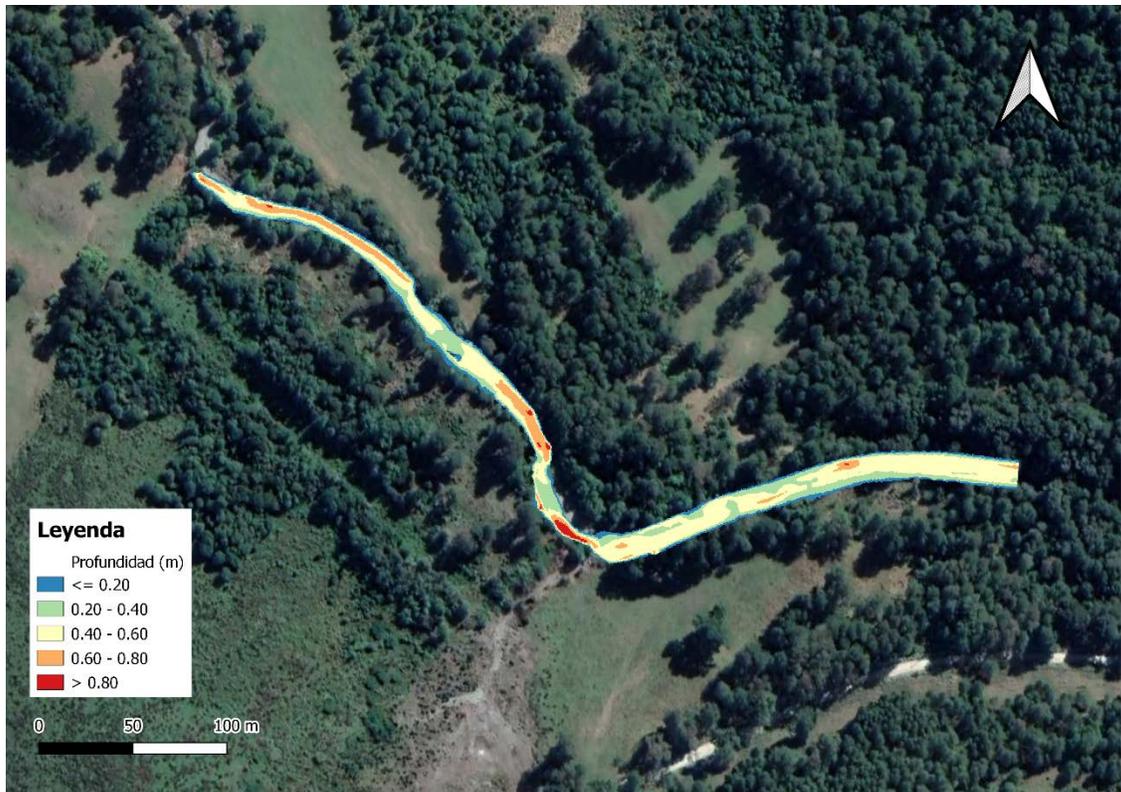


Figura 36: Profundidades obtenidas para Caudal Medio Mensual, Julio.

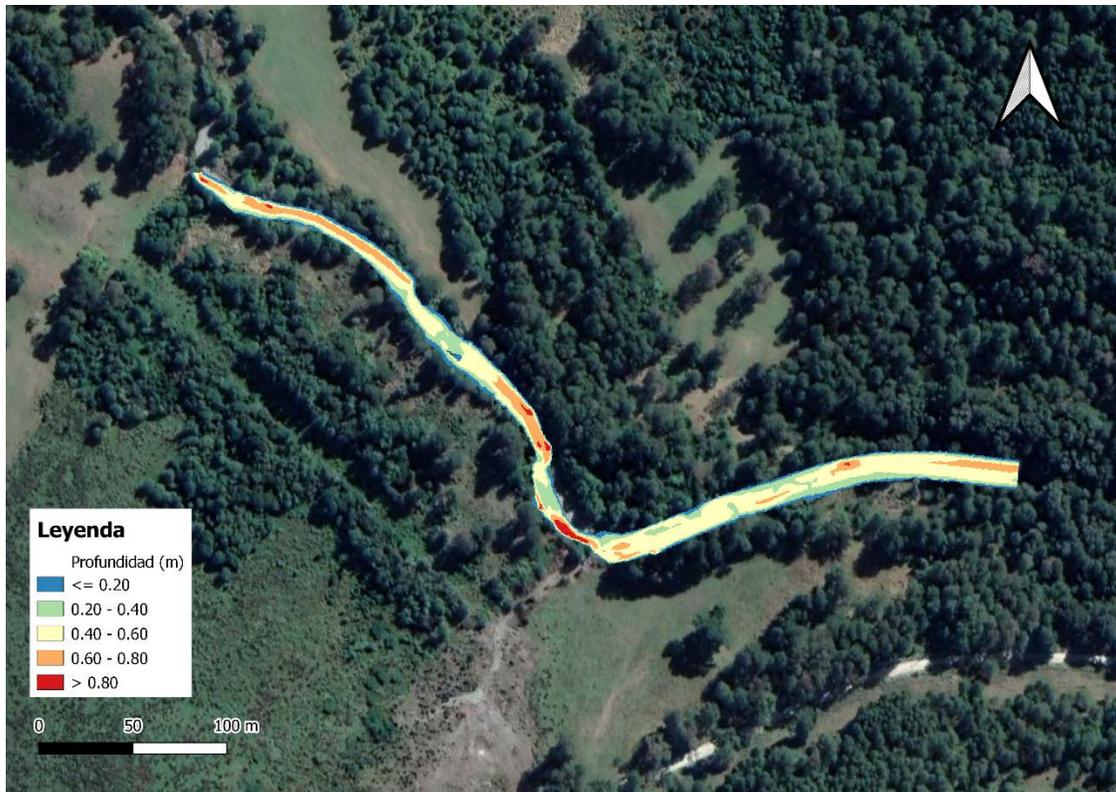


Figura 37: Profundidades obtenidas para Caudal Medio Mensual, Agosto.

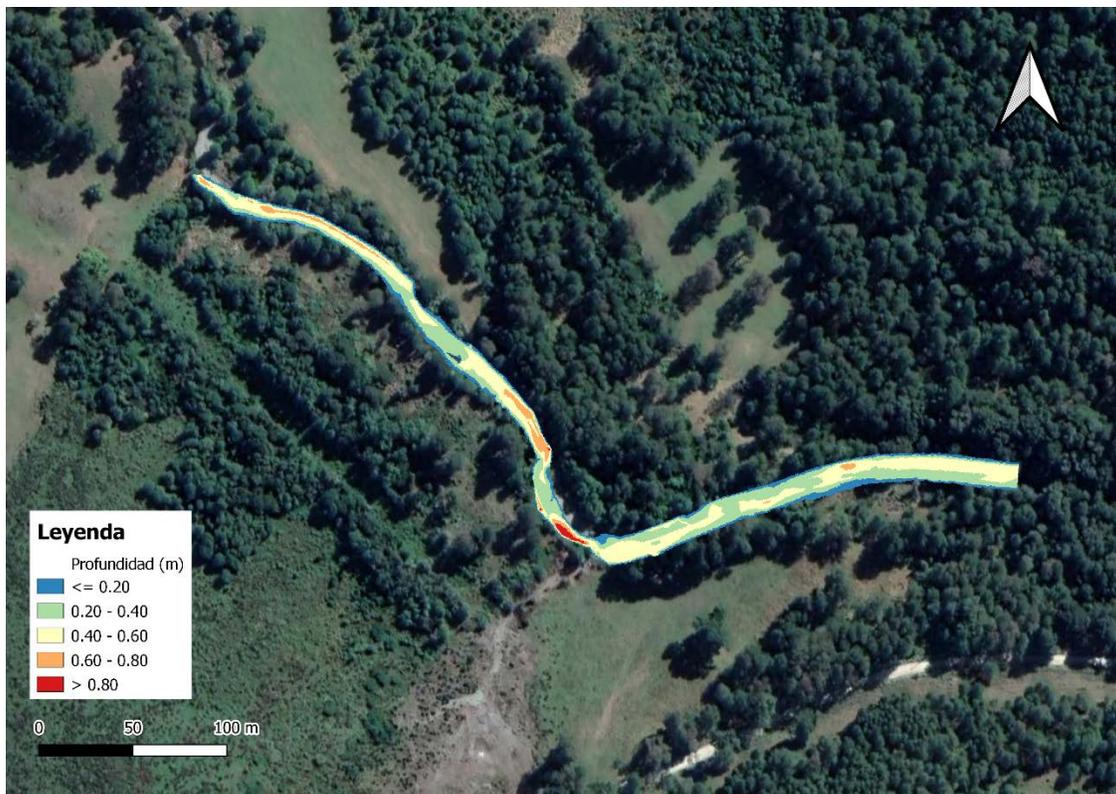


Figura 38: Profundidades obtenidas para Caudal Medio Mensual, Septiembre.

