



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN**

ANÁLISIS DE POTENCIALES CAUSAS DEL DESCENSO DEL LAGO CABURGUA.

INFORME FINAL

Realizado por:

UNIVERSIDAD DE CHILE

S.I.T N° 494

Santiago, Enero de 2022

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas

Ingeniero Civil Industrial, Sr. Alfredo Moreno Charme.

Director General de Aguas (S)

Ingeniero Civil, Sr. Cristián Nuñez Riveros

Jefe División de Estudios y Planificación

Ingeniero Civil, Sr. Mauricio Lorca Miranda

Inspector Fiscal

Geólogo, Sr. Marcelo Aliaga Alvarado

Inspector Fiscal subrogante

Ingeniera Agrícola, Sra. Pamela García Serrano
Ingeniera Civil, Sra. Carolina Herrera Araya

UNIVERSIDAD DE CHILE

Jefe del proyecto

Ingeniero Civil, Dr. James McPhee.

Especialistas

Especialista en hidrología
Ingeniera Civil, Sra. Ximena Vargas Mesa.

Especialista en hidrogeología
Geologa, Dra., Sra. Linda Daniele.

Equipo de profesionales

Geólogo, Dr., Sr. Matías Nicolás Taucare Toro.
Ingeniera Civil, Dra(c), Sra. Natalia Bustamante Penagos.

Para citar este informe considere:

Dirección General de Aguas (DGA), 2022. Análisis de las potenciales Causas del descenso del lago Caburgua, SIT N° 494, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Facultad de ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

Tabla de contenidos

1. Introducción	1
2. Revisión de antecedentes	2
2.1. Características generales	2
2.2. Antecedentes relativos al cauce del río Trafampulli	5
3. Caracterización de la zona de estudio e información disponible	11
3.1. Información hidroclimática	11
3.1.1. Precipitación	13
3.1.2. Temperatura	17
3.1.3. Caudales	19
3.1.4. Niveles de lagos	24
3.1.5. Evaporación	27
3.2. Análisis geomorfológico	28
3.2.1. Análisis de fotografías aéreas - Servicio Aerofotogramétrico de la Fuerza Aérea de Chile.	31
3.3. Información geológica	34
3.3.1. Calidad de agua	35
3.4. Análisis de información geológica e hidrogeológica	36
3.4.1. Circulación de agua subterránea y fluidos por los sistemas de fallas	36
3.4.2. Niveles piezométricos	37
3.5. Derechos de Aprovechamiento de Aguas	37
4. Análisis multitemporal de cobertura de nieve y cuerpos de agua	51
4.1. Cobertura nival	51
4.2. Cuerpos de agua	52
5. Modelo Conceptual	57
6. Balance hídrico	61
7. Sistematización de hipótesis sobre el descenso del Lago Caburgua	65
7.1. Cambios en el régimen de precipitaciones y temperaturas	65
7.2. Modificaciones en las filtraciones subterráneas del lago por actividad sísmica	65
7.3. Alteraciones en el curso de cauces afluentes	68
7.4. Incrementos en las extracciones de agua desde cuerpos de agua, controladas y no controladas.	68

8. Recomendaciones	69
9. Conclusiones	71
Anexos	77
A. Evaporación	78
A.1. Viento	78
A.2. Radiación solar	79
A.3. Estimación de la evaporación	80
B. Caudales máximos río Trafampulli	82
C. Calidad de agua	84

Anexos digitales

- A. Datos Evaporación
- B. Datos Caudales Máximos río Trafampulli
- C. Datos Calidad de agua
- D. Balance Hídrico
- E. Tendencias regionales
- F. Proyecto SIG
- G. Códigos utilizados en el estudio
- H. Presentación final
- I. Información hidroclimáticas DGA y CR2Met
- J. Aerofotografías SAF
- K. Archivos de texto para los códigos

Índice de figuras

2.1. Cuenca asociada al puente Caburgua. Fuente: Ministerio de Obras Públicas (2014b)	5
2.2. Línea de tiempo y resumen de antecedentes relevantes sobre el lago Caburuga. Fuente: Elaboración propia.	10
3.1. Localización de las estaciones meteorológicas y fluviométricas en el sector del Lago Caburgua. Fuente: Elaboración propia. Datum WGS84-UTM19S.	12
3.2. Polígonos de Thiessen para las estaciones de precipitación. Fuente: Elaboración propia utilizando datos de la Dirección General de Aguas. Datum WGS84-UTM19S.	14
3.3. Series anuales de precipitación de las estaciones con influencia en la cuenca del Lago Caburgua. Fuente: Elaboración propia con datos de precipitación de la DGA.	15
3.4. Comparación de las series de precipitación medidas por DGA (en azul) y las series de precipitación modeladas por el CR2Met (en rojo) en el punto de la estación DGA. Fuente: Elaboración propia con datos de precipitación del CR2Met y de la DGA.	16
3.5. Polígonos de Thiessen para las estaciones de temperatura. Fuente: Elaboración propia utilizando datos de la Dirección General de Aguas. Datum WGS84-UTM19S.	18
3.6. Temperatura media anual de las estaciones meteorológicas (en azul) y la línea de tendencia (línea roja). Fuente: Elaboración propia.	19
3.7. Caudales medios anuales de las estaciones fluviométricas (en azul) y la línea de tendencia (línea roja). Fuente: Elaboración propia con datos de caudal del BNA.	21
3.8. Variación estacional de caudales. Fuente: Elaboración propia con datos de caudales del BNA.	21
3.9. Fases del fenómeno El ENSO y la variación estacional de las series de caudales de las estaciones operadas por el BNA.	22
3.10. Caudales aforados en m ³ /s río Trafampulli en Rinconada.	23
3.11. Niveles medios mensuales de agua en los lagos Villarrica y Caburgua. Fuente: Elaboración propia con datos de las estaciones de nivel Lago Caburgua y Lago Villarrica.	26
3.12. Niveles medios anuales de agua en los lagos Villarrica y Caburgua. Fuente: Elaboración propia con datos de las estaciones de la DGA de nivel Lago Caburgua y Lago Villarrica.	26
3.13. Variación estacional de los niveles de agua registrados de los lagos Villarrica y Caburgua. Fuente: Elaboración propia con datos de la Dirección General de Agua para el período 1985-2000 para el lago Villarrica y 2000-2021 para el lago Caburgua.	27
3.14. Isolínea de evaporación de tanque, la temperatura en °C está representada con línea roja y la evaporación en mm/año con la línea verde. Fuente: DGA (1987).	28
3.15. Cuencas hidrográficas del la zona de estudio delimitadas con herramientas de software Grass utilizando modelos de elevación digital Alos Palsar. A pesar de que el resultado del procesamiento de imágenes Alos Palsar incluye la cuenca del Río Trafampulli dentro de la del Lago Caburgua, la cuenca se delinea segmentada en ese sector dado que la naturaleza y magnitud de esta conexión se mantiene indeterminada aún.Fuente: Elaboración propia. Datum WGS84-UTM19S	30
3.16. Perfil longitudinal del río Trafampulli. Fuente: Elaboración propia con datos de los modelos digitales de terreno Alos Palsar, alta resolución (RT1), baja resolución (RT2), y SRTM.	31

3.17. Evolución temporal del río Trafampulli en el sector de la defensa ribereña. a) Aérofotografía IGM 1943 y b) Aérofotografía IGM 1961. Ambas imágenes fueron suministradas por la corporación Caburgua Sustentable y fueron adquiridas en el Instituto Geográfico Militar. Fuente: Elaboración propia.	32
3.18. Zoom a la zona de la bahía en el sector Llanqui-Llanqui. a) Aerofotografía IGM 1943 y b) Aerofotografía IGM 1961. Ambas imágenes fueron suministradas por la corporación Caburgua Sustentable y fueron adquiridas en el Instituto Geográfico Militar. Fuente: Elaboración propia.	33
3.19. Evolución temporal del río Trafampulli en el sector de la defensa ribereña. a) Aerofotografía SAF 1979, b) Aerofotografía SAF 1994, c) Aerofotografía SAF 1998 y d) Aerofotografía SAF 2007 suministrada por la corporación Caburgua Sustentable. Fuente: Elaboración propia. . . .	34
3.20. a) Rasgos tectónicos principales de la Zona Volcánica Sur mostrando el Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui (líneas negras) y las Fallas Transversales a los Andes (líneas azules). La flecha blanca representa el vector de convergencia entre la Placa Nazca y la Placa Sudamericana (Angermann et al. 1999). b) Mapa geológico regional del área de estudio mostrando la relación espacial entre los volcanes y manantiales termales respecto a los sistemas de fallas mayores. La información litológica y estructural está basada en los siguientes trabajos: (Rosenau et al. 2006, Lara and Moreno 2008, Held et al. 2016, Kapinos et al. 2016, Pérez-Flores et al. 2016, Sielfeld et al. 2019). Figura modificada de (Daniele et al. 2020). Datum: WGS84-UTM19S.	41
3.21. Distribución espacial de las estaciones de monitoreo de calidad de agua en el área del Lago Caburgua. Elaboración propia con datos tomados del <i>Inventario Público de Información Hidrológica y Meteorológica</i> de la Dirección General de Aguas. 1: Lago Caburgua en río Blanco, 2: Lago Caburgua Sector Norte, 3: Lago Caburgua Sector Centro, 4: Lago Caburgua en Sector Desagüe. Datum: WGS84-UTM19S.	42
3.22. Variación temporal de los parámetros medidos en la estación de calidad Lago Caburgua en Sector Centro. Fuente: Elaboración propia con datos tomados del <i>Inventario Público de Información Hidrológica y Meteorológica</i> de la Dirección General de Aguas.	43
3.23. Distribución espacial de las estaciones de monitoreo ubicadas dentro del área que abarca las subcuencas de Río Allipén, Lago Villarrica y Toltén Alto, y Río Pucón. 1: Curarrehue, 2: Pucón, 3: Lago Caburgua, 4: Puesco, 5: Villarrica, 6: Los Laureles, 7: Llafenco, 8: Río Trancura en Curarrehue, 9: Río Liucura en Liucura, 10: Río Toltén en Villarrica, 11: Río Allipén en Los Laureles, 12: Vivero Forestal Magasa en Cunco, 13: Villarrica. Datum: WGS84-UTM19S	44
3.24. Variación temporal de los niveles piezométricos medidos en los pozos de observación: a) Vivero Forestal Magasa en Cunco, b) Villarrica. Fuente: Elaboración propia con datos tomados <i>Inventario Público de Información Hidrológica y Meteorológica</i> de la Dirección General de Aguas (https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes). Datum WGS84-UTM19S.	45
3.25. Distribución espacial de los derechos de agua consuntivos según naturaleza (subterráneo y superficial) para el área que abarca las subcuencas de Río Allipén, Lago Villarrica y Toltén Alto, y Río Pucón. Fuente: Elaboración propia utilizando los datos obtenidos de la plataforma web de la Dirección General de Aguas (DGA). Datum: WGS84-UTM19S.	46
3.26. Evolución temporal y espacial del otorgamiento de Derechos de Aprovechamiento de Agua tipo consuntivos (circulo celeste). Fuente: Elaboración propia utilizando los datos obtenidos de la plataforma web de la Dirección General de Aguas (DGA). Datum: WGS84-UTM19S.	47
3.27. Variación temporal del otorgamiento de derechos consuntivos de agua en m ³ /s para el área que abarca las subcuencas de río Allipén, Lago Villarrica y Toltén Alto, y Río Pucón. Fuente: Elaboración propia utilizando los datos obtenidos de la plataforma web de la Dirección General de Aguas (DGA).	48

3.28. Distribución espacial de los derechos de agua consuntivos en m ³ /s para el área del Lago Caburgua según naturaleza: Subterráneo en azul y superficial en blanco. Fuente: Elaboración propia utilizando los datos obtenidos de la plataforma web de la Dirección General de Aguas (DGA). Datum: WGS84-UTM19S.	49
3.29. Variación temporal del otorgamiento de derechos consuntivos de agua en m ³ /s para el área del Lago Caburgua. Fuente: Elaboración propia utilizando los datos obtenidos de la plataforma web de la Dirección General de Aguas (DGA).	50
4.1. Variación temporal de la cobertura nivel sobre la cuenca del lago Caburgua. Fuente: Elaboración propia utilizando imágenes Landsat 8. Datum: WGS84-UTM19S.	52
4.2. Cobertura nivel sobre la cuenca del lago Caburgua. Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos del procesamiento de imágenes LandSat.	53
4.3. Variación temporal del nivel del lago Caburgua y del área de nieve en la cuenca. Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos del procesamiento de imágenes LandSat y de niveles suministrados por la Dirección General de Aguas.	53
4.4. Imágenes Landsat (infrarrojo) mostrando la variación anual de la superficie de los lagos. Fuente: Elaboración propia.	54
4.5. Variación temporal de la superficie de los lagos presentes en el área de estudio.	55
4.6. Resumen de la evolución temporal de los derechos de aprovechamientos de agua consuntivos acumulados para el área del Lago Caburgua en comparación con las variables hidroclimáticas. Fuente: Elaboración propia.	56
5.1. Modelo esquemático que explica la interacción hidrogeológica entre los 3 lagos de la zona: Lago Caburgua (C), Lago Colico (Co) y Lago Villarica (V). Además, se muestra la variación en el tiempo del área (km ³) de cada lago. Zc, Zco y Zv simbolizan el eje en profundidad de los lagos Caburgua, Colico y Villarica, respectivamente.	58
5.2. Modelo hidrogeológico conceptual del Lago Caburgua. Se muestran los principales componentes que interactúan en el sistema: <i>Gi</i> , flujo de agua subterránea entrante; <i>Ri</i> , flujo de agua superficial entrante; <i>P</i> , precipitaciones (lluvia y nieve); <i>E</i> , evapotranspiración; <i>W</i> , extracciones (subterráneas y superficiales); <i>Go</i> , flujo de agua subterránea saliente; <i>Ro</i> , flujo de agua superficial saliente. Fuente: Elaboración propia.	60
6.1. Esquema conceptual de la ley de Darcy. Fuente elaboración propia.	62
6.2. Nivel del lago Caburgua y niveles modelados a través del balance hídrico. Fuente: Elaboración propia.	64
7.1. Ubicación de sismos analizados. Los sismos con etiqueta negra corresponden a aquellos presentados en el catálogo del USGS (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/), mientras que aquellos con etiqueta azul son los presentados por Sielfeld et al. (2019). El área delimitada en rojo corresponde a la unión de las subcuencas hidrográficas Río Allipén, Lago Villarica y Toltén Alto, y Río Pucón. Datum: WGS84-UTM19S. Fuente: Elaboración propia.	67
8.1. Localización de las estaciones fluviométricas propuestas, rombos naranjas y de los perfiles Geofísicos propuestos, líneas negras.	70
A.1. Velocidad del viento sobre el Lago Caburgua. Fuente: Elaboración propia con datos del Explorador Eólico.	79