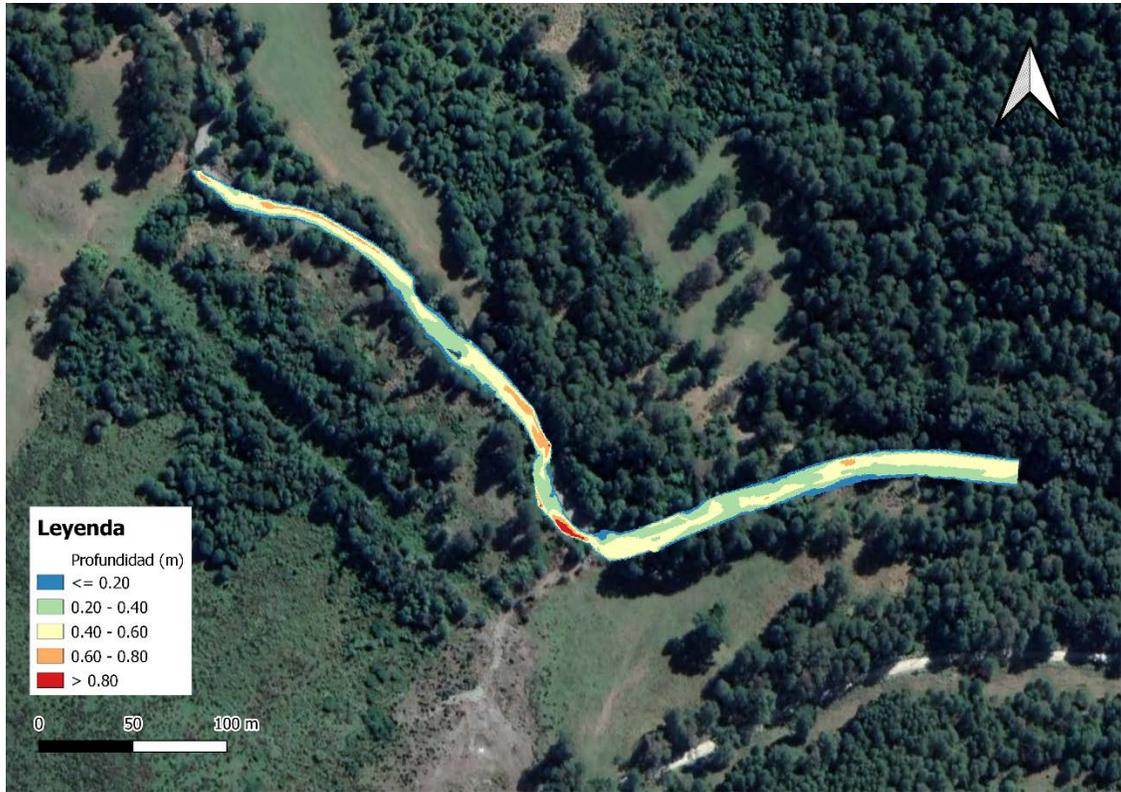


Figura 39: Profundidades obtenidas para Caudal Medio Mensual, Octubre.

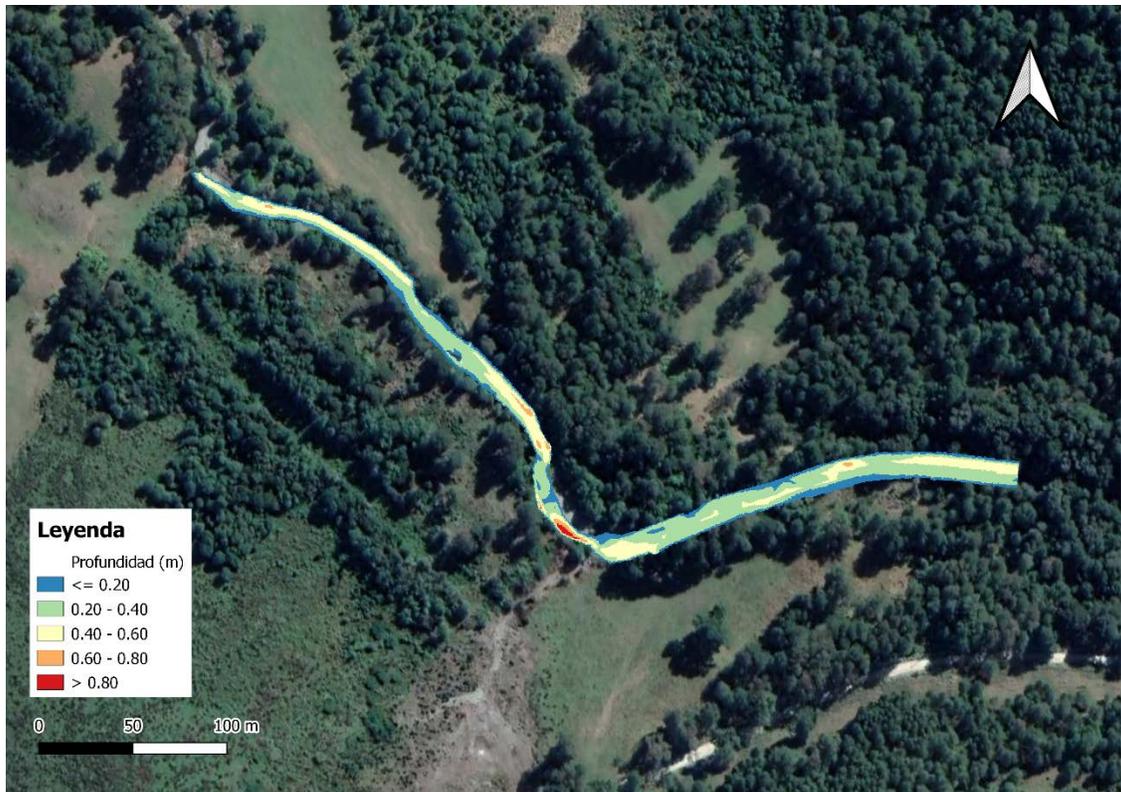


Figura 40: Profundidades obtenidas para Caudal Medio Mensual, Noviembre.

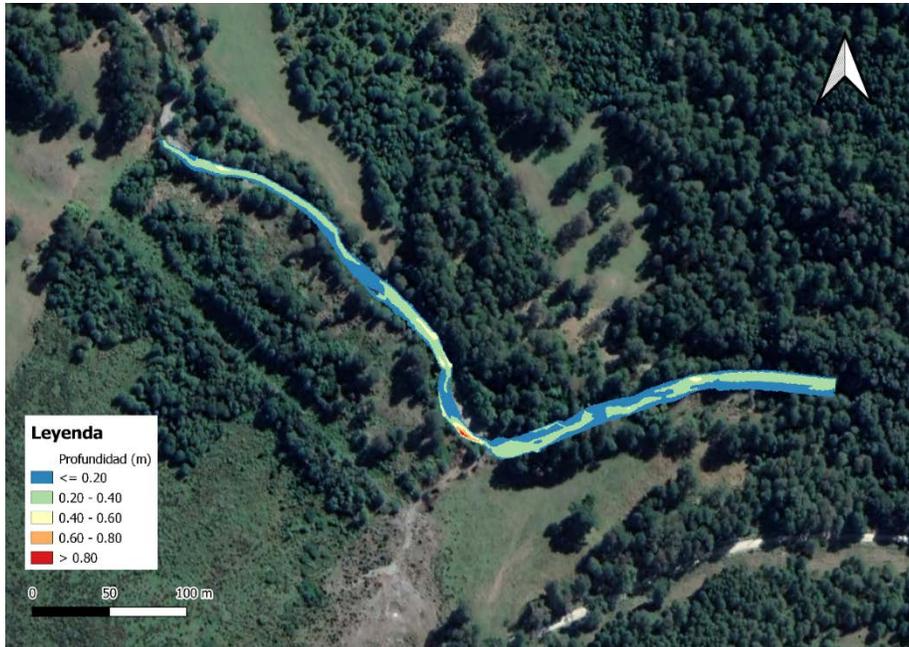


Figura 41: Profundidades obtenidas para Caudal Medio Mensual, Diciembre.