A.2. Radiación solar neta en el Lago Caburgua. Fuente: Elaboración propia con datos del Explorador Solar.	80
A.3. Evaporación desde el Lago Caburgua. Fuente: Elaboración propia con base en la metodología planteada en el Anexo A.	81
C.1. Variación temporal de los parámetros medidos en la estación de calidad Lago Caburgua en Río Blanco. Fuente: Elaboración propia con datos tomados del <i>Inventario Público de Información Hidrológica y Meteorológica</i> de la Dirección General de Aguas.	85
C.2. Variación temporal de los parámetros medidos en la estación de calidad Lago Caburgua en Sector Norte. Fuente: Elaboración propia con datos tomados del <i>Inventario Público de Información Hidrológica y Meteorológica</i> de la Dirección General de Aguas.	86
C.3. Variación temporal de los parámetros medidos en la estación de calidad Lago Caburgua en Sector Desagüe. Fuente: Elaboración propia con datos tomados del <i>Inventario Público de Información Hidrológica y Meteorológica</i> de la Dirección General de Aguas.	87

Índice de tablas

2.1. Resumen revisión de antecedentes desde 1987 hasta 2004.	2
2.2. Resumen revisión de antecedentes desde 2010 hasta 2016.	3
2.3. Resumen revisión de antecedentes desde 2017-2021.	4
2.4. Resumen río Trafampulli - Antecedentes cartográficos y Antecedentes DGA 2016a.	6
2.5. Resumen río Trafampulli - Antecedentes DGA 2016b.	7
2.6. Resumen río Trafampulli - Antecedentes 2008 -2021a.	8
2.7. Resumen río Trafampulli - Antecedentes 2021b-2022.	9
3.1. Información de las estaciones de precipitación con influencia en la cuenca del Lago Caburgua. Fuente: Elaboración propia.	15
3.2. Precipitación media anual para estaciones DGA y CR2Met. Fuente: Elaboración propia.	17
3.3. Información de las estaciones de caudal consideradas en el estudio. Fuente: Elaboración propia con datos de caudales del BNA.	20
3.4. Resumen de los caudales aforados en el cauce del río Trafampulli en Rinconada, en la coordenada: Norte: 5669.263 m, Este: 252.113 m. Fuente: Elaboración propia con datos de la Dirección General de Aguas.	23
3.5. Parámetros para la estimación de los caudales máximos en el río Trafampulli, para las metodologías Regional, Verni y King Modificado y Racional modificado. Fuente elaboración propia con datos de precipitaciones máximas de la DGA y el procesamiento del modelo digital del terreno Alos Palsar.	24
3.6. Caudales máximos instantáneos del río Trafampulli para el período de retorno $Tr=5$ años, en m^3/s . Fuente elaboración propia con resultados obtenidos de la estimación de caudales máximos instantáneos.	24
3.7. Información de las estaciones de nivel de agua consideradas en el estudio. Fuente elaboración propia con datos de suministrados por la Dirección General de Aguas.	25
3.8. Área de la cuenca del Lago Caburgua según diferentes investigaciones y metodologías. con datos de los informe MOP (1998), UACH (2021) y el modelo digital de elevación Alos Palsar.	31
3.9. Información de aérofotografías SAF del ancho superficial del río Trafampulli hacia el Lago Caburgua, B_{dr} , y del ancho superficial aguas abajo de la defensa ribereña, B_{Td} y la precipitación acumulada en mm, 5 días previos al vuelo, $Pp5$. Fuente: elaboración propia con datos de aerofotografías SAF.	32
3.10. Análisis estadístico de los parámetros medidos de calidad de agua. Fuente: Elaboración propia con con datos tomados de <i>Inventario Público de Información Hidrológica y Meteorológica</i> de la Dirección General de Aguas (https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes).	35
3.11. Estimación de los caudales medios sobre los ríos Blanco y Trafampulli, y caudales de Derechos de Aprovechamiento de Aguas otorgados en ambos ríos y su respectivo porcentaje. Fuente: Elaboración propia.	39

4.1. Áreas de espejos de agua para los lagos Caburgua, Colico y Villarrica calculadas a partir del procesamiento de imágenes satelitales. Fuente: Elaboración propia utilizando imágenes Landsat 8. Datum: WGS84-UTM19S.	55
6.1. Volúmenes promedio del balance hídrico (Hm ³ /año).	64

1. Introducción

El presente informe se llevó a cabo en el marco de una asesoría prestada por la Universidad de Chile a la Dirección General de Aguas (DGA). El objetivo de este estudio es analizar y discutir las hipótesis relacionadas al descenso del Lago Caburgua, descenso que se ha observado desde aproximadamente el año 2008, y que ha sido más visible para la opinión pública en el último par de años. Con dicha finalidad se analiza la información disponible de meteorología, hidrología superficial y subterránea, y de extracciones, así como también los antecedentes respectivos a la construcción de infraestructuras en el área. Además, se genera nueva información a partir del procesamiento de imágenes satelitales. Finalmente, la información recopilada y desarrollada se integra en un modelo conceptual que es utilizado como base para la realización del balance hídrico del Lago Caburgua.

Los objetivos específicos del análisis incluyen:

- Efectuar una completa recopilación de antecedentes.
- Realizar un análisis crítico de la información hidrometeorológica disponible.
- Realizar un análisis crítico de la información geológica e hidrogeológica disponible.
- Realizar un análisis crítico de la información de extracciones de agua (derechos de aprovechamiento de aguas).
- Realizar un análisis multitemporal de cobertura nival y de los espejos de agua.
- Definir un modelo conceptual del funcionamiento hidrológico e hidrogeológico del lago Caburgua.
- Analizar el balance hídrico del lago Caburgua y su evolución en el tiempo.
- Revisar, sistematizar y evaluar las hipótesis existentes relativas al descenso del lago Caburgua.
- Definir y proponer acciones futuras que permitan disminuir la incertidumbre respecto a las variaciones de nivel del lago.

Vale señalar que dado los plazos indicados por la DGA para la entrega de este reporte (8 semanas), este trabajo no incluye visitas a terreno ni levantamiento de nueva información hidrometeorológica in situ, tales como aforos, mediciones de niveles piezométricos, u otras mediciones similares. Por último, todas las figuras con objetos espaciales fueron realizadas en el software QGIS considerando el datum WGS84-UTM19S.

2. Revisión de antecedentes

2.1. Características generales

En esta sección se realiza una revisión de los trabajos realizados previamente en el área de estudio. Se revisaron informes disponibles por parte de la Dirección General de Aguas y otros organismos, además de expedientes de dominio público y publicaciones técnicas y científicas. A continuación se resumen los principales resultados en las Tablas 2.1- 2.3.

Tabla 2.1: Resumen revisión de antecedentes desde 1987 hasta 2004.

Referencia - Expediente	Título informe	Resultados Relevantes
DGA (1987)	Balance hídrico de Chile 1987	Reporta una precipitación media de 3768 mm/año para la estación Caburgua (Tabla II del informe del Balance hídrico Nacional), mientras que en el mapa de isoyetas de Valdivia la precipitación media en el lago Caburgua es de 5500 mm/año. Es importante resaltar que la distancia entre la estación Caburgua y el centro del lago es menor a 10 km. Tan drástico cambio en las precipitaciones a una corta distancia podría considerarse bastante dudoso. La evaporación reportada es de 600 mm/año, mientras que la evaporación en la cuenca del río Toltén en Villarrica es de 515 mm/año según Tabla IX.
Campos (1987)-MOP (1998)	Estudios limnológicos de los lagos Caburgua y Maihue	El lago Caburgua es un lago precordillerano andino, pertenece a la cuenca del río Toltén, tiene un área de drenaje de 325 km ² . Está localizado en la coordenada 39°07,5' S y 71°45,5' W a una elevación de 505 m s.n.m. El lago tiene una forma sub-rectangular, la línea de costa en el sector playa Negra, se reporta de 1,67 km aproximadamente y el área superficial del lago se establece en 51,91 km ² con un volumen estimado de agua de 8,88 km ³ . La precipitación en la cuenca se presenta principalmente en fase líquida y el promedio anual es de 3.367 mm/año, con una distribución temporal marcadamente estacional de las precipitaciones. El período más lluvioso es desde mayo a agosto y el más seco es entre diciembre y abril. Adicionalmente, existen variaciones significativas de la precipitación entre la ribera norte y la ribera sur. En la ribera norte se reportaron precipitaciones anuales hasta de 5.000 mm/año, mientras que en la ribera sur la precipitación es aproximadamente un 45% menos. Por otro lado, la evapotranspiración potencial media reportada es del orden de 954 mm/año, mientras que, la temperatura media anual es de 13,2 °C.
DGA (2004)	Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad	El eje mayor del lago, eje N-S, es de 16 km y tiene un ancho aproximado de 4 km. El espejo de agua se reporta de 57 km ² . Se indica que existen filtraciones naturales del Lago Caburgua en la estación de Calidad Río Trancura en Pucón [0943-PU-20]. También se indicó que los lagos Caburgua, Colico y Villarrica se formaron por la infiltración de los flujos de agua provenientes de glaciares (morrenas).

Tabla 2.2: Resumen revisión de antecedentes desde 2010 hasta 2016.

Referencia - Expediente	Título informe	Resultados Relevantes
Woelfl et al. (2010)	Chlorella-bearing ciliates (Stentor, Ophrydium) dominate in an oligotrophic, deep North Patagonian lake (Lake Caburgua, Chile)	Se reporta que el Lago Caburgua es un lago oligotrófico, monomítico y la profundidad media del lago es 171 m y la profundidad máxima es 327 m y el área del lago tiene un espejo de agua de 51,9 km ² . Sin embargo, los datos de profundidades y el área del lago no fueron medidos sino que fueron tomados de Campos (1984).
Ministerio de Obras Públicas (2014a)	Evaluación de la condición trófica de la red de control de lagos de la DGA	El lago Carburgua presenta estratificación en verano y genera tres estratos en la columna de agua, epilimnion entre 0-10 m, metalimnion entre 10 - 25 m y el hipolimnion que ocurre para profundidades mayores a 25 m. La temperatura promedio del epilimnion es de 20,5 °C en verano. Se consideró una profundidad máxima del lago 325 m, este valor fue considerado del estudio de Campos (1984).
DGA (2016)	Estudio hidrogeológico, región de la Araucanía	El reporte tuvo como objetivo conocer y entender los sistemas hidrogeológicos de la Región de la Araucanía, principalmente aquellos asociados a los ríos Imperial y Toltén como también aquellos ubicados en las cuencas costeras de dicha región. Para cumplir con los objetivos planteados, se realizaron diferentes actividades, las cuales incluyen: recopilación de antecedentes, levantamiento de información, sistematización de demandas y usos, desarrollo de modelo hidrogeológico conceptual, modelación numérica, y análisis integral. La recopilación de antecedentes incluyó cartas geológicas, información de pozos perforados por ENAP, mapas gravimétricos, y reportes técnicos, entre otros. Los resultados principales destacan la realización de un catastro de alrededor de 2700 pozos, mapa de isoyetas, mapa de isolíneas de evaporación, mapa de isotermas, balance hídrico por zona de riego, mapa y perfiles geológicos, mapa gravimétrico, perfiles TEM, caracterización hidrogeoquímica y mapa de diagrama de Stiff, mapa de unidades hidrogeológicas, evaluación de ensayos de bombeo, mapas de transmisividad, y mapas piezométricos. Es importante resaltar que este trabajo fue realizado a escala regional y que, a pesar de la gran cantidad de información levantada y sistematizada, no hay datos levantamiento de datos geológicos, geofísicos, hidráulicos ni hidrogeoquímicos en el área de estudio (Lago Caburgua).

Tabla 2.3: Resumen revisión de antecedentes desde 2017-2021.

Referencia - Expediente	Título informe	Resultados Relevantes
DGA (2017)	Reporte de la red de control de lagos de la dirección general de aguas año 2017	El informe presenta un reporte del estado trófico de los lagos, en su plan de monitoreo 2017. Reporta que el lago Caburgua tiene un área de 51,91 km ² , una longitud de 16,5 km y un volumen aproximado de 8,88 km ³ . El lago tiene 32 afluentes de orden 1, siendo los afluentes principales los ríos Blanco, Coihueco, Renahue y Lumaco, mientras que el único efluente superficial es el río Caburgua y está localizado en el sector sur del lago. En este reporte el lago presentó una condición oligotrófica en verano y primavera en toda la columna de agua.
MMA (2019)	Análisis y Evaluación de Medidas de reducción de Nutrientes (Nitrógeno y Fósforo) para incorporar al plan de descontaminación del Lago Villarrica	Se reportan dos aforos realizados por el Ministerio de Medio Ambiente el 23 de octubre de 2018 en el río Caburgua y el río Carhuello en el sector Puntilla. En dicho estudio los caudales aforados fueron de 29,70 m ³ /s y 6,64 m ³ /s, respectivamente, en el período de deshielo.
Parte N° 15523940 Dirección General de Aguas, del 7 de diciembre de 2021 y UACH (2021)	Nivel de agua Lago Caburgua	La organización Caburgua Sustentable presentó un informe realizado por la Universidad Austral. En dicho informe, se reporta que la cuenca del lago Caburgua tiene un área de 335 km ² y el espejo de agua es de 52 km ² . El principal afluente es el río Blanco, el régimen hidrológico de los afluentes del lago es nival y los caudales máximos se dan en la época de primavera. El estudio reporta que las variables hidroclimáticas presentan tendencia a la baja en los últimos años. Plantean que con la desviación del Trafampulli hacia el Lago Colico, ha dejado de ingresar al Lago Caburgua en promedio un caudal igual 2 m ³ /s. Adicionalmente, en este informe se presentan fotos del 2007 y también imágenes del puente de madera, ruta S-15, que posteriormente fue reemplazado por el Ministerio de Obras Públicas (MOP) por un puente de hormigón, en la misma ruta (nombrada posteriormente como ruta S-75 y actualmente como S-965). En el informe plantean que para el diseño del puente se consideró el caudal aportante por el río Trafampulli hacia el Lago Caburgua.
Ministerio de Obras Públicas (2014b)	Región de la Araucanía Fase 4: Aprobación del estudio definitivo Tomo4: Puentes ingeniería básica, Estudio hidrológico - Puente Caburgua.	El mejoramiento de la ruta S-75 Sector Colico- Caburgua Norte, consideró la construcción de un puente en el sector de puerto Negro. La cuenca asociada al puente se trazó considerando la cartografía del IGM 1:50.000, es decir, no considera aportes permanentes del río Trafampulli (Figura 2.1). El caudal de diseño del puente es de 2,1 m ³ /s para el período de retorno de 5 años y de 4,2 m ³ /s para el período de retorno de 100 años. Es importante resaltar que la Figura 2.1) es la Figura 5.1 del informe <i>Región de la Araucanía Fase 4: Aprobación del estudio definitivo Tomo 4: Puentes ingeniería básica, Estudio hidrológico - Puente Caburgua</i> .



Figura 2.1: Cuenca asociada al puente Caburgua. Fuente: Ministerio de Obras Públicas (2014b)

2.2. Antecedentes relativos al cauce del río Trafampulli

En esta sección se realiza una revisión de los antecedentes relacionados al Río Trafampulli, los cuales incluyen imágenes aéreas, mapas cartográficos, informes técnicos y expedientes tanto de solicitudes de Derechos de Aprovechamiento de Aguas, como de denuncias. Los principales resultados se destacan en las Tabla 2.5 - 2.7.

Tabla 2.4: Resumen río Trafampulli - Antecedentes cartográficos y Antecedentes DGA 2016a.

Referencia - Expediente	Título informe	Resultados Relevantes
Mapa MP0004198 (Código Biblioteca Nacional)	Levantamiento aerofotogramétrico versión 1974	El Instituto Geográfico Militar IGM, presentó en 1974 material cartográfico escala 1:50.000 del Lago Caburgua. En la carta el río Trafampulli drena al Lago Colico y no se indican brazos del río que drenen al lago Caburgua de forma permanente. El mapa fue realizado con fotografías aéreas que fueron tomadas en 1961, la clasificación en terreno fue en 1972 y la edición de la carta es de 1974.
Mapa MP0004199 (código Biblioteca Nacional)	Levantamiento aerofotogramétrico versión 2007	El Instituto Geográfico Militar IGM, presentó en 2007 material cartográfico escala 1:50.000 del Lago Caburgua. En el mapa el río Trafampulli drena al Lago Colico y no hay reportados brazos del río que drenen al lago Caburgua de forma permanente. Sin embargo, el mapa fue realizado con fotografías aéreas que fueron tomadas en 1996 y 1998, la clasificación en terreno fue del año 1972. No se reportaron variaciones de los cuerpos de agua entre la carta de 1974 y 2007, pero sí hubo actualización de las vías.
VV-0902-145 del MOP, informe técnico N°60,	Denuncia de modificación del cauce natural del río Trafampulli	El 30 de diciembre de 2005 se realizó una denuncia sobre modificación del cauce en el sector Puerto Negro Llanqui Llanqui en el fundo Llanqui-Llanqui. En la visita de terreno realizada el 21 de febrero de 2006, se reporta que 60 % del caudal del río Trafampulli era desviado hacia el lago Caburgua. El informe técnico N°60, reporta que en la coordenada Norte 5672.523, Este 261.383 referidas al Datum provisorio Sudamericano de 1956, Huso 19, el cauce del río Trafampulli tiene una curva y una bifurcación del cauce principal. Se reportó que el sedimento depositado en la parte interna de la curva habría sido modificado antrópicamente. Esta modificación habría hecho migrar el cauce del río Trafampulli hacia la margen externa de la curva. Además la cota de fondo en la margen externa de la curva (margen izquierda) era menor a la cota de la margen interna de la curva. Por estas razones, el río Trafampulli drena un 60 % hacia el lago Caburgua y 40 % al lago Colico. En el informe se indica que las modificaciones antrópicas encontradas durante la visita de terreno de 2006 no eran recientes, sino que habrían sido realizadas aproximadamente dos años antes (año 2003-2004). También se encontraron obras de captación para abastecer el Camping Llanqui-Llanqui y generación eléctrica por medio de una turbina. Se indica que hubo intervención antrópica en el río Trafampulli, sin embargo, las obras de captación para abastecimiento humano y generación de energía serían de antigua data y el caudal de captación no está definido en el expediente. Finalmente, en la zona de desvío del río Trafampulli no existían permisos para la extracción de áridos, ni otorgamientos de derechos de aprovechamiento de agua.
DGA región de la Araucanía IX N°85, con fecha 22 de febrero de 2006	Ordena restitución del cauce natural del río Trafampulli, comuna de Cunco, provincia de Cautín, IX Región	Considerando que modificaciones en el cauce impiden el libre y normal escurrimiento de las aguas, afectando las características originales. La modificación del cauce no cuenta con la autorización según el Art. 171 del código de Aguas, lo que hace que el desvío sea ilegal y de responsabilidad exclusiva del infractor, entre otras consideraciones. La DGA regional resuelve que el paso desde el río Trafampulli hacia el lago Caburgua debe ser cerrado, es decir, el cauce del río Trafampulli debe ser restituido.

Tabla 2.5: Resumen río Trafampulli - Antecedentes DGA 2016b.

Referencia - Expediente	Título informe	Resultados Relevantes
DGA N° 1718	Rechaza recurso de reconsideración interpuesto por el señor Marcelo Benito Taladriz y oposición del señor Gastón Holzapfel Gross, en contra de la resolución IX N° 85 del 22 de febrero de 2006.	<p>Considerando el estudio técnico realizado por Gesche Ingenieros en noviembre de 2005 y las observaciones del informe técnico N°60 del 21 de febrero de 2006. Además el Sr. Marcelo Benito presentó un recurso de reconsideración contra la resolución DGA IX N° argumentando: i) Contradicciones en el informe técnico sobre las obras de captación y el tiempo de construcción de dichas obras. ii) Que no existen obras que impidan el libre escurrimiento de las agua, además que es erróneo decir que no existían derechos de aprovechamiento inscritos y que no hubo un análisis completo de la dinámica del río. iii) Señala que a nombre del Sr. Hernán Montenegro Pereira existía una concesión 1,5 m³/s la cual fue otorgada por la resolución DGA N° 612 del 17 de diciembre de 1994, el caudal era captado de forma gravitacional desde la margen izquierda del río a 2 km aguas arriba del cruce con el camino Trafampulli-Puerto Negro, Ruta S-15 y que estos antecedentes de la DGA fueron fueron omitidos. iv) Durante la construcción de un camino, en el sector El Bolsón del lugar Llanqui-Llanqui de la comuna de Cunco, se realizaron trabajos en el cauce del río Trafampulli y la Sociedad Nevados del Caburgua S.A. fue la encargada de realizar las obras viales, para la ejecución de estas obras requirió de maquinaria pesada. v) Indica que la maquinaria en su predio era de la empresa OGCI quien fue la encargada de construir el puente Caburgua, él le otorgó una serie de facilidades en su predio para la instalación de las faenas en los sectores aledaños a la obra que ejecutaban. OGCI le ofreció ejecutar tareas en su predio, tapar hoyos, pero no la limpieza de materiales en el cauce del río. Planteó que el funcionario de la DGA se equivocó en las fechas y las labores efectuadas. Indica que el tanto el estero (o bocatoma) como la turbina tienen más de 40 años y provienen de antiguos propietarios. También indica que la cascada de agua tendría la misma antigüedad. Finalmente, se encontraron contradicciones entre lo interpuesto por el Sr. Benito y el Sr. Holzapfel respecto lo presentado en los informes técnicos de Gesche y del Sr. Luis Hernán Rubilar. Estos últimos indican que existen intervenciones antrópicas en el río Trafampulli. Por otra parte, en este mismo expediente se rechaza el recurso de reconsideración en base a varios argumentos entre los cuales se encuentra: contradicción entre lo planteado por el Sr. Benito con expuesto por otros testimonios y el siguiente texto: <i>En la cartografía oficial del IGM, plancheta Lago Caburgua, escala 1:50.000, se observa que no existe ningún cauce que comunique el río Trafampulli con el Lago Colico, sólo se aprecia en dicha carta la existencia de vegas en dirección Norte-Sur hacia el Lago Caburgua, que con el paso de los años, la acción propia del río y la intervención de la mano del hombre pudieron originar el actual canal de drenaje, que no debe confundirse con el cauce de desvío proveniente del río. El levantamiento aerofotogramétrico corresponde al año 1961.</i></p>

Tabla 2.6: Resumen río Trafampulli - Antecedentes 2008 -2021a.

Referencia - Expediente	Título informe	Resultados Relevantes
DGA Región de la Araucanía IX N° 347, con fecha del 12 de marzo de 2008	Aprueba proyecto de modificación de cauce natural denominado "Modificación de Cauce río Trafampulli - Sector LlanquiLlanqui", comuna de Cunco, provincia de Cautín, región de La Araucanía.	La DGA regional aprueba el proyecto "Modificación de Cauce río Trafampulli – Sector LlanquiLlanqui". La obra aprobada es un pretil de 15 m de longitud localizado en la margen izquierda del río Trafampulli. La obra que de aquí en adelante denominaremos como <i>defensa ribereña</i> fue diseñada para un período de retorno de 5 años y el caudal de diseño es de 67,67 m ³ /s. La altura de la obra es de 1,16 m y la cota de coronamiento es 141,58 m s.n.m. la defensa ribereña está localizado en la Coordenada UTM: 261.375 Este y 5672.535 Norte referidas al Datum provisorio Sudamericano 1956 huso 19.
DGA Región de la Araucanía IX N°493, con fecha 26 junio de 2009	Recepción de la obra ubicada en el río Trafampulli realizada por Marcelo Benito Taladriz, comuna de Cunco, provincia de Cautín, región de La Araucanía	Se recepcionó por parte de la DGA región de la Araucanía la obra aprobada en el expediente DGA IX N°347.
Memo DARH N°358, con fecha 07 de septiembre de 2021	DARH N°358	Los habitantes ribereños del lago Caburgua manifiestan preocupación por la disminución del nivel del lago e indican que la obra recepcionada en el expediente DGA IX N°493, estaría afectando negativamente el nivel del lago Caburgua, dado que el río Trafampulli actualmente está drenando íntegramente hacia el Lago Colico. En esta misma línea, ORD DGA N°366, con fecha de 23 de agosto de 2021, Caburga sustentable envió carta donde expresan su preocupación por la disminución de nivel del Lago Caburgua. En dicha carta se plantea que para la aprobación de la defensa ribereña, aprobado en el expediente DGA IX N°493, no se realizaron estudios ambientales para evaluar los efectos que tendría la desviación del cauce del río Trafampulli hacia el Lago Colico. Plantean que el río Trafampulli drenaba hacia el Lago Caburgua, anexan fotografías aéreas donde se observa que parte del río Trafampulli drenaba hacia el lago Caburgua.

Tabla 2.7: Resumen río Trafampulli - Antecedentes 2021b-2022.

Referencia - Expediente	Título informe	Resultados Relevantes
Minuta visita técnica	Minuta visita técnica río Trafampulli	<p>El 30 de septiembre de 2021, se realizó una visita técnica por parte de la DGA Regional a la zona de defensa ribereña sobre el cauce del río Trafampulli. En la minuta se reporta que:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Existen vestigios de la defensa ribereña fusible proyectado, sin embargo se observó que la defensa ribereña no se encuentra en el cauce activo del río Trafampulli por lo que éste último sigue su cauce natural hacia el lago Colico. ■ Existe evidencia de que han pasado crecidas sobre la defensa ribereña fusible, por lo que se presume que crecidas con períodos de retorno de 2-5 años pasan sobre ésta, crecidas que desembocan en las vegas del sector y que, eventualmente llegarían al Lago Caburgua naturalmente, tal como fue proyectado en su oportunidad. ■ La defensa ribereña está ubicado en zonas de vegas e inmediatamente aguas abajo de la defensa ribereña el río tiene la superficie adecuada para abordar crecidas. ■ Al momento de la visita todo el caudal del río Trafampulli seguía al lago Colico, no existiendo otros desagües al Lago Caburgua en esta oportunidad.
DGA (2022)	Minuta N° 1: Visita a terreno río Trafampulli	<p>El 22 de diciembre de 2021, se realizó una visita técnica al río Trafampulli, sector de Puerto Negro. En la visita se aforó un caudal de 0,64 l/s en el río Trafampulli en zonas aledañas a la defensa ribereña. Reportaron afloramientos de agua en el sector de vegas, entre el río Trafampulli y el Lago Caburgua, e indican que la defensa ribereña no estaría afectando la interacción subsuperficial entre el río Trafampulli y el Lago Caburgua. También se reportó que la defensa ribereña no interviene el flujo libre del río Trafampulli y se plantea que eventuales crecidas el río podrían llegar a drenar flujo hacia el lago Caburgua. También se presentó un análisis de las precipitaciones máximas en 24h, mostrando una disminución en el tiempo.</p>

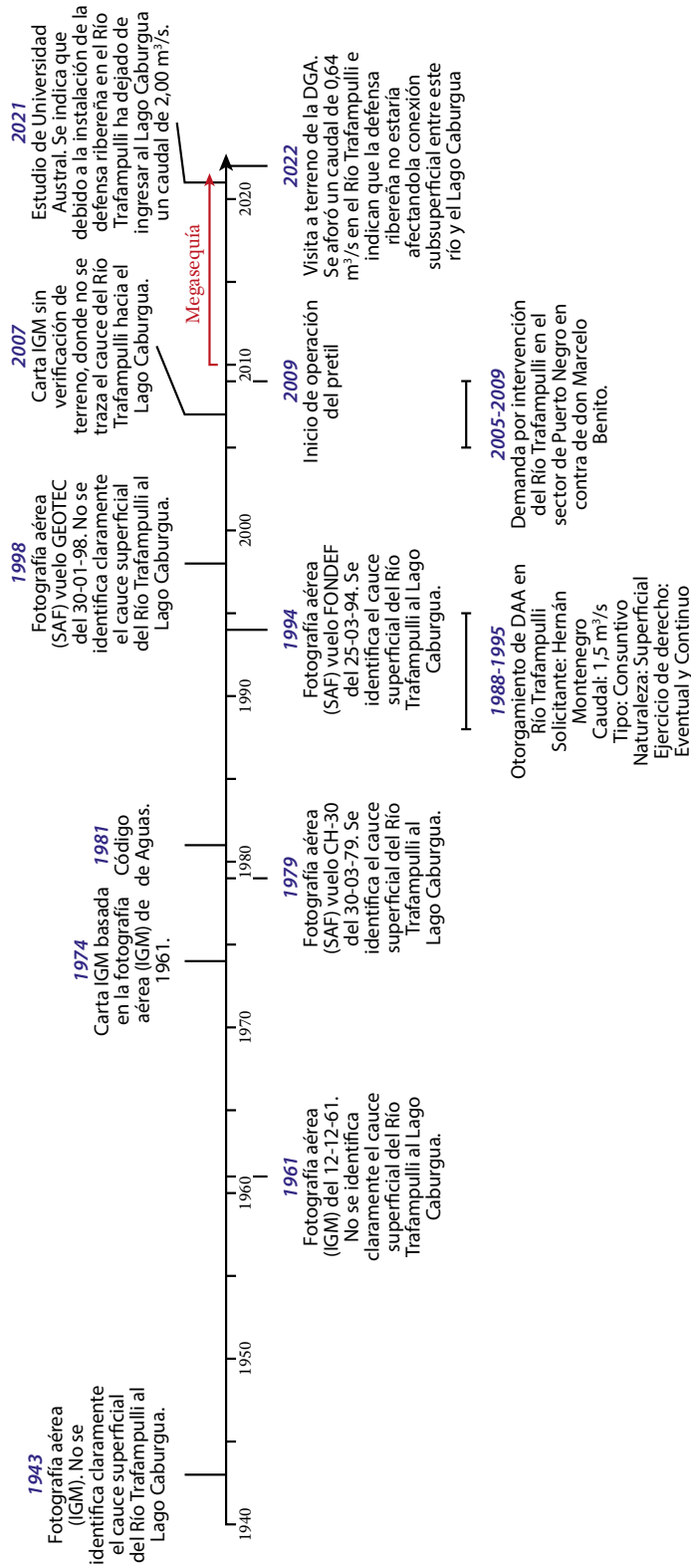


Figura 2.2: Línea de tiempo y resumen de antecedentes relevantes sobre el lago Caburuga. Fuente: Elaboración propia.