8.8.2 Inundación caudales de crecida

De la Figura 42 a la Figura 48 se presentan las profundidades obtenidas en el modelo para los caudales de crecida con un período de retorno de 2 años a 150 años. Se puede apreciar que dichos caudales producen desbordes en el río Trafampulli hacia la ribera izquierda.

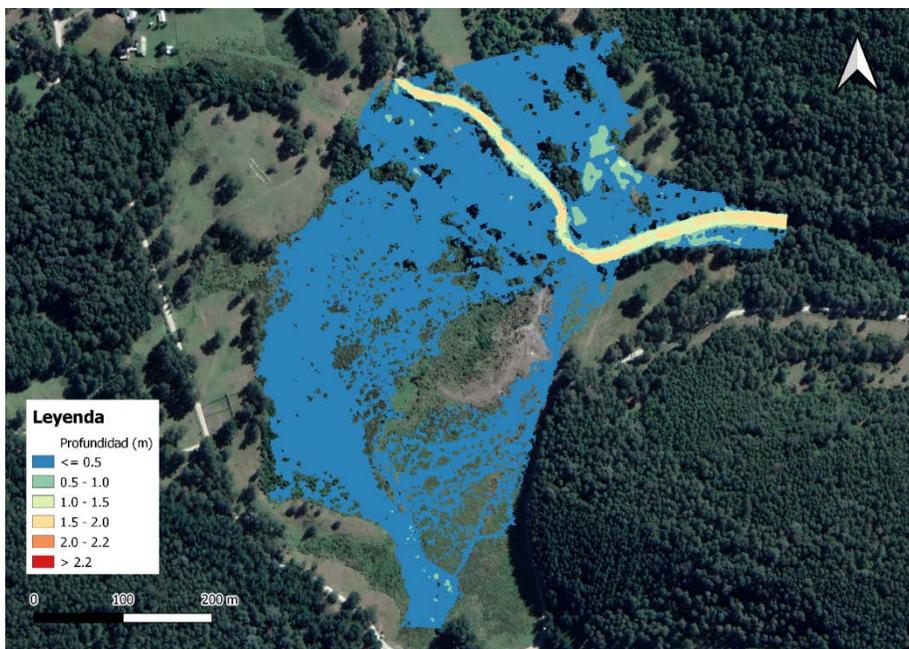


Figura 42: Profundidades obtenidas para Caudal de Crecida período de retorno 2 años.

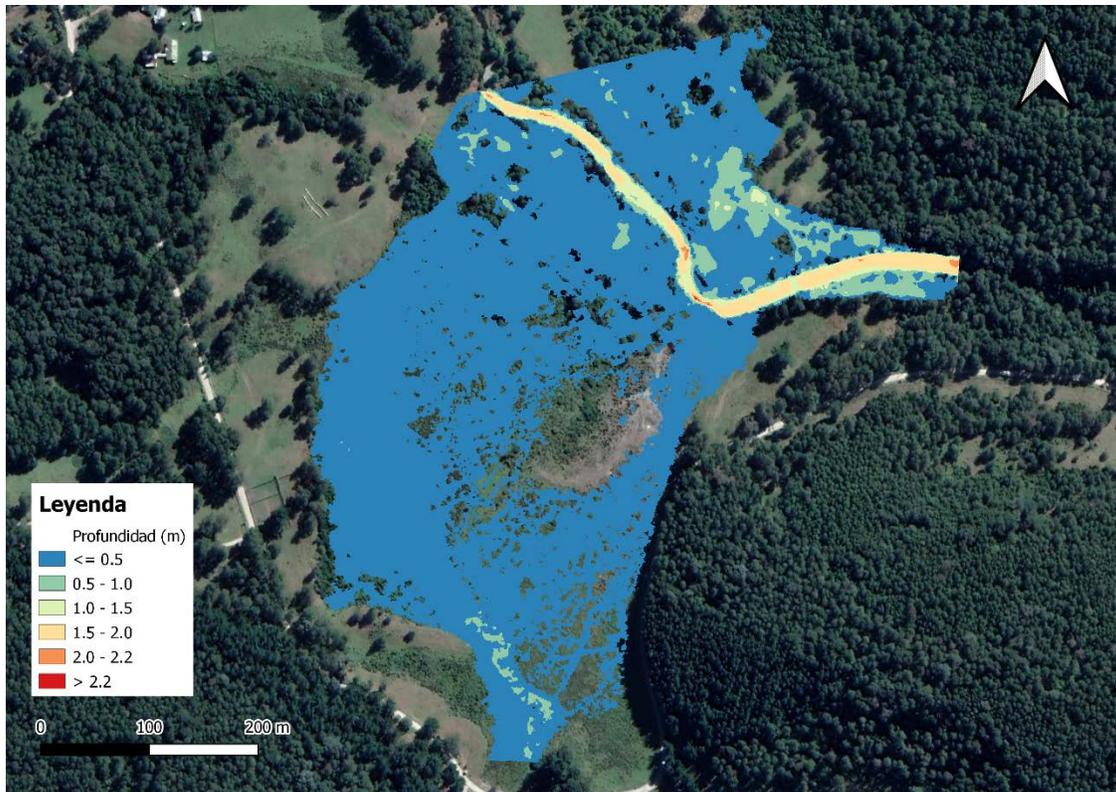


Figura 43: Profundidades obtenidas para Caudal de Crecida período de retorno 5 años.

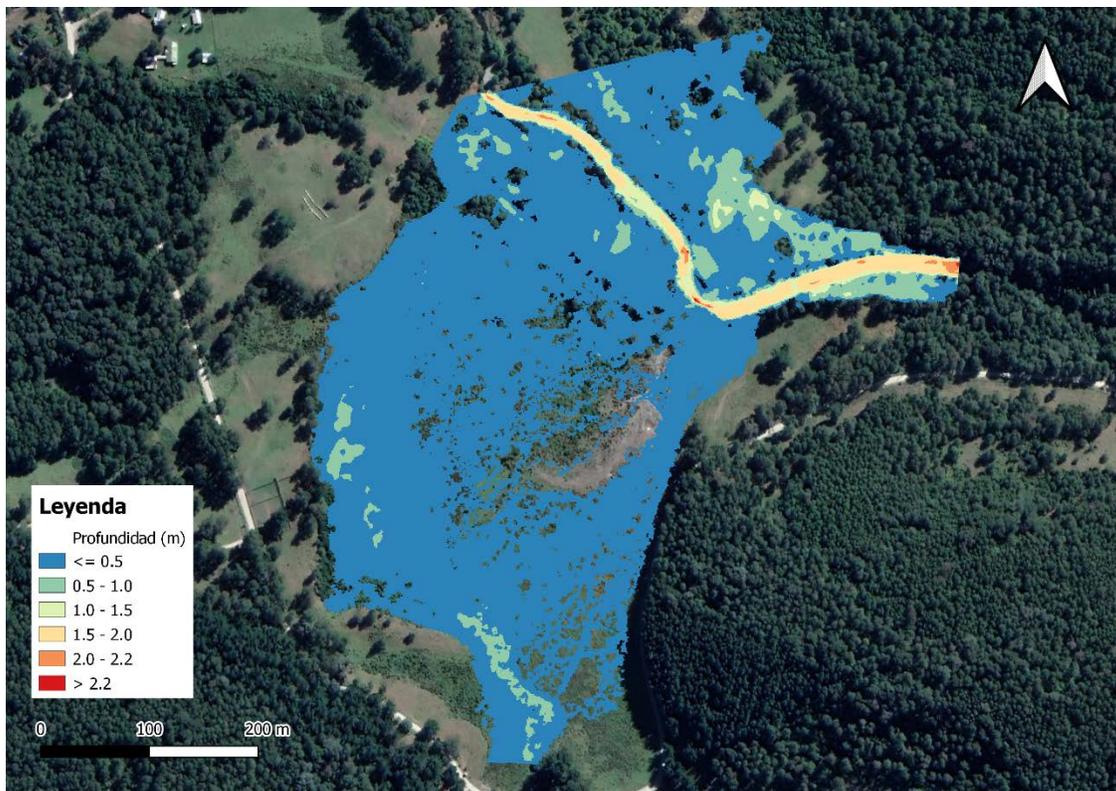


Figura 44: Profundidades obtenidas para Caudal de Crecida período de retorno 10 años.