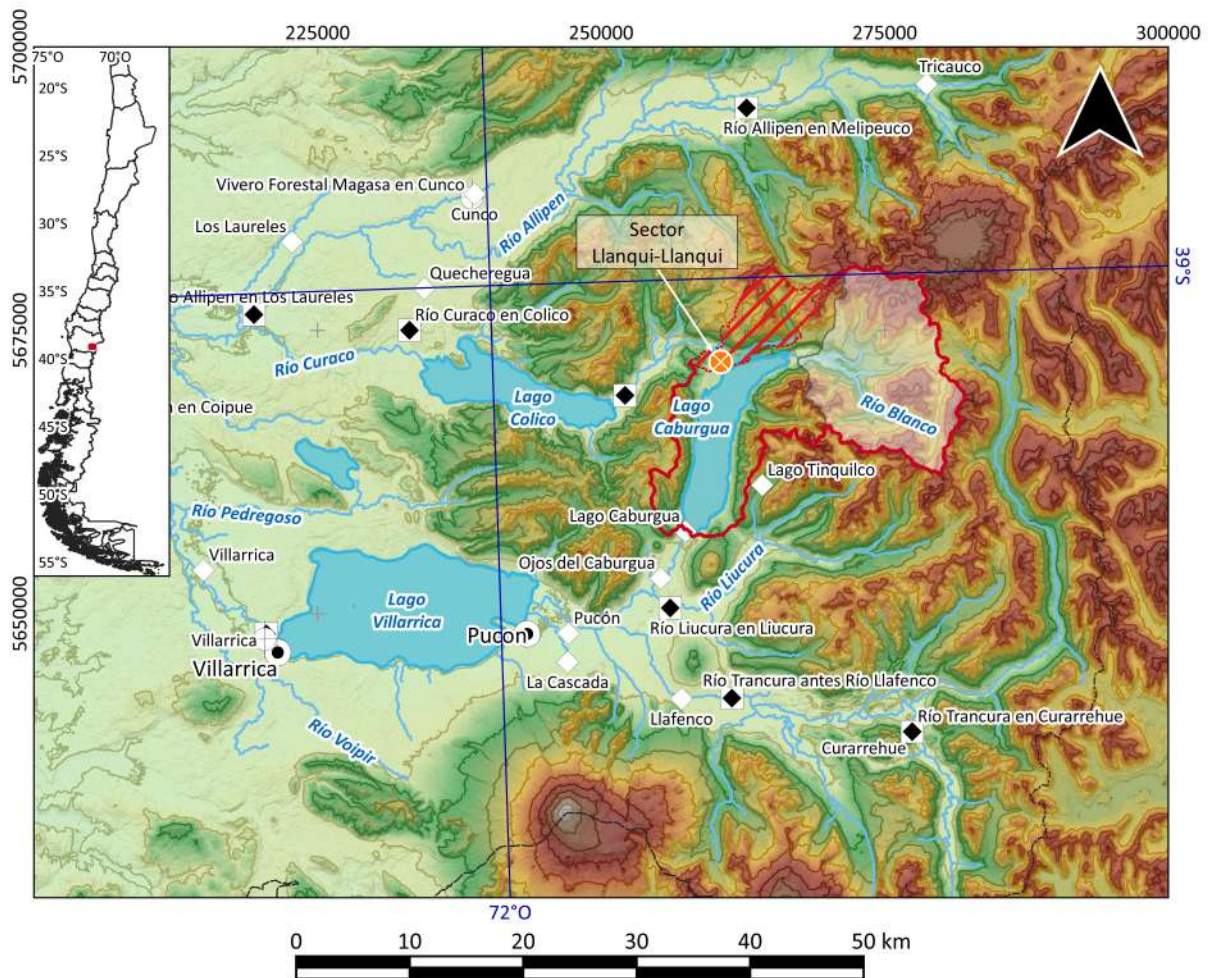
3. Caracterización de la zona de estudio e información disponible

3.1. Información hidroclimática

En esta sección se presenta la información de precipitación, temperatura y caudales considerados en este estudio. En el anexo E se presenta el comportamiento de la precipitación y temperatura en zonas aledañas al lago Caburgua y entre las latitudes 40°S y 38°S. La información hidroclimática considerada en este estudio incluye:

- Datos de precipitación de la red de monitoreo de la Dirección General de Aguas (DGA).
- Datos de caudal reportados por el Banco Nacional de Aguas (BNA).
- Datos de nivel de los lagos Caburgua y Villarrica de la red de monitoreo de la Dirección General de Aguas (DGA).
- Series de precipitación y temperatura del producto satelital CR2Met del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, <https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>. Para la precipitación se consideró el producto *grillado CR2MET-v2.0-pr-day-1979-2020* y para la temperatura el producto *CR2MET-v2.0-t2m-day-1979-2020*.
- Series de radiación solar del Explorador Solar del Ministerio de Energía.
<https://solar.minenergia.cl/exploracion>
- Series de viento del Explorador Eólico del Ministerio de Energía.
<http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/>

La Figura 3.1 muestra la localización de las estaciones meteorológicas y fluviométricas operadas por la DGA y que fueron consideradas en este estudio. Además se presentan las cuencas de los ríos Trafampulli y Blanco, y del lago Caburgua, trazada a partir del modelo digital de elevación Alos Palsar. A pesar de que el resultado del procesamiento incluye la cuenca del río Trafampulli dentro de la cuenca del Lago Caburgua, la cuenca se delinea de forma segmentada en ese sector dado que la naturaleza y magnitud de esta conexión se mantiene aún indeterminada. Por otro lado, es importante resaltar que, usando el modelo digital de elevación Alos Palsar, el punto de cierre de la cuenca del río Trafampulli es en el sector de la defensa ribereña.



Simbología

● Capital comunal	■ Lago	<u>Cuencas</u>	<u>Modelo de elevación digital</u>
□ Límite regional	<u>Estaciones de monitoreo</u>	■ Lago Caburgua	Altitud (m s.n.m.)
<u>Drenajes</u>	◇ Meteorológica	□ Río Blanco	■ 3,000
— Permanente	◆ Fluiométrica	▨ Río Trafampulli	■ 0
- - Intermitente	⊕ Pozo		

Figura 3.1: Localización de las estaciones meteorológicas y fluiométricas en el sector del Lago Caburgua. Fuente: Elaboración propia. Datum WGS84-UTM19S.

3.1.1. Precipitación

Mediante la metodología de polígonos de Thiessen se determinó que las estaciones de precipitación con influencia en la cuenca del lago Caburgua son: i) Lago Caburgua [09417001], ii) Lago Tinquilco [09416002], iii) Tricauco [09401001] (Figura 3.2). La Tabla 3.1 presenta las coordenadas y cota de las estaciones, el área de influencia de cada estación sobre la cuenca, A_{af} , porcentaje área de influencia, $\%A_{af} = A_{af}/A_c$ donde A_c es el área de la cuenca del lago Caburgua sin considerar el aporte del río Trafampulli, dado que al momento del informe este río no aportaba a la cuenca del Lago Caburgua. Longitud de registros anuales (número de años) y la precipitación media anual, PMA.

Para el análisis de la precipitación media anual se consideró el año 2006 como año de referencia para mostrar los datos, con el fin de analizar el período en el cual se realizó la primera denuncia del desvío del río Trafampulli. La Tabla 3.1 presenta la precipitación media anual para antes del 2006 y después del 2006. Las estaciones Lago Caburgua y Tricauco tienen una longitud de registro mayor a 30 años, es decir, son estadísticamente representativas. Por otro lado, la estación Lago Tinquilco tiene una longitud de registro menor a 30 años, pero su área de influencia en la cuenca del lago Caburgua es superior al 50%, es decir, la estación es representativa de la climatología del área de estudio y además tiene una longitud de registros mayor a 20 años. Por estas razones se decidió mantener la estación Tinquilco para la estimación de la precipitación media anual sobre la cuenca del Lago Caburgua.

Adicionalmente, la Figura 3.3 presenta las series de precipitación anual y precipitación mensual filtrada con una media móvil de cinco meses para las estaciones mencionadas. Se aplicó el test de Mann-Kendall a las tres series de precipitación con influencia en la cuenca del Lago Caburgua, obteniéndose una tendencia decreciente en la precipitación anual, las pendientes de las tendencias fueron -0,018, -0,023, -0,026 para la Estación Lago Caburgua, Lago Tinquilco y Tricauco, respectivamente.

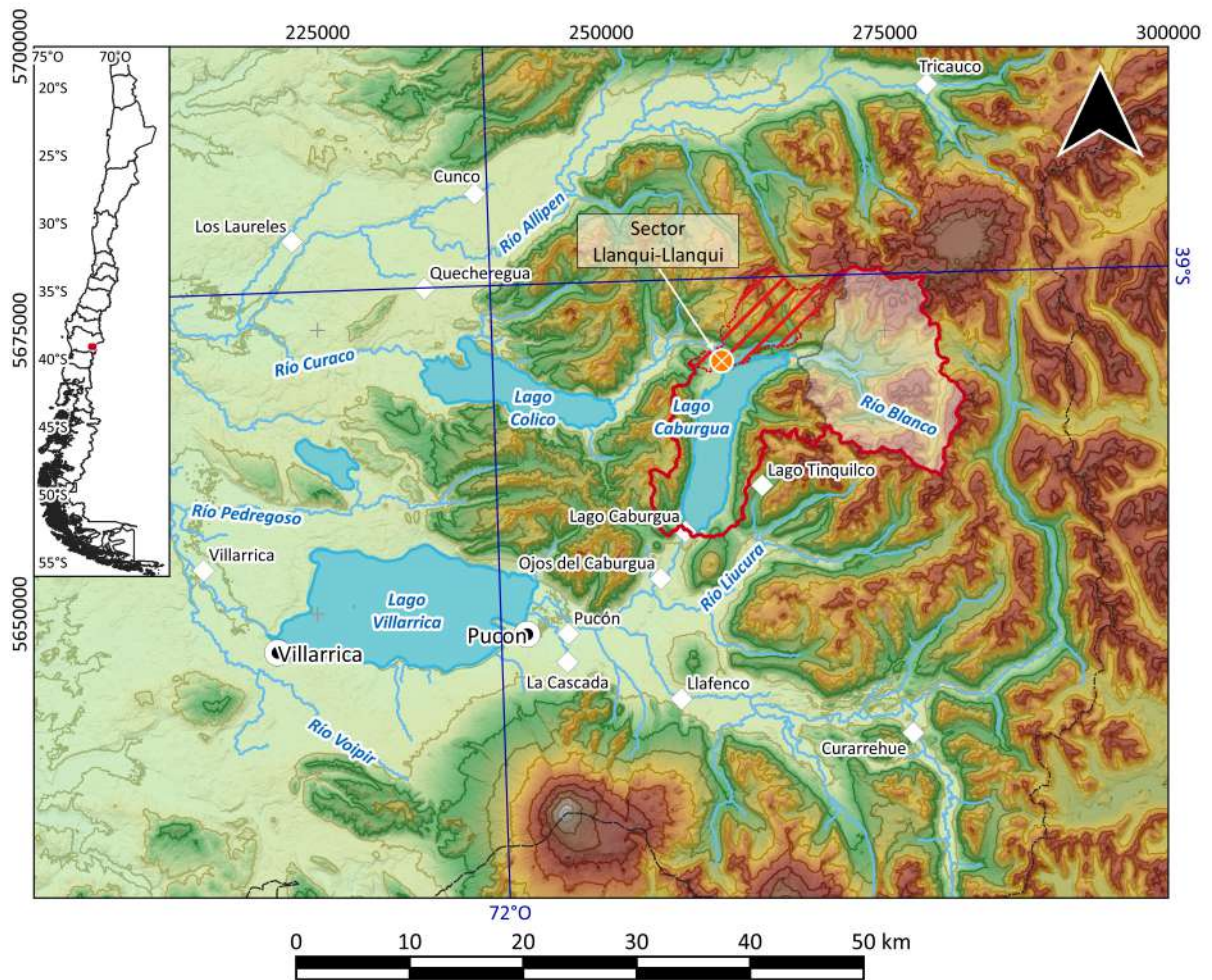


Figura 3.2: Polígonos de Thiessen para las estaciones de precipitación. Fuente: Elaboración propia utilizando datos de la Dirección General de Aguas. Datum WGS84-UTM19S.

Tabla 3.1: Información de las estaciones de precipitación con influencia en la cuenca del Lago Caburgua. Fuente: Elaboración propia.

Estación	Coordenada	Cota m s.n.m	A_{af}	$\%A_{af}$	Años de registros	Período	PMA
Lago Caburgua [09417007 – 9]	Norte: 5658.705 Este: 260.612	480	39,64	12,16	36	1976-2006 2007-2021	2.950,0 2076,36
Lago Tinquilco [09416002 – 2]	Norte: 5660.514 Este: 263.997	850	269,38	82,65	24	1996-2006 2007-2020	3.156,64 2.476,1
Tricauco [09401001 – 2]	Norte: 5697.440 Este: 278.578	520	16,92	5,19	32	1988-2006 2007-2020	2.128,3 1.963,54