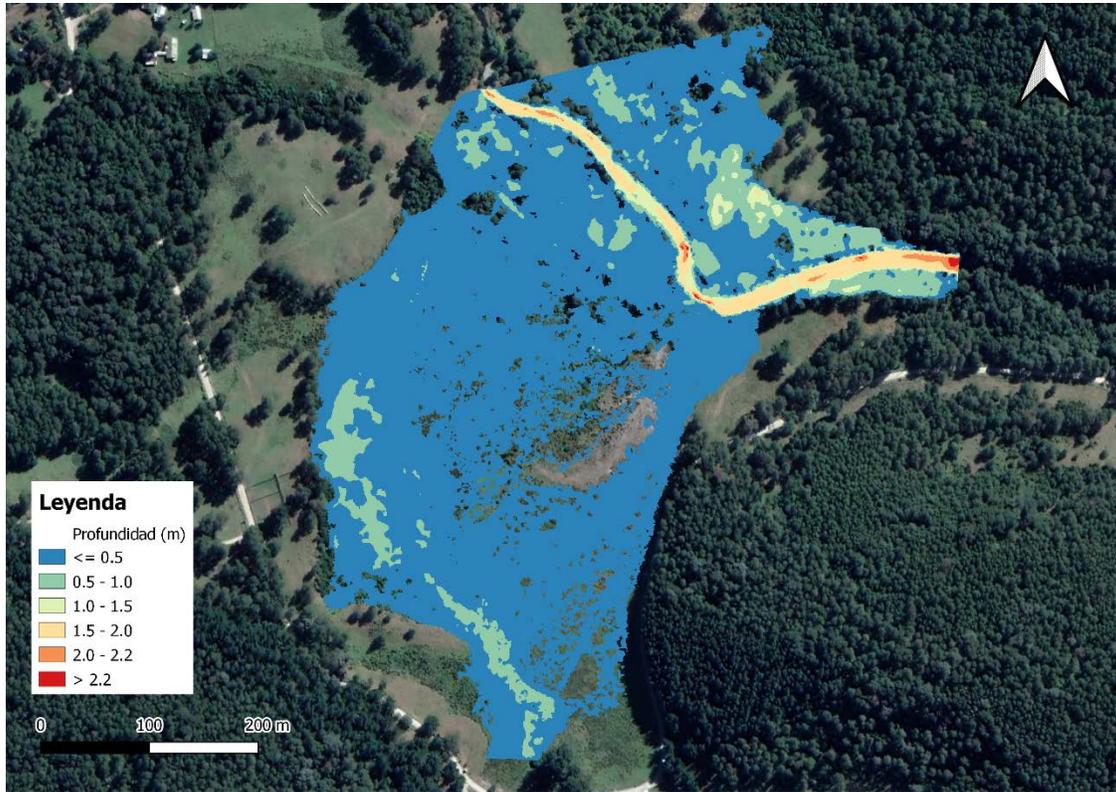


Figura 45: Profundidades obtenidas para Caudal de Crecida período de retorno 25 años.

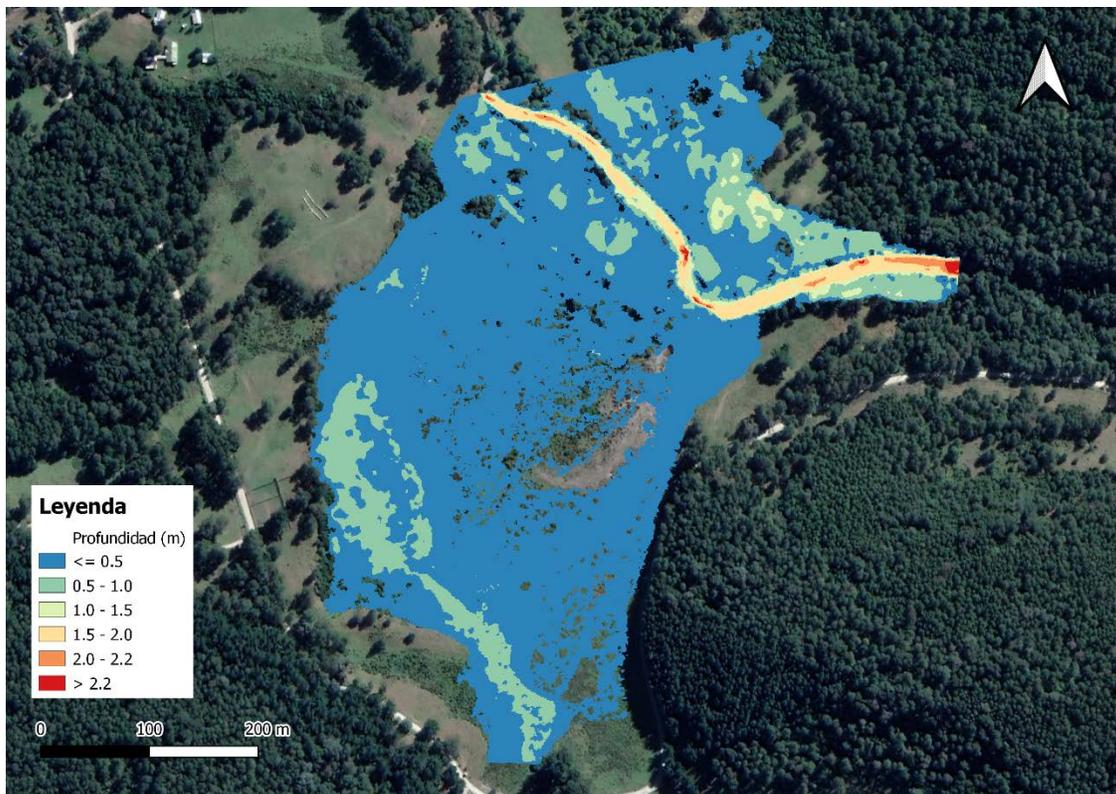


Figura 46: Profundidades obtenidas para Caudal de Crecida período de retorno 50 años.

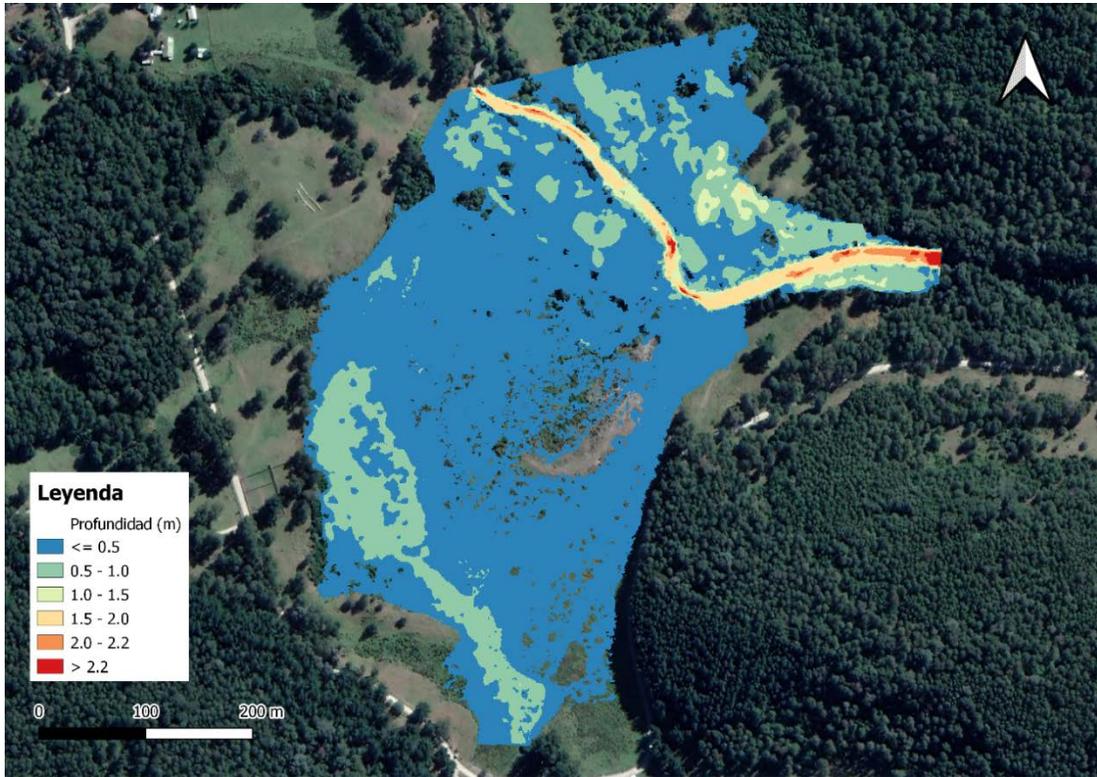


Figura 47: Profundidades obtenidas para Caudal de Crecida período de retorno 100 años.

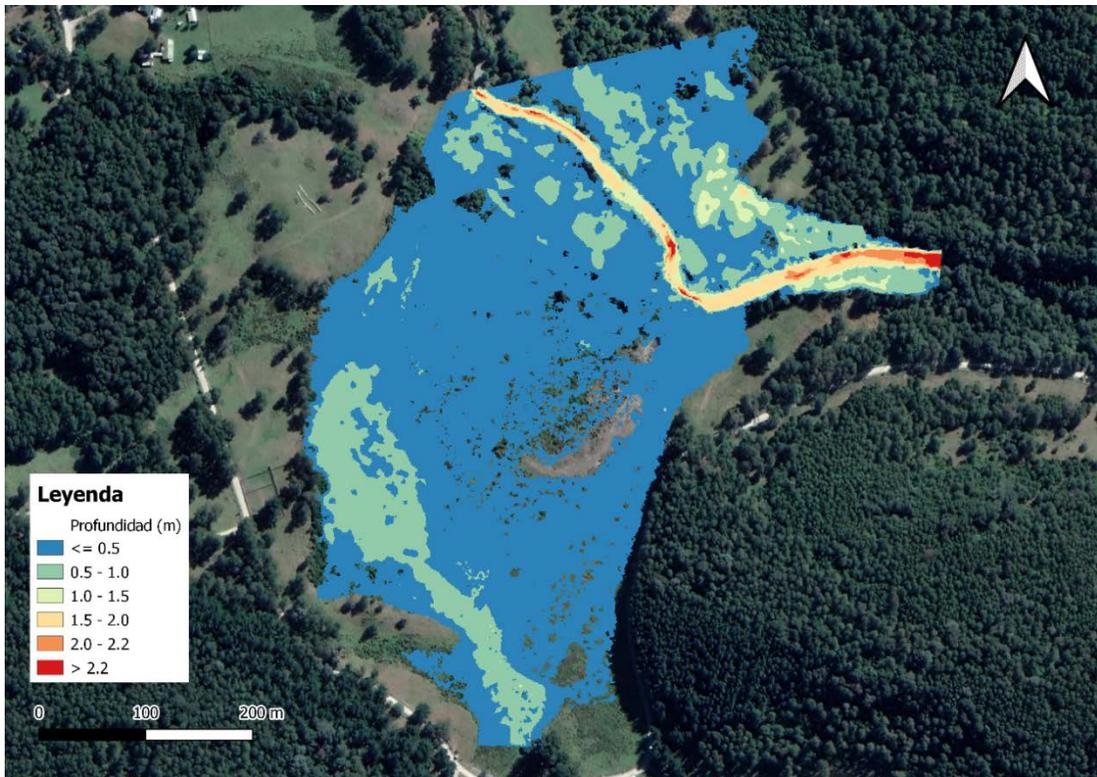
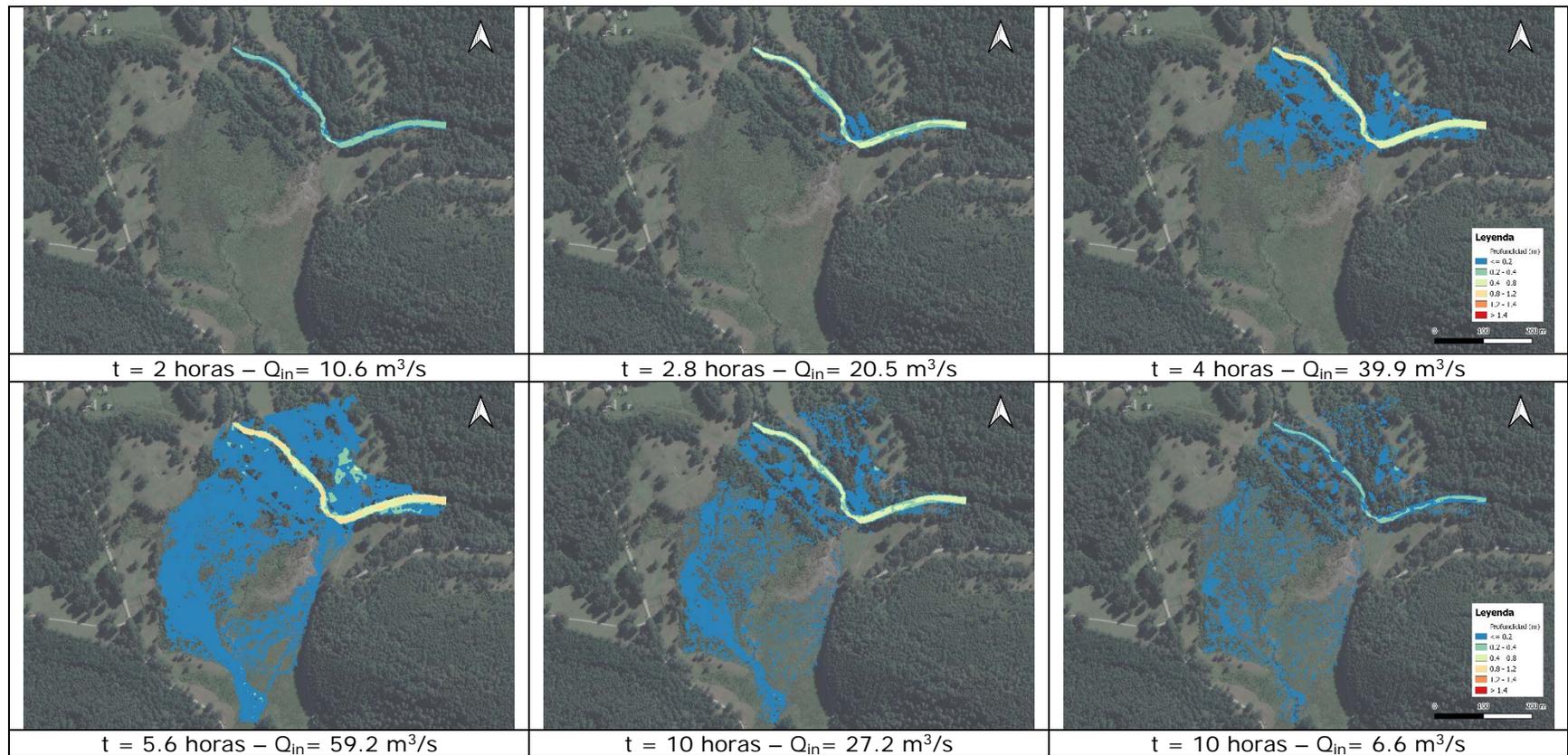


Figura 48: Profundidades obtenidas para Caudal de Crecida período de retorno 150 años.

8.8.3 Evolución hidrograma de crecida

En la Tabla 30 se presentan las profundidades obtenidas en el modelo para el hidrograma de crecida con un período de retorno de 2 años. Se puede observar que el desborde del río Trafampulli hacia el lago Caburgua comienza a darse a las 2.8 horas desde el inicio de la crecida, alcanzando su máximo caudal a las 5.6 horas, para posteriormente ir decreciendo y drenando el flujo restante en las planicies de inundación hacia el lago Caburgua

Tabla 30: Evolución de la crecida del hidrograma simulado para distintos tiempos de análisis.



8.8.4 Capacidad de porteo máxima

La capacidad de porteo máxima del río Trafampulli fue estimada mediante iteraciones de caudal en la modelación hidráulica, donde se determinó un caudal de 20.5 m³/s como capacidad máxima de porteo, con el cual no se desborda el cauce hacia la ribera izquierda. En la Figura 49 se observa las profundidades de escurrimiento obtenidas para la capacidad de porteo máxima.