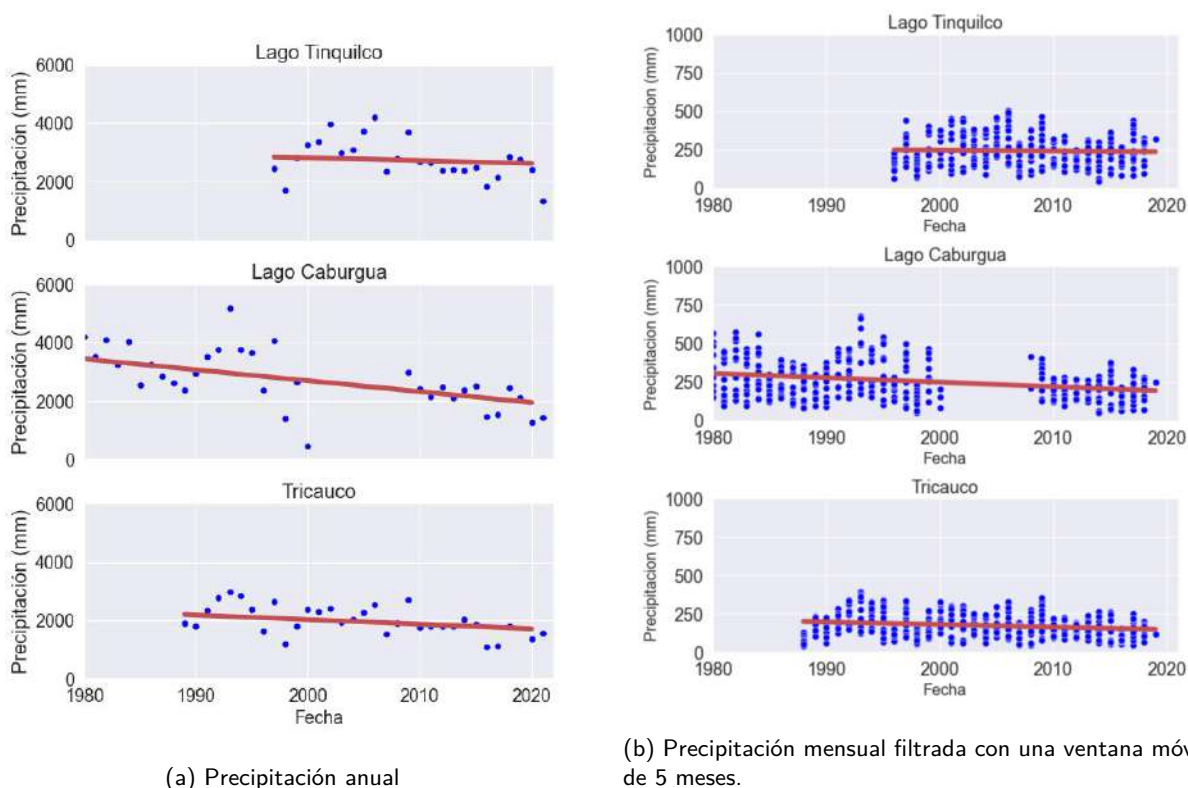


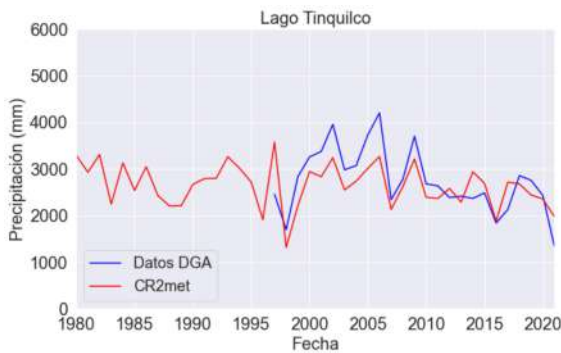
Figura 3.3: Series anuales de precipitación de las estaciones con influencia en la cuenca del Lago Caburgua. Fuente: Elaboración propia con datos de precipitación de la DGA.

Análisis de precipitaciones medias

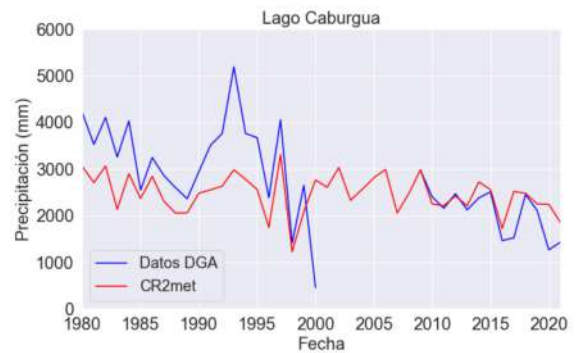
La precipitación media sobre la cuenca del lago Caburgua se estimó por medio de una ponderación entre la precipitación media anual de cada estación y el área de influencia sobre la cuenca (Tabla 3.1). Este análisis se realizó para dos períodos de tiempo, antes y después del 2006, con lo que se obtiene que la precipitación media anual antes del 2006 es de 3.078,1 mm, mientras que la precipitación media anual desde 2006 hasta 2021 es de 1.963,54 mm, es decir, una disminución del 22,0%. Por otra parte, la precipitación media anual en la cuenca del Lago Caburgua reportada en el Balance hídrico de Chile (1987) es de 3.368 mm, es decir, existe una disminución del 28,7% de la precipitación media anual en el período 2006-2021.

Por otra parte, las series de precipitación del producto grillado de precipitación del CR2Met para el período

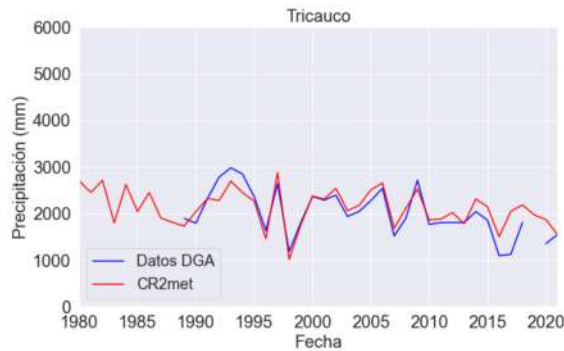
1979-2020, se analizaron simultáneamente con los datos de precipitación de las estaciones Lago Tinquilco, Lago Caburgua y Tricauco. La Figura 3.4 muestra la comparación de los datos de precipitación medidos por las estaciones DGA y las series modeladas por CR2Met en el punto de cada estación. Se observa que los datos modelados por el CR2Met representan de buena forma los datos medidos por las estaciones que fueron consideradas en este estudio. La Tabla 3.1 presenta una comparación entre las series de precipitación media anual de los datos registrados por la DGA y las series modeladas por el producto grillado CR2Met, para el período previo al 2006 y posterior al 2006. Bajo ambos escenarios se aprecia una tendencia decreciente de la precipitación en el tiempo. Sin embargo, las series de precipitación de las estaciones meteorológicas presentan datos faltantes y además el período de registro no es el mismo. Por esta razón, en las secciones siguientes se utilizan las series de CR2Met para efectos de analizar el balance hídrico.



(a) Precipitación anual Lago Tinquilco.



(b) Precipitación anual Lago Caburgua.



(c) Precipitación anual Tricauco.

Figura 3.4: Comparación de las series de precipitación medidas por DGA (en azul) y las series de precipitación modeladas por el CR2Met (en rojo) en el punto de la estación DGA. Fuente: Elaboración propia con datos de precipitación del CR2Met y de la DGA.

Tabla 3.2: Precipitación media anual para estaciones DGA y CR2Met. Fuente: Elaboración propia.

Estación	Período	Precipitación media anual [mm]	
		Estaciones DGA	CR2Met
Lago Caburgua [09417001]	1979-2006	3.142,1	2.557,1
	2007-2021	2.062,3	2.329,1
Lago Tinquilco [09416002]	1996-2006	2.965,7	2.690,7
	2007-2021	2.380,4	2.484,5
Tricauco [09401001]	1988-2006	2.129,3	2.175,8
	2007-2021	1.643,9	1.963,5

3.1.2. Temperatura

A partir de los polígonos de Thiessen se determinó que la estación Pucón, cota 230 m s.n.m., operada por la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), es la que tiene influencia en la cuenca del lago Caburgua (Figura 3.5), reportando una temperatura media anual de 12,5 °C para el período 1989-1993 y de 12,0 °C para el período 2014-2019. Sin embargo, la estación sólo tiene 9 años de registros, es decir, no es estadísticamente representativa. Por esta razón, con el objetivo de evaluar tendencias a nivel regional se consideraron estaciones alejadas a la zona de estudio, como lo son las estaciones Maquehue-Temuco Ad. [380013], Pichoy Valdivia Ad. [390006] y Neuquén Aero [AR000087715]. En estas estaciones se identifica una tendencia creciente en la temperatura media anual para el sector de los lagos Caburgua, Colico y Villarrica, tal como se aprecia en la Figura 3.6. Sin embargo, esta tendencia no es significativa, la pendiente de la tendencia es de $\sim 1e-6$), para las estaciones Maquehue-Temuco, Pinchoy Valdivia y Neuquén Aero.

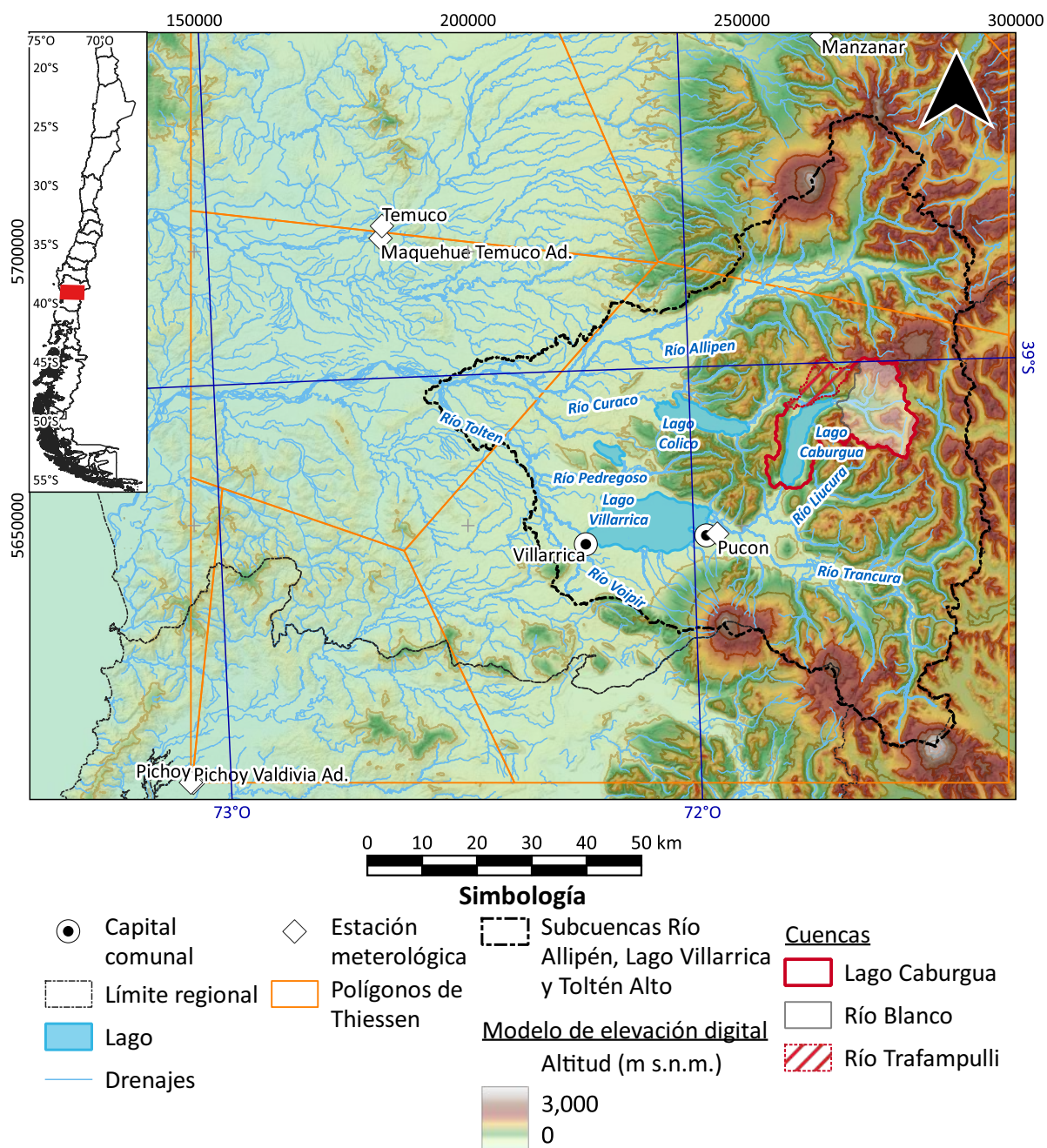
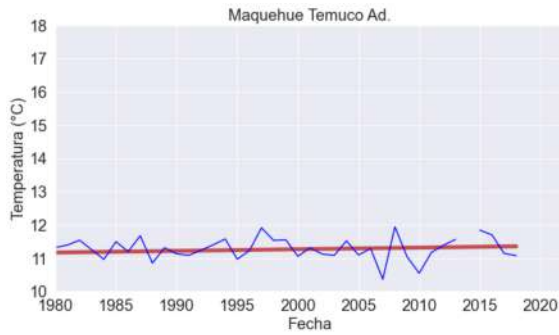
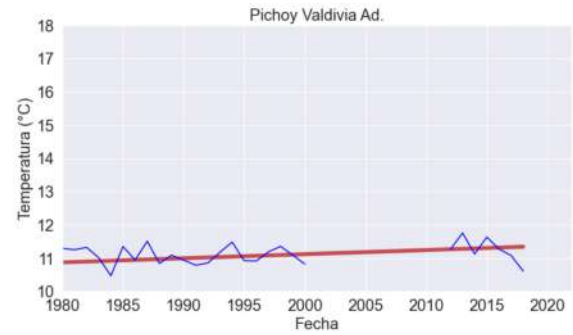


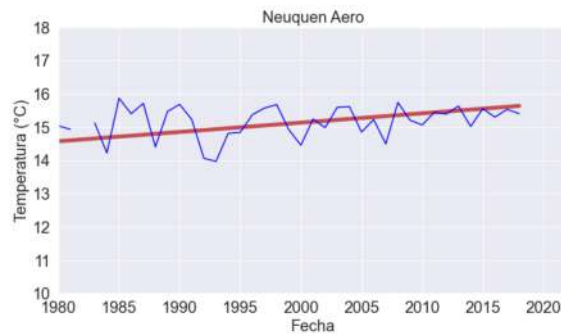
Figura 3.5: Polígonos de Thiessen para las estaciones de temperatura. Fuente: Elaboración propia utilizando datos de la Dirección General de Aguas. Datum WGS84-UTM19S.



(a) Temperatura media anual Maquehue- Temuco.



(b) Temperatura media anual Pichoy Valdivia Ad.



(c) Temperatura media anual Neuquén Aero

Figura 3.6: Temperatura media anual de las estaciones meteorológicas (en azul) y la línea de tendencia (línea roja). Fuente: Elaboración propia.

3.1.3. Caudales

La cuenca del Lago Caburgua no tiene registros históricos limnigráficos ni limnimétricos aguas arriba del lago, y el monitoreo de caudales en río Blanco se inició en noviembre de 2021. Por esta razón para el análisis del ciclo anual de caudales en la zona de estudio se analizaron los datos fluviométricos de las siguientes estaciones: i) Río Liucura en Liucura [9416001], ii) Toltén en Villarrica [9420001], iii) Trancura en Curarrehue [9412001], iv) Río Trancura antes del río Llafenco [9414001], todas pertenecientes a la cuenca del río Toltén. La Tabla 3.3 presenta información de localización, longitud de registro y caudales medios mensuales para marzo y julio.

Tabla 3.3: Información de las estaciones de caudal consideradas en el estudio. Fuente: Elaboración propia con datos de caudales del BNA.