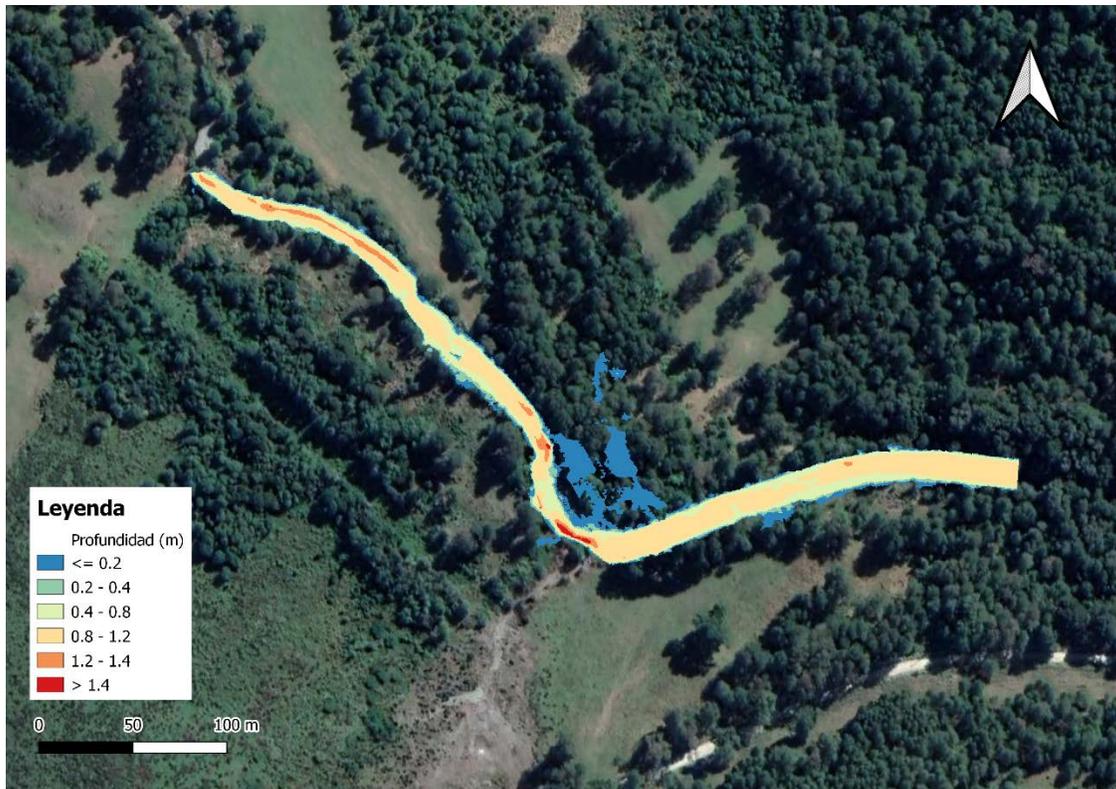


Figura 49: Profundidades obtenidas para Capacidad Máxima de Porteo, Río Trafampulli.

Se caracterizó la zona de inundación para un caudal superior al caudal de máximo porteo con la finalidad de evaluar cómo se desarrolla el desborde del río Trafampulli. En la Figura 50 se puede observar el desborde producido en el río Trafampulli para un caudal de 21.5 m³/s donde se aprecia que el caudal excedente es conducido hacia la planicie de inundación de la ribera izquierda siguiendo una dirección de flujo de norte a sur hacia el Lago Caburgua.

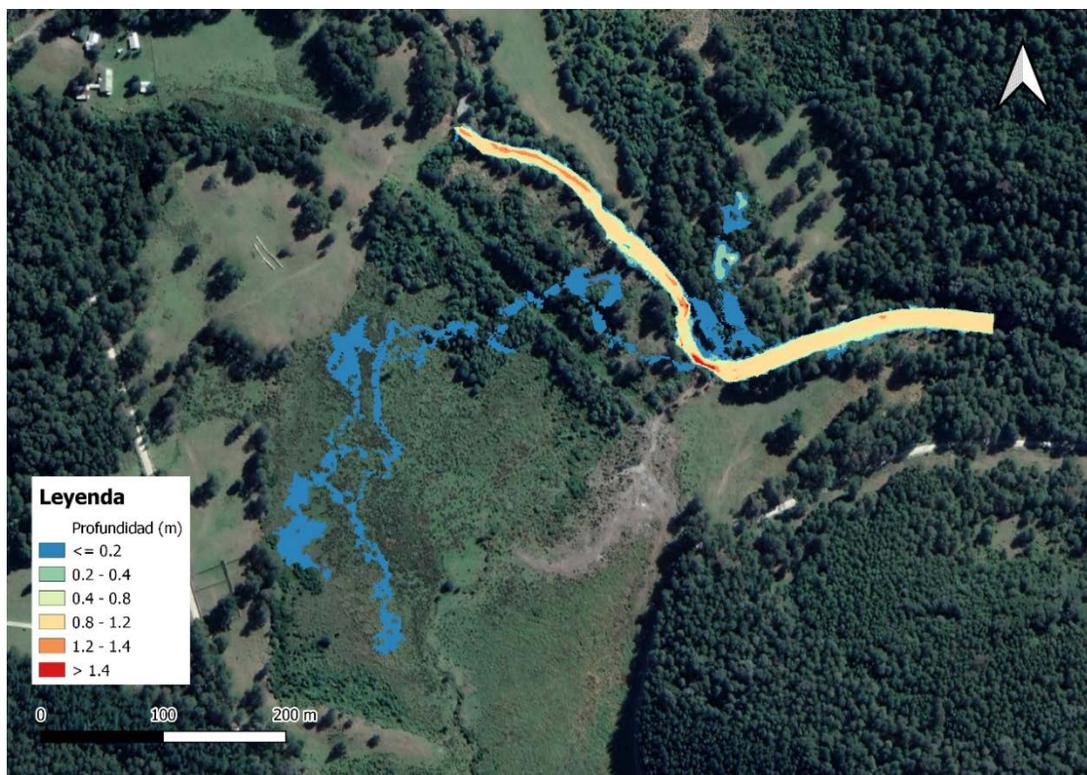


Figura 50: Profundidades obtenidas para desborde, caudal 21.5 m³/s.

8.8.5 Caudal aportante al lago Caburgua

Del análisis de crecidas se obtienen los caudales excedentes que drenan hacia el Lago Caburgua para cada escenario modelado, los que se presentan en la Tabla 31. Se observa que sólo para los caudales de crecida el caudal excedente drena hacia el Lago Caburgua, con relaciones desde el 5% para un período de retorno de 2 años, hasta un 15% del caudal entrante para un período de retorno de 150 años.

Tabla 31: Caudales excedentes hacia el Lago Caburgua.

Situación	Caudal entrante (m ³ /s)	Caudal Trafampulli (m ³ /s)	Caudal hacia Lago Caburgua (m ³ /s)	Caudal Trafampulli (%)	Caudal hacia Lago Caburgua (%)
Capacidad de Porteo máxima	20.5	20.5	0	100	0
Crecida T=2 años	59.19	56.34	2.86	95	5
Crecida T=5 años	81.98	75.31	6.67	92	8
Crecida T=10 años	94.49	85.28	9.21	90	10
Crecida T=25 años	107.4	95.00	12.39	88	12
Crecida T=50 años	116.42	101.57	14.85	87	13
Crecida T=100 años	124.91	107.59	17.33	86	14
Crecida T=150 años	130.17	111.25	18.92	85	15

En la Figura 51 se presenta la curva que correlaciona el caudal del río Trafampulli respecto de lo que podría desbordar hacia el Lago Caburgua. Se observa una relación creciente, donde un mayor caudal en el río Trafampulli también produce un mayor desborde hacia el lago. En efecto, caudal mayor escurre a mayor altura, aumentando la extensión de la ribera izquierda para funcionar como vertedero lateral.

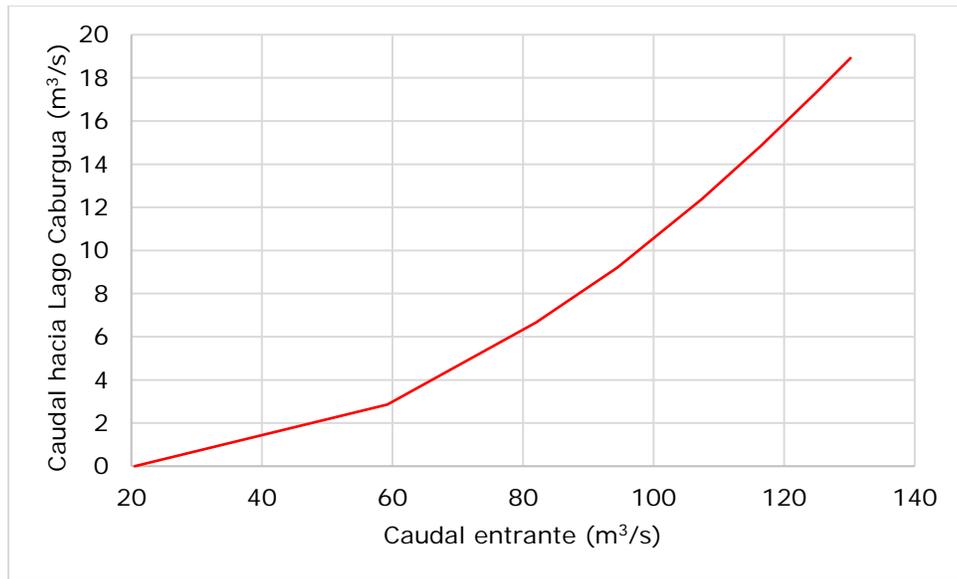


Figura 51: Curva de descarga, desbordes del río Trafampulli hacia el Lago Caburgua.