Estación	Coordenada	Períodos con información incompleta	Período	Caudal medio m ³ /s
Río Liucura En Liucura [09416001]	Norte: 5650.911 Este: 256.368	1971, 1973, 1974, 1975, 1976, 1993, 1994, 1995, 2008, 2009, 2016, 2021.	Marzo Julio	8,6 51,9
Río Toltén En Villarrica [09420001]	Norte: 5648.487 Este: 221.085	1929, 1933, 1940, 1941, 1961, 1963, 1964, 1973, 1975, 2003, 2008, 2013, 2020, 2021.	Marzo Julio	127,7 422,0
Río Trancura En Curarrehue [09412001]	Norte: 5640.056 Este: 277.647	1968, 1970, 1971, 1974, 1986, 1990, 2003, 2008, 2012, 2013, 2014, 2016, 2017, 2021.	Marzo Julio	7,7 50,3
Río Trancura Antes Río Llafenco [09414001]	Norte: 5642.372 Este: 261.780	1970, 1971, 1972, 1973, 1974, 2003, 2012, 2015, 2016, 2018, 2021.	Marzo Julio	38,9 188,0

La Figura 3.7 presenta las series de caudal medio anual de las estaciones fluviométricas reportadas en la Tabla 3.3, con su respectiva línea de tendencia, en el período 1980 a 2020. Las series muestran una disminución de caudal en el tiempo, de acuerdo con el test de Mann-Kendall. Se aprecia que existe una tendencia decreciente en los caudales medios anuales en el tiempo, las pendientes de las líneas de tendencia son de -0,249, -0,91 y -0,176 para las estaciones de Liucura en Liucura, Toltén en Villarrica y Trancura en Curarrehue, respectivamente.

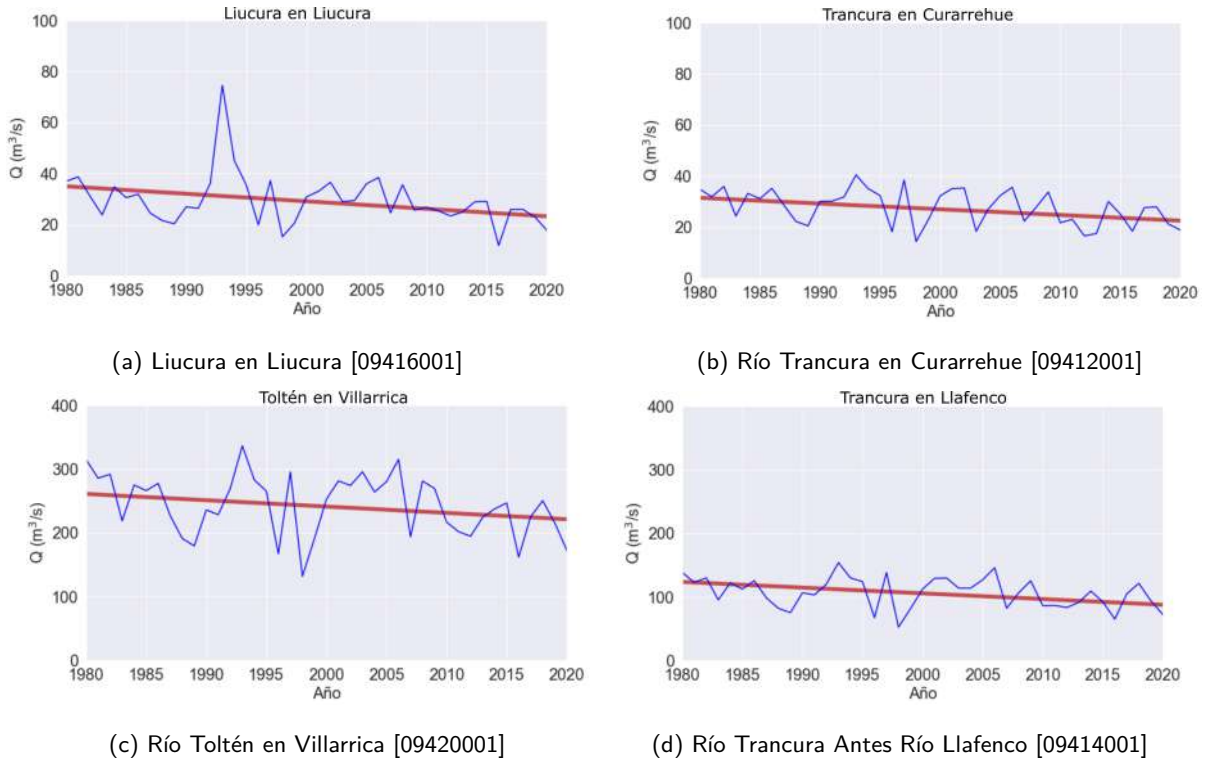


Figura 3.7: Caudales medios anuales de las estaciones fluviométricas (en azul) y la línea de tendencia (línea roja). Fuente: Elaboración propia con datos de caudal del BNA.

Análisis de caudales medios

La variación estacional de caudales mostrada en la Figura 3.8 revela una marcada componente pluvial en las cuencas de la zona. Los caudales medios máximos se han medido durante el mes de julio (invierno), mientras que, los caudales medios mínimos se generan durante el mes de marzo (verano-otoño). No obstante lo anterior, se aprecia, al menos en el caso del río Llafenco, una componente menor de derretimiento nival, asociada a la mitigación de la tendencia decreciente de los caudales mensuales en los meses de octubre y noviembre.

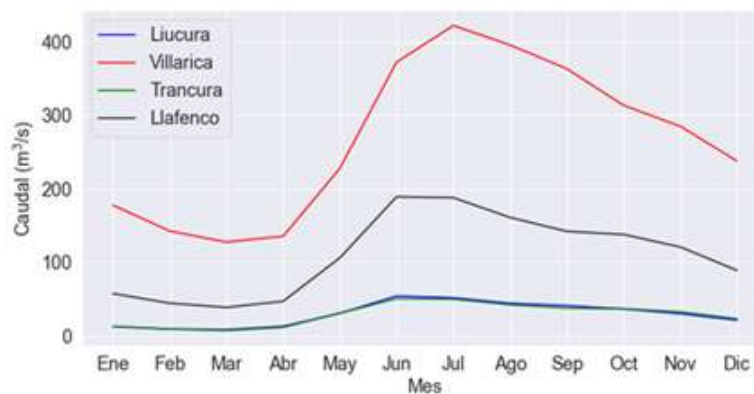


Figura 3.8: Variación estacional de caudales. Fuente: Elaboración propia con datos de caudales del BNA.

Con el fin de analizar el efecto del fenómeno ENSO, El Niño - Southern Oscillation en la variación estacional

de caudales en la región, se separaron los años de registro en las tres fases del fenómeno, La Niña, El Niño y neutro para mostrar mejor las variaciones asociadas a cada fase. La Figura 3.9 muestra la variación estacional de caudales para años Niña (en azul), años Niño (en rojo) y años neutros (en verde). La clasificación de los años El Niño, La Niña y neutros fue con base el registro histórico del fenómeno El ENSO, desde 1950 hasta el presente, del índice ONI¹, en el cual cinco meses consecutivos con anomalías mayores a 0.5 indica que la fase del fenómeno es cálida (El Niño). Por otro lado, cinco meses con anomalías menores a -0.5 indica que la fase del fenómeno es fría (La Niña), y anomalías entre -0.5 y 0.5 indica fase neutra.

Se observa que la fase fría del fenómeno genera una disminución de caudales durante el período junio-septiembre en las estaciones Liucura en Liucura, río Trancura En Curarrehue y río Trancura antes río Llafenco. La disminución máxima de caudal se genera en la estación Liucura en Liucura alcanzando una disminución hasta de un 40 %, respecto a la fase neutra. Mientras que, en la estación río Toltén en Villarrica la disminución de caudal se genera entre julio y agosto, y esta disminución de caudal puede ser hasta un 10 %, respecto a la fase neutra. Esto podría asociarse a que el Lago Villarrica regula fuertemente los caudales del río Toltén.

Por el contrario, la fase cálida del fenómeno muestra incrementos en los caudales medios hasta de un 26 % respecto a un año neutro en el período junio a diciembre. Las series de caudales medios mensuales en general indican que el efecto del fenómeno ENSO se percibe principalmente después del mayo aproximadamente, exceptuando a la estación Liucura en Liucura, en la cual se identifican variaciones de caudal desde el mes de abril.

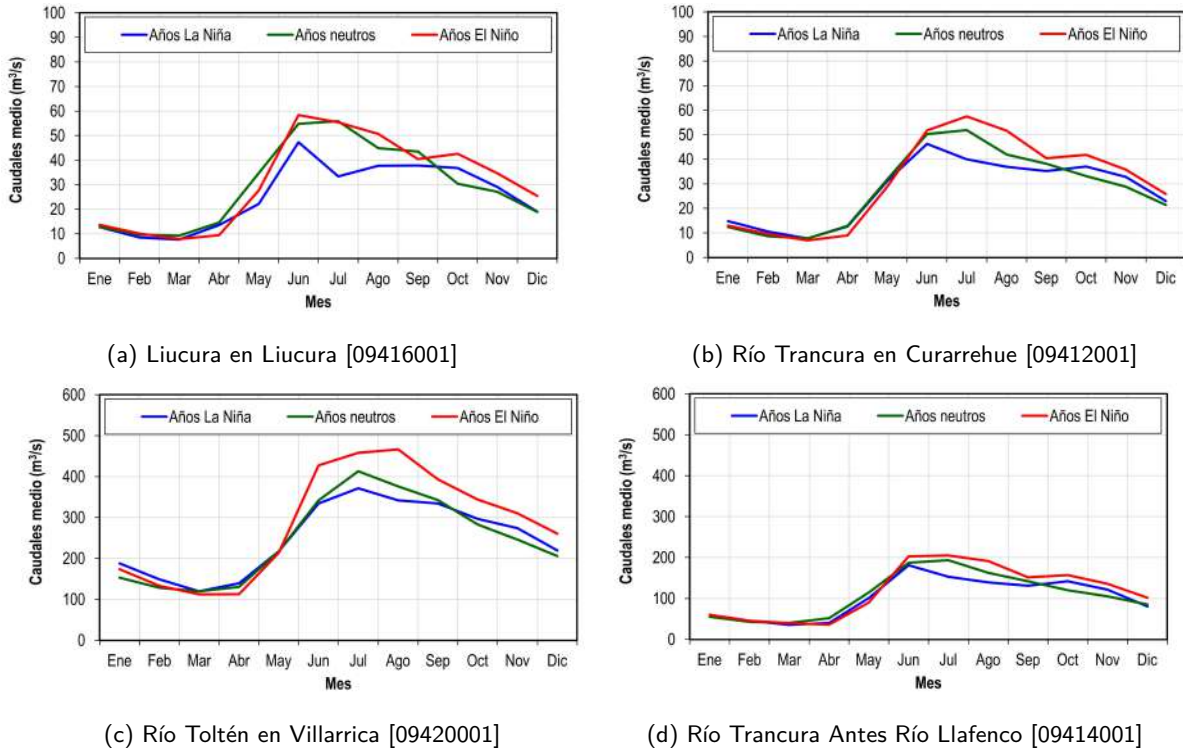


Figura 3.9: Fases del fenómeno El ENSO y la variación estacional de las series de caudales de las estaciones operadas por el BNA.

Caudales aforados en el río Trafampulli

La Dirección General de Aguas ha realizado 23 aforos sistemáticos sobre el río Trafampulli en Rinconada, cuenca que cuenta con un área de drenaje de 150 km² (Figura 3.1). Los aforos se han realizado desde mayo de

¹<https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml#history>

2016 en diferentes temporadas del año y anualmente se realizan aproximadamente cinco mediciones. La Tabla 3.4 presenta un resumen de los caudales aforados en el río Trafampulli, donde se reporta el caudal promedio, el caudal máximo y el caudal mínimo aforado para cada estación del año. El caudal mínimo aforado se registró en marzo de 2018 y fue de 1,7 m³/s, mientras que el caudal máximo se registró en noviembre de 2018 y fue de 19,6 m³/s. La Figura 3.10 muestra los caudales aforados en el río Trafampulli en Rinconada.

La mayor variabilidad de los caudales aforados ha sido a partir de otoño- invierno de 2018. Si bien los aforos se han realizado en diferentes temporadas del año y dan una idea de los caudales por temporada, estos no son representativos de los caudales instantáneos históricos, ya que la frecuencia con la que se realizan los aforos es mucho menor que la frecuencia de variación del caudal, esta variación puede llegar a ser hasta horaria. Por lo tanto, considerar los caudales aforados como caudales representativos del río Trafampulli induce a una percepción errónea de los caudales de este cauce, es decir, existe un problema de muestreo erróneo asociado a la frecuencia de los aforos. La instalación de una estación fluviométrica permanente en este sector permitiría un análisis sobre la variabilidad de caudal en el río Trafampulli. Por otra parte, el coeficiente de Manning y la pendiente de la línea de energía son muy altas, respecto a los valores reportados en la literatura, por lo que se recomienda revisar las mediciones tomadas en terreno (libreta de terreno), la calibración del correntómetro y la sección transversal del río en el punto de aforo.

Tabla 3.4: Resumen de los caudales aforados en el cauce del río Trafampulli en Rinconada, en la coordenada: Norte: 5669.263 m, Este: 252.113 m. Fuente: Elaboración propia con datos de la Dirección General de Aguas.

Estación	N° Aforos	Caudal aforado [m ³ /s]		
		promedio	máximo	mínimo
Otoño	5	4,3	6,6	3,7
Invierno	5	13,9	16,6	10,5
Primavera	7	8,5	19,6	2,1
Verano	6	3,7	5,17	1,7

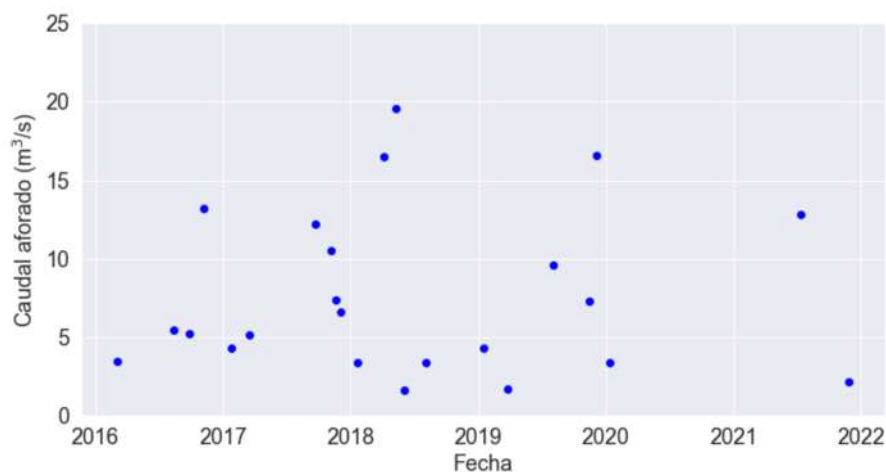


Figura 3.10: Caudales aforados en m³/s río Trafampulli en Rinconada.

Los aforos realizados en la cuenca del río Trafampulli en Rinconada permiten hacer una idea del orden de magnitud de los flujos de este cauce, si bien, como ya se ha dicho, presentan una versión posiblemente sesgada de los mismos. Para analizar esta información en el contexto del estudio que se presenta, debe considerarse también la diferencia de áreas aportantes en los puntos donde se realizaron los aforos (Rinconada, 150 km²) y el punto de interés (Llanqui-Llanqui, 47 km²). En algunos casos -por ejemplo durante períodos de ausencia de crecidas pluviales- es posible aproximar linealmente los caudales en función del área aportante de la cuenca. En

consecuencia, los caudales en la zona de Llanqui-Llanqui posiblemente hayan sido aproximadamente un tercio (31 %) de los caudales aforados en el instante en que se realizaron dichas observaciones.