9 Conclusiones

En la visita a terreno se pudo constatar que el cauce del río Trafampulli se encuentra intervenido, captando un porcentaje considerable de su caudal hacia su ribera izquierda, desde donde drena hacia el lago Caburgua. Sin embargo, la morfología de la zona donde escurre actualmente el agua tiene características de planicie de inundación, sin huellas de algún cauce estable que conduzca el flujo; y consecuentemente el agua se esparce por los sectores más bajos del terreno y no por un cauce definido.

En la campaña de terreno se registró un caudal de 4.767 m³/s en el río Trafampulli, donde el 19% estaba siendo drenado hacia el lago Caburgua mediante las obras existentes.

Se realizó una campaña topográfica que permitió caracterizar el lecho del cauce y su planicie de inundación, cubriendo una extensión que permitió desarrollar adecuadamente una modelación hidráulica.

El análisis hidrológico determinó caudales medios mensuales 0.68 m³/s y 6.64 m³/s para los meses de febrero y junio, respectivamente; y caudales de crecida comprendidos entre los 59.19 m³/s y 130.17 m³/s para a periodos de retorno de 2 y 150 años, respectivamente. Por otro lado, los resultados muestran que la duración de las crecidas en la zona analizada alcanza un tiempo estimado de 15 horas, alcanzándose el caudal peak de la crecida en un tiempo aproximado de 5 horas.

La capacidad de porteo máxima del río Trafampulli se asocia a un caudal de 20.5 m³/s, con el cual no existe caudal excedente del río Trafampulli que drene hacia el Lago Caburgua. Para los caudales de crecidas se obtienen caudales excedentes que drenan hacia el Lago Caburgua que van desde el 5% del caudal para un período de retorno de 2 años, hasta un 15% del caudal para un período de retorno de 150 años.

Con los antecedentes desarrollados se puede concluir que el río Trafampulli en condiciones naturales no drena agua superficialmente hacia el lago Caburgua para condiciones normales de flujo, y sólo presentaría aportes durante eventos de tormenta relevantes, los cuales representarían un volumen limitado dada su corta duración.

10 Referencias Bibliográficas

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., ... Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1–10

CEDEX. (2010). Manual de referencia hidráulico Iber.

DGA (1995). Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas Sin Información Fluviométrica.

MOP (2022). Manual de Carreteras. Volumen N° 3. Instrucciones y Criterios de Diseño.

Moriasi, D., Gitau, M., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763–1785.

Anexo 1: Calibración modelo hidráulico

Con objetivo de realizar la calibración del modelo, se tomaron las cotas de pelo de agua del cauce registradas al momento de realizar los aforos presentados en la sección 5. Lo anterior permitió comparar las profundidades del agua simulada con las medidas en terreno para el caudal aforado, los puntos y perfiles considerados para realizar la calibración se presentan en la Figura 52 y sus coordenadas en la Tabla 32.

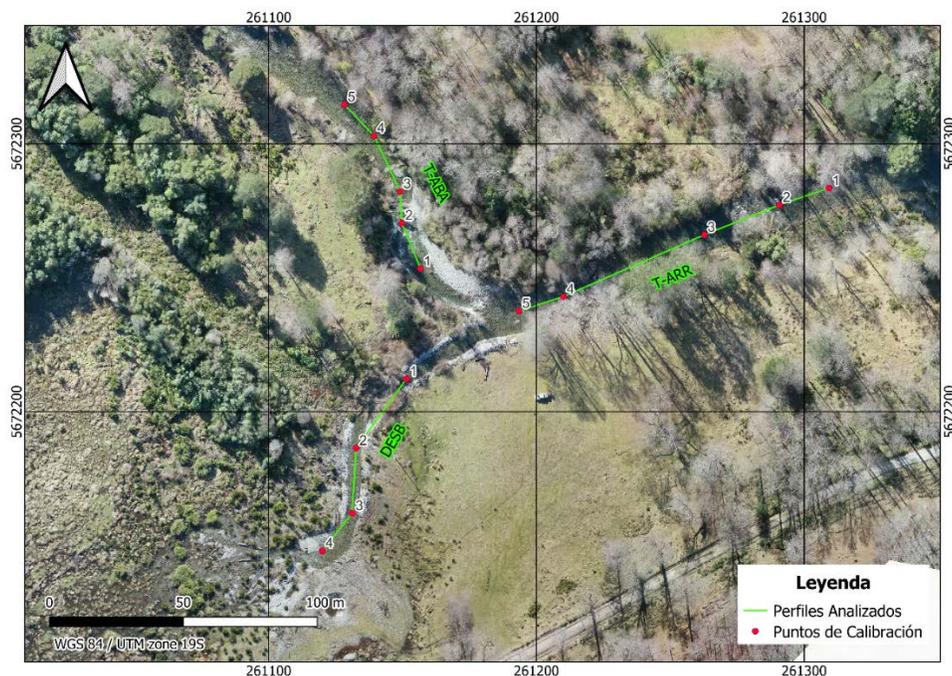


Figura 52: Puntos de calibración utilizados.

Tabla 32: Detalle de perfiles analizados para realizar calibración.

Perfil	Zona	Punto	Distancia (m)	Coordenadas WGS84-UTM19S		Pelo de agua medido (m)
				Este (m)	Norte (m)	
T-ARR	Aguas arriba desborde	1	0	261309	5672284	499.8
		2	20	261291	5672277	499.59
		3	50	261263	5672266	499.23
		4	107	261210	5672243	498.57
		5	125	261193	5672238	498.45
T-ABA	Aguas abajo desborde	1	0	261157	5672253	497.74
		2	18	261150	5672270	497.36
		3	30	261149	5672282	496.93
		4	53	261139	5672303	496.81
		5	69	261128	5672315	496.73
DESB	Desborde	1	0	261151	5672212	498.11
		2	32	261133	5672186	497.74
		3	56	261131	5672162	497.54
		4	74	261120	5672148	497.46

El parámetro de calibración utilizado fue el coeficiente de rugosidad de Manning, simulando 11 escenarios (Tabla 33) con distintas combinaciones de coeficientes de Manning para cada zona analizada (T-ARR, T-ABA y DESB), en todos los escenarios se utilizó el caudal aforado aguas arriba del punto de desborde. La selección del coeficiente fue realizada mediante los indicadores de bondad de ajuste (R^2 , eficiencia de Nash-Sutcliffe y *Percent Bias*) y según la *performance* de cada uno según lo planteado en Moriasi (2015).

Tabla 33: Escenarios de calibración considerados.

ID Modelo	Manning		
	T-ARR	T-ABA	DESB
1	0.030	0.035	0.035
2	0.030	0.040	0.035
3	0.035	0.040	0.035
4	0.035	0.040	0.040
5	0.025	0.030	0.030
6	0.045	0.050	0.025
7	0.050	0.055	0.030
8	0.055	0.055	0.030
9	0.060	0.055	0.030
10	0.055	0.045	0.045
11	0.055	0.045	0.050

Los resultados obtenidos para la zona T-ARR se presentan en la Tabla 34 y Figura 53, resaltando el valor de Manning seleccionado.

Tabla 34: Resultados calibración para la zona T-ARR.

ID Modelo	Manning	Bondad de ajuste			Performance		
	T-ARR	R^2	NSE	PBIAS	R^2	NSE	PBIAS
1	0.030	0.996	0.907	-0.032	Very Good	Very Good	Very Good
3	0.035	0.997	0.927	-0.029	Very Good	Very Good	Very Good
5	0.025	0.996	0.899	-0.034	Very Good	Very Good	Very Good
6	0.045	0.998	0.956	-0.022	Very Good	Very Good	Very Good
7	0.050	0.998	0.971	-0.018	Very Good	Very Good	Very Good
8	0.055	0.998	0.976	-0.016	Very Good	Very Good	Very Good
9	0.060	0.998	0.983	-0.013	Very Good	Very Good	Very Good

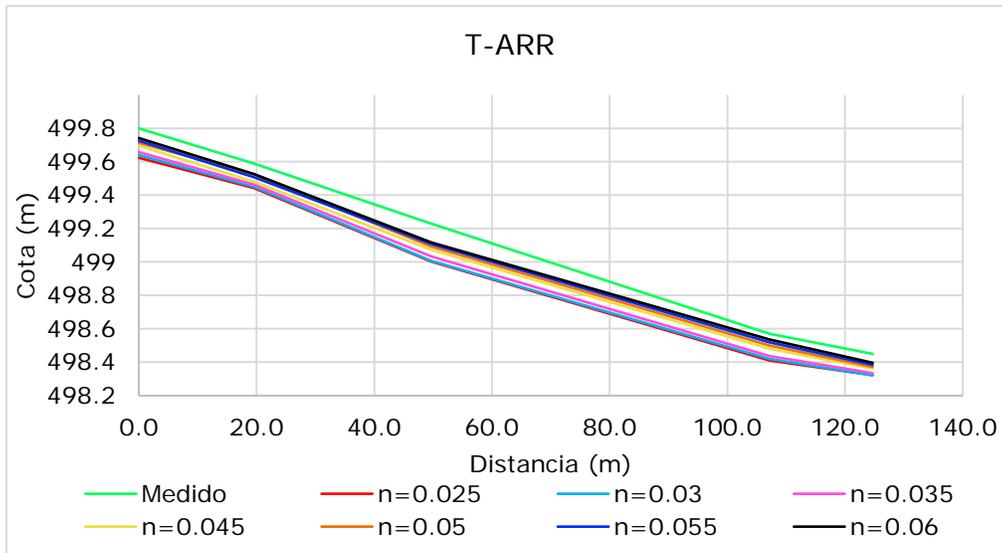


Figura 53: Resultados obtenidos para zona T-ARR.

Los resultados obtenidos para la zona T-ABA se presentan en la Tabla 35 y Figura 54, resaltando el valor de Manning seleccionado.

Tabla 35: Resultados calibración para la zona T-ABA.

ID Modelo	Manning	Bondad de ajuste			Performance		
	T-ABA	R ²	NSE	PBIAS	R ²	NSE	PBIAS
1	0.035	0.998	0.984	-0.008	Very Good	Very Good	Very Good
2	0.040	0.998	0.993	-0.005	Very Good	Very Good	Very Good
5	0.030	0.996	0.961	-0.014	Very Good	Very Good	Very Good
6	0.050	0.998	0.997	0.002	Very Good	Very Good	Very Good
7	0.055	0.998	0.991	0.006	Very Good	Very Good	Very Good
10	0.045	0.999	0.997	-0.002	Very Good	Very Good	Very Good

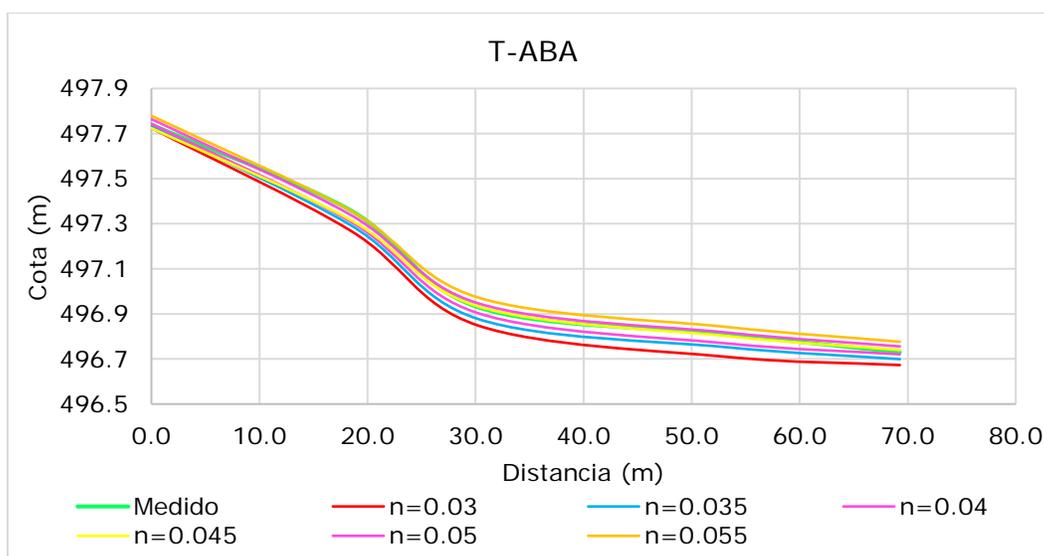


Figura 54: Resultados obtenidos para zona T-ABA.

Los resultados obtenidos para la zona DESB se presentan en la Tabla 36 y Figura 55, resaltando el valor de Manning seleccionado.

Tabla 36: Resultados calibración para la zona DESB.

ID Modelo	Manning	Bondad de ajuste			Performance		
	T-DESB	R ²	NSE	PBIAS	R ²	NSE	PBIAS
1	0.035	0.993	0.990	0.003	Very Good	Very Good	Very Good
4	0.040	0.995	0.992	0.003	Very Good	Very Good	Very Good
5	0.030	0.987	0.986	0.002	Very Good	Very Good	Very Good
6	0.025	0.979	0.977	-0.002	Very Good	Very Good	Very Good
7	0.030	0.987	0.986	0.002	Very Good	Very Good	Very Good
10	0.045	0.995	0.983	0.006	Very Good	Very Good	Very Good
11	0.050	0.998	0.989	0.005	Very Good	Very Good	Very Good

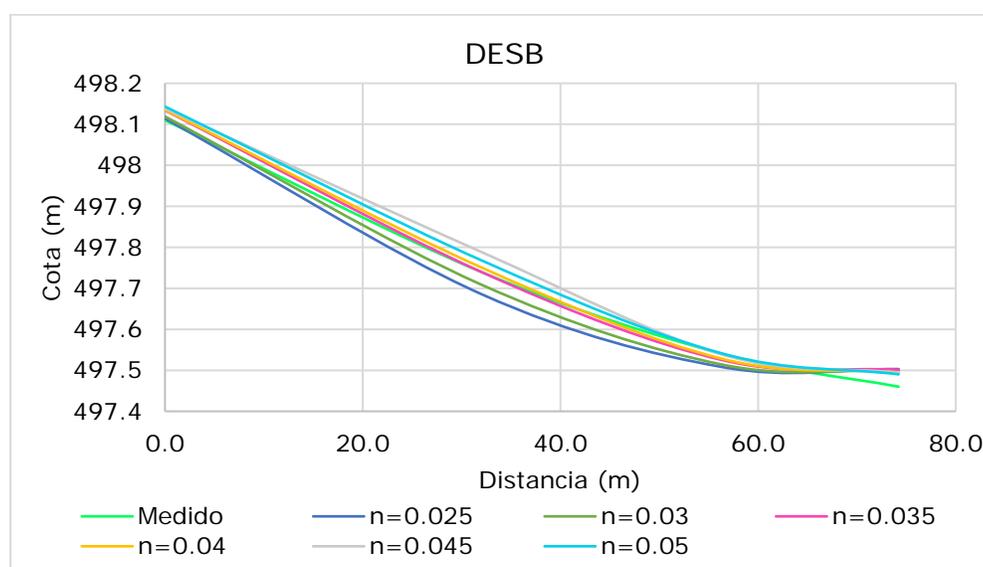


Figura 55: Resultados obtenidos para zona DESB.

En base al ajuste entregado por los test de bondad de ajuste y performance se seleccionaron los valores de Manning, los cuales se presentan en la Tabla 37.

Tabla 37: Resumen calibración realizada.

ID	Tramo	Manning seleccionado	Bondad de ajuste			Performance		
			R ²	NSE	PBIAS	R ²	NSE	PBIAS
T-ARR	Aguas arriba desborde	0.055	0.998	0.976	-0.016	Very Good	Very Good	Very Good
T-ABA	Aguas arriba desborde	0.045	0.999	0.997	-0.002	Very Good	Very Good	Very Good
DESB	Desborde	0.040	0.995	0.992	0.003	Very Good	Very Good	Very Good