Caudales máximos río Trafampulli

La estimación de los caudales máximos para el período de retorno de cinco años, Tr 5, en el río Trafampulli se realizó considerando las metodologías de Análisis de Frecuencias Regional, Verni y King Modificado y Racional modificado (DGA 1995) para cuencas sin información registrada. La metodología para la estimación de los caudales máximos se presenta en el Anexo B. La Tabla 3.5 contiene los parámetros considerados para la estimación de los caudales máximos en el río Trafampulli, donde P_5 y P_{10} son las precipitaciones con período de retorno de 10 y 5 años, respectivamente, A es el área pluvial de la cuenca, T_c el tiempo de concentración, α es el factor de conversión de caudal medio diario a caudal máximo instantáneo y C son coeficientes empíricos. Mientras que, la Tabla 3.6 contiene los caudales máximos estimados en el río Trafampulli para el Tr 5 años, en el sector de la defensa ribereña.

La Tabla 3.6 muestra una alta variabilidad de la magnitud de los caudales máximos instantáneos estimados por las tres metodologías consideradas en este estudio. Los caudales máximos instantáneos varían entre 50,2 m^3/s y 84,3 m^3/s , es decir, el caudal de diseño de la defensa ribereña, 67,67 m^3/s , está dentro del rango de caudales máximos instantáneos estimados.

Tabla 3.5: Parámetros para la estimación de los caudales máximos en el río Trafampulli, para las metodologías Regional, Verni y King Modificado y Racional modificado. Fuente elaboración propia con datos de precipitaciones máximas de la DGA y el procesamiento del modelo digital del terreno Alos Palsar.

Método Regional		Verni y King Modificado		Método Racional modificado	
P_{10} [mm]	192,3	P_5 [mm]	169,6	$C(Tr\ 10)$	0,28
A [km ²]	43	A [km ²]	43	$C(Tr\ 5)$	0,29
$Q(Tr\ 5)/Q(Tr\ 10)$	0,87	$C(Tr\ 5)$	0,91	I_{24}	7,99
α	1,2			I_2	16,18
				T_c [h]	2.0

Tabla 3.6: Caudales máximos instantáneos del río Trafampulli para el período de retorno $Tr=5$ años, en m^3/s . Fuente elaboración propia con resultados obtenidos de la estimación de caudales máximos instantáneos.

Regional	Verni y King Modificado	Racional modificado
50,2	89,3	94,3

Las estimaciones presentadas en esta sección se confeccionaron con datos de precipitación observados entre los años 1979 y 2021. Algunos períodos sin observación fueron complementados con datos rellenados mediante técnicas estadísticas ampliamente usadas en hidrología. No es posible, debido a la duración de los registros, separar este análisis en sub-períodos y realizar, por ejemplo, estimaciones estadísticas confiables de caudales máximos para 5 años de período de retorno con anterioridad y posterioridad al año 2010, lo que podría dar cuenta de algún hipotético cambio en el régimen de caudales máximos durante la megasequía.

3.1.4. Niveles de lagos

El análisis del nivel de agua en los lagos consideró datos de las estaciones Lago Villarrica (Lm) [09420009] y Lago Caburguaua (Lm) [09417007]. Ambas estaciones de monitoreo han mejorado la resolución temporal de la toma de datos de nivel. Actualmente, los registros de nivel de agua sobre el lago Caburguaua son cada 30 minutos y sobre el lago Villarrica la resolución temporal es de 1 hora. Es importante resaltar que, a la fecha,

no existe una estación de monitoreo del nivel del agua en el lago Colico. La Tabla 3.7 presenta la localización de las estaciones de nivel de agua, longitud de registros en años y la resolución temporal.

Tabla 3.7: Información de las estaciones de nivel de agua consideradas en el estudio. Fuente elaboración propia con datos de suministrados por la Dirección General de Aguas.

Estación	Localización	Longitud de registro [años]	Período	Resolución temporal [h]
Sat Lago Villarrica (Lm) [09420009]	N.5.648.325	36	1985-2003	24
	E. 242.815		2004-2021	1
Lago Caburga (Lm) [09417007 – 9]	N. 5659.088 E. 260.539	21	2000-2014	24
			2015-2019	1
			2021	0,5

La Figura 3.12 muestra los niveles medios anuales del agua en los lagos Villarrica y Caburgua. Se aprecia que en el lago Villarrica la máxima fluctuación registrada es de 1,5 m (en 1988), y la fluctuación promedio es de 0,3 m, mientras que la fluctuación máxima medida en el Lago Caburgua es de 4,06 m (en 2001) y la fluctuación promedio es de 0,97 m. Es importante resaltar que, para el análisis de la variación máxima de nivel se descartó el nivel del Lago Caburgua en el año 2015, ya que pareciera ser un dato anómalo en la serie de datos y coincide con el cambio en la resolución temporal de la serie ocurrida aquel año, pasando de una resolución diaria a una resolución horaria. Por otra parte, UACH (2021) presentó evidencia que la estación medición de nivel no estaba instalada correctamente, ya que estaba lejos del espejo de agua. Es importante resaltar que durante la ejecución de este estudio no se realizó una visita a terreno, por lo cual no puede confirmarse que la estación de medición esté efectivamente lejos del espejo de agua. La Figura 3.11 se realizó con los datos registrados a las 00:00 en la serie de datos, esto con el objetivo de tener datos de nivel reportados sistemáticamente.

El análisis de tendencia estadística de los niveles medios anuales de los lagos Villarrica y Caburgua, se realizó usando el test de Mann-Kendall y gráficamente con la Figura 3.12. Se obtuvo una tendencia decreciente en los niveles del Lago Caburgua

Adicionalmente, en la Figura 3.12 se representa con una línea verde el año en el cual la defensa ribereña fue recepcionada y con un línea naranja la tendencia de los niveles del lago Caburgua. Se aprecia una disminución de nivel previa al 2009. Sin embargo, luego de la entrada en operación de la estructura lateral, la defensa ribereña, sobre el río Trafampulli, el nivel del lago no ha llegado a alcanzar un nivel medio superior a los 9,0 m.

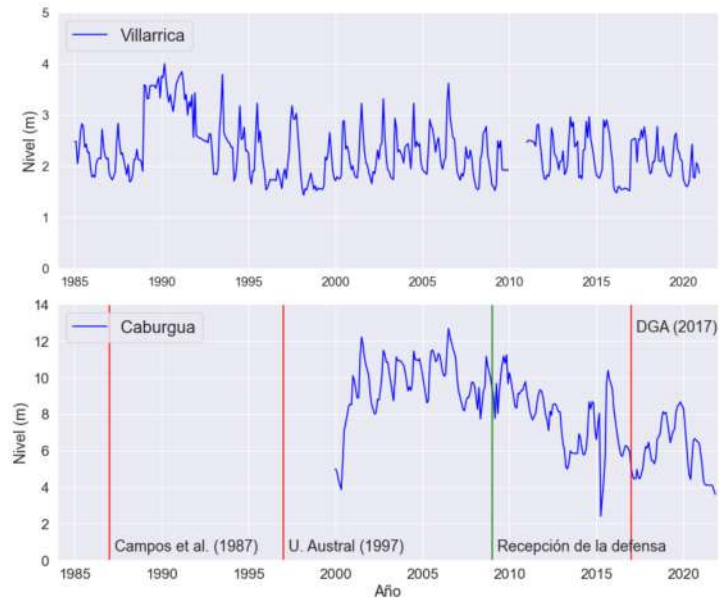


Figura 3.11: Niveles medios mensuales de agua en los lagos Villarrica y Caburgua. Fuente: Elaboración propia con datos de las estaciones de nivel Lago Caburgua y Lago Villarrica.

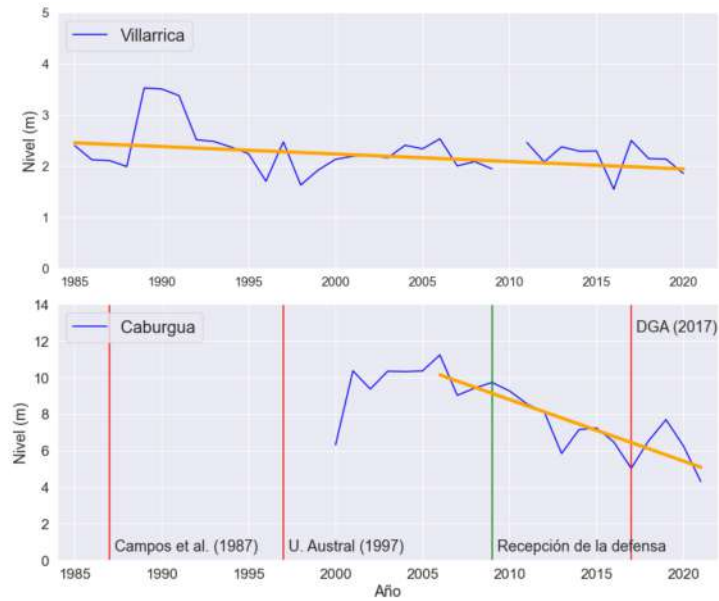


Figura 3.12: Niveles medios anuales de agua en los lagos Villarrica y Caburgua. Fuente: Elaboración propia con datos de las estaciones de la DGA de nivel Lago Caburgua y Lago Villarrica.

Análisis de niveles superficiales

Las curvas de variación estacional de niveles de agua para los lagos Villarrica y Caburgua muestran la componente pluvial, identificada en la variación estacional de caudales (sección 3.1.3). Sin embargo, la respuesta

en el Lago Villarrica se da en invierno con un máximo marcado en julio asociado a las precipitaciones y otra respuesta asociada a la componente nival, mientras que, en el Lago Caburgua, la respuesta se observa en primavera y verano y de forma atenuada, es decir, no observándose un máximo asociado a las lluvias de invierno. (Figura 3.13). Los menores niveles del lago se dan durante el mes de mayo (otoño) y los mayores niveles durante los meses de octubre y noviembre (primavera).

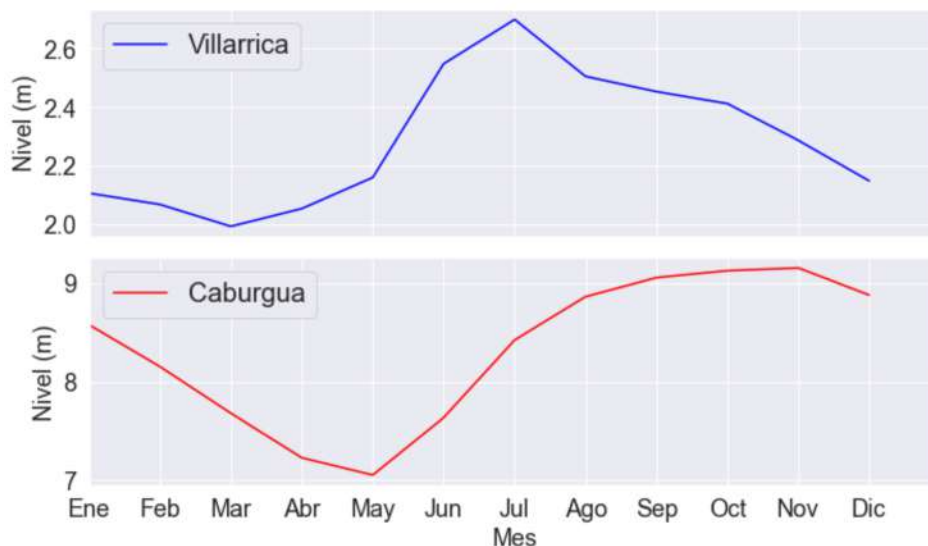


Figura 3.13: Variación estacional de los niveles de agua registrados de los lagos Villarrica y Caburgua. Fuente: Elaboración propia con datos de la Dirección General de Agua para el período 1985-2000 para el lago Villarrica y 2000-2021 para el lago Caburgua.

3.1.5. Evaporación

La evaporación en el lago Caburgua se estimó acorde a la metodología planteada en el Anexo A y, además, con el objetivo de analizar órdenes de magnitud de la evaporación en el lago Caburgua se comparó la evaporación reportada en el Balance Hídrico de Chile de 1987 (DGA 1987). La evaporación de tanques reportada en el Balance de 1987 se presenta en la Figura 3.14. DGA (1987) reporta que la evaporación de tanque en el sector del Lago Caburgua puede variar entre 741 y 1000 mm/año, mientras que la temperatura media varía entre 10 y 12°C.

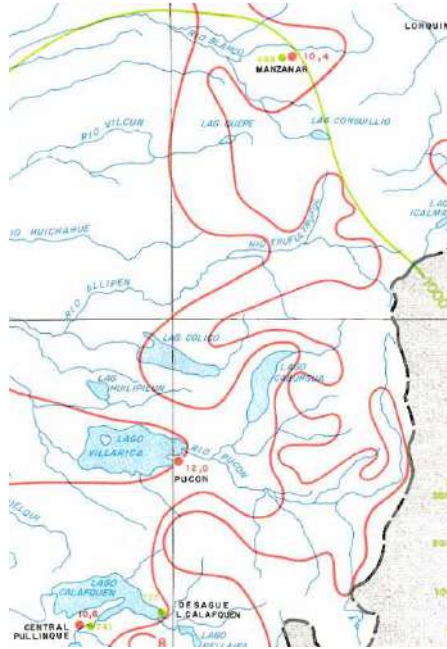


Figura 3.14: Isolinéa de evaporación de tanque, la temperatura en °C está representada con línea roja y la evaporación en mm/año con la línea verde. Fuente: DGA (1987).

3.2. Análisis geomorfológico

Luego, los modelos digitales de terreno fueron procesados en QGIS v.3.18.3 utilizando las herramientas de Grass v.7.8.5. A partir de una serie de pasos, que incluyen el relleno de depresiones existentes en el modelo digital de terreno (r.fill.dir) y la obtención de los ráster de acumulación y dirección de drenaje (r.watershed), se delimita la cuenca aportante al Lago Caburgua indicando como punto de salida el desagüe del lago (r.water.outlet).

La Figura 3.15 presenta las cuencas del Lago Caburgua, y la del río Trafampulli trazadas con el modelo digital de elevación Alos Palsar de resolución espacial de 12,5 m × 12,5 m, la red de drenaje es del BNA, en la figura se presenta el área del río Trafampulli con borde segmentado haciendo alusión al aporte intermitente del río Trafampulli hacia el lago Caburgua. En esta figura la ubicación de la defensa ribereña está representada con un círculo amarillo. Por otro lado, la Tabla 3.8 reporta las áreas de drenaje de la cuenca del Lago Caburgua para los trabajos de MOP (1998), UCh (2021) y las estimadas en este estudio con el río Trafampulli (C_{Traf}), y sin el río Trafampulli (S_{Traf}).

Es importante resaltar que acorde la cartografía de 1974 del Instituto Geográfico Militar, escala 1:50.000, el río Trafampulli no aportaría flujo a la cuenca del Lago Caburgua. Sin embargo, al trazar la cuenca con el modelo digital de elevación Alos Palsar, de alta resolución (RT1), baja resolución (RT2) y el modelo de la Misión topográfica Radar Shuttle (STRM), el río Trafampulli si podría aportar parcialmente flujo al lago Caburgua. Además, al trazar el perfil longitudinal del río Trafampulli cartografiado en la carta IGM 1974 con base en los tres modelos digitales de terreno, mencionados anteriormente, en la Figura 3.16 se observa una variación de la cota del terreno de aproximadamente 3 m, es decir, la divisoria de aguas no está claramente definida.

El perfil longitudinal del río Trafampulli (Figura 3.16) muestra una alta pendiente del cauce aguas arriba de la defensa ribereña, siendo ésta del orden de 4,4%, mientras que aguas abajo de la defensa ribereña, la pendiente es del orden de 0,9%. Esto significa que existe un cambio de pendiente marcado en el sector de la defensa ribereña, el cual puede modificar de forma natural el patrón de lineamiento del río Trafampulli.

La información cartográfica de la Carta de 1974 indica que esta carta fue realizada con base en el levanta-

miento aerofotogramétrico de 1961 y la clasificación en terreno fue realizada en 1972. Mientras que, la Carta de 2007 se realizó con fotografías tomadas entre 1996 - 1998 y la clasificación en terreno fue la realizada en 1972. Por lo tanto, al considerar que no hubo una actualización de la clasificación en terreno para la Carta de 2007, para este estudio se adquirieron las fotografías aéreas de 1979, 1994 y 1998, las cuales serán analizadas en la siguiente sub-sección.

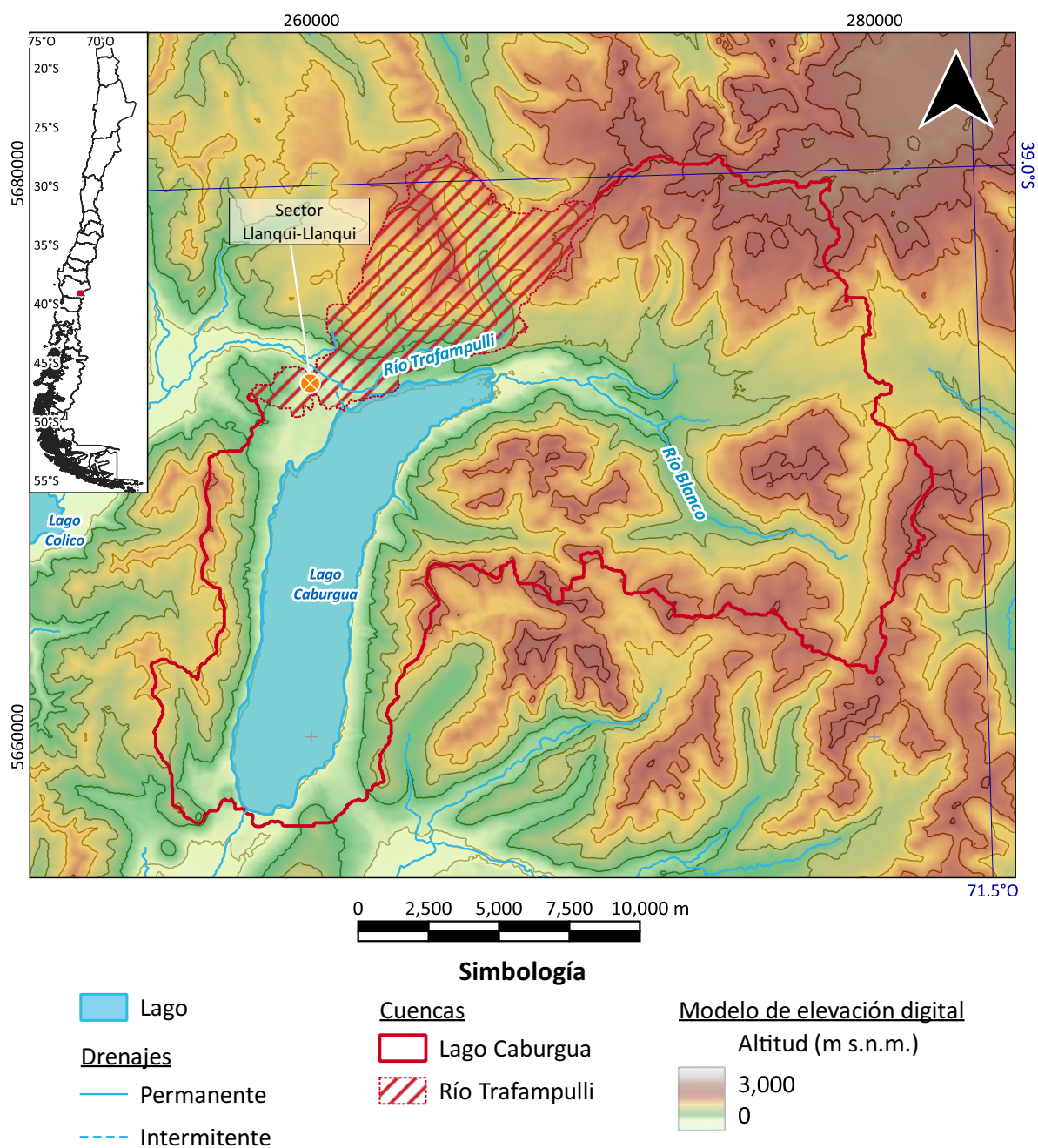


Figura 3.15: Cuencas hidrográficas de la zona de estudio delimitadas con herramientas de software Grass utilizando modelos de elevación digital Alos Palsar. A pesar de que el resultado del procesamiento de imágenes Alos Palsar incluye la cuenca del Río Trafampulli dentro de la del Lago Caburgua, la cuenca se delinea segmentada en ese sector dado que la naturaleza y magnitud de esta conexión se mantiene indeterminada aún. Fuente: Elaboración propia. Datum WGS84-UTM19S

Tabla 3.8: Área de la cuenca del Lago Caburgua según diferentes investigaciones y metodologías. con datos de los informe MOP (1998), UACH (2021) y el modelo digital de elevación Alos Palsar.

Investigación	MOP (1998)	UACH (2021)	C_{Traf}	S_{Traf}
Área cuenca km ²	325	335	373,4	325,9

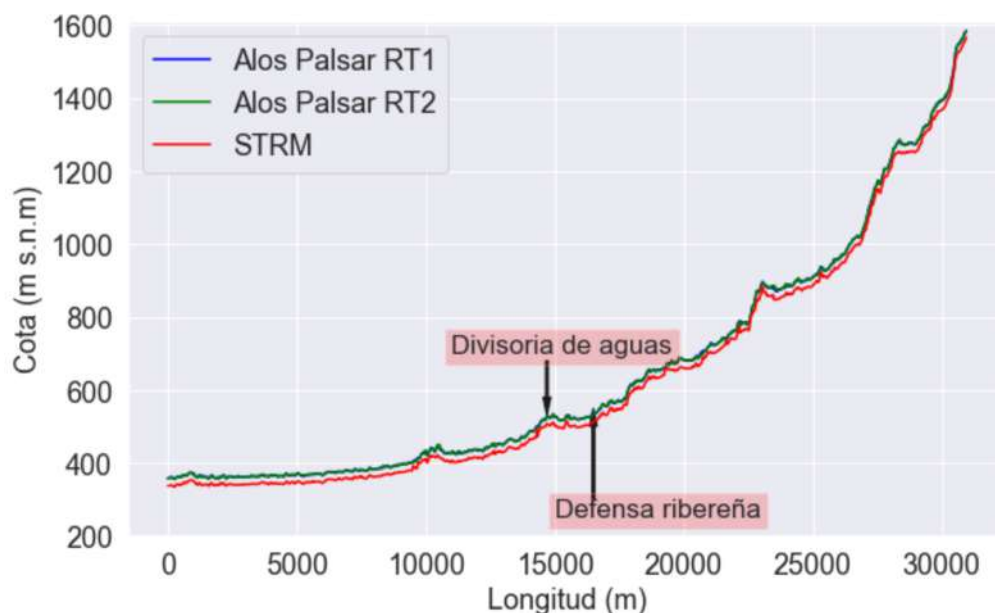


Figura 3.16: Perfil longitudinal del río Trafampulli. Fuente: Elaboración propia con datos de los modelos digitales de terreno Alos Palsar, alta resolución (RT1), baja resolución (RT2), y SRTM.

3.2.1. Análisis de fotografías aéreas - Servicio Aerofotogramétrico de la Fuerza Aérea de Chile.

La Tabla 3.9 reporta el vuelo, la fecha y la escala de cada aerofotografía considerada en el análisis y la precipitación acumulada de cinco días previos al vuelo de adquisición de imágenes, P_{p5} en mm. Adicionalmente se reportan los anchos aproximados del drenaje superficial del río Trafampulli hacia el Lago Caburgua, B_{dr} , en metros, y del río Trafampulli aguas abajo del sector de la defensa ribereña, B_{Td} , en metros.

Las aerofotografías fueron georreferenciadas, considerando como puntos de control los puentes de la vía S-15 y S-965. La Figura 3.17 presenta la imágenes del Instituto Geográfico Militar de 1943 y 1961 georreferenciadas y en la Figura 3.19 se presentan las imágenes georreferenciadas para cuatro instantes de tiempo, 1979, 1994, 1998 y 2007, en el sector de la defensa ribereña sobre el río Trafampulli.

La resolución de las imágenes de Figura 3.17 no permite visualizar claramente el cauce del río Trafampulli aguas abajo del sector de la defensa ribereña. Sin embargo, se identifica incremento en la vegetación en el sector de vegas y en dirección al lago Caburgua. La Figura 3.18 muestra un zoom en el sector de la bahía del sector Llanqui-Llanqui.

Por otra parte, las Figuras 3.19a y b muestran un aporte del río Trafampulli hacia el lago Caburgua. El ancho de este brazo no ha sido constante en el tiempo: en la imagen de 1979 el ancho el brazo es de aproximadamente 1,7 m y la precipitación acumulada cinco días previos al vuelo fue de 0,0 mm. En la imagen de 1994 el ancho es de aproximadamente 2,8 m y la precipitación acumulada cinco días previos al vuelo fue de 76 mm. En la imagen del 2008 producto de la resolución de la imagen no se observa un aporte del río Trafampulli hacia el lago Caburgua, la precipitación acumulada cinco días previos al vuelo fue de 0,0 mm. Finalmente, en imagen

de 2007 el ancho superficial es de aproximadamente 7,7 m y la precipitación acumulada cinco días previos al vuelo fue de 3,0 mm.

Por otra parte, la Figura 3.17 muestra que existe una zona de vegas coincidente con el cambio de pendiente del río. Esta zona se aprecia en las imágenes con más vegetación y además no se observa un cauce definido del río Trafampulli en este sector. Tampoco es posible identificar un brazo al Caburgua en las imágenes de 1943 y 1961, pero sí se aprecia una bahía y una morfología de costa que sugiere una llegada de agua (Figura 3.18).

Tabla 3.9: Información de aérofotografías SAF del ancho superficial del río Trafampulli hacia el Lago Caburgua, B_{dr} , y del ancho superficial aguas abajo de la defensa ribereña, B_{Td} y la precipitación acumulada en mm, 5 días previos al vuelo, Pp_5 . Fuente: elaboración propia con datos de aerofotografías SAF.

Vuelo	Fecha	Escala	B_{dr} [m]	B_{Td} [mm]	Pp_5 [mm]
CH-30	Marzo 30 de 1979	1:30.000	1,7	8,7	0,0 ²
FONDEF	Marzo 25 1994	1:20.000	2,8	5,9	76,0
GEOTEC	Enero 30 de 1998	1:70.000			0,0
GEOTEC	Febrero 09 de 2007	1:40.000	7,7	7,6	3,0 ³

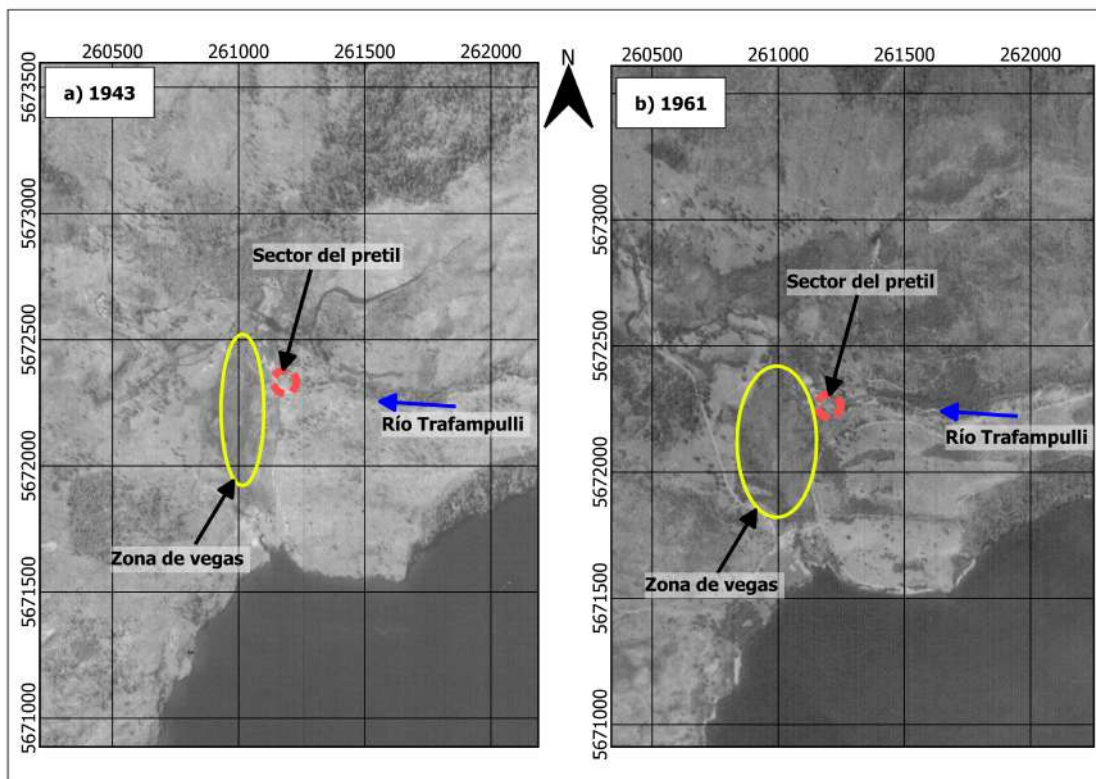


Figura 3.17: Evolución temporal del río Trafampulli en el sector de la defensa ribereña. a) Aérofotografía IGM 1943 y b) Aérofotografía IGM 1961. Ambas imágenes fueron suministradas por la corporación Caburgua Sustentable y fueron adquiridas en el Instituto Geográfico Militar. Fuente: Elaboración propia.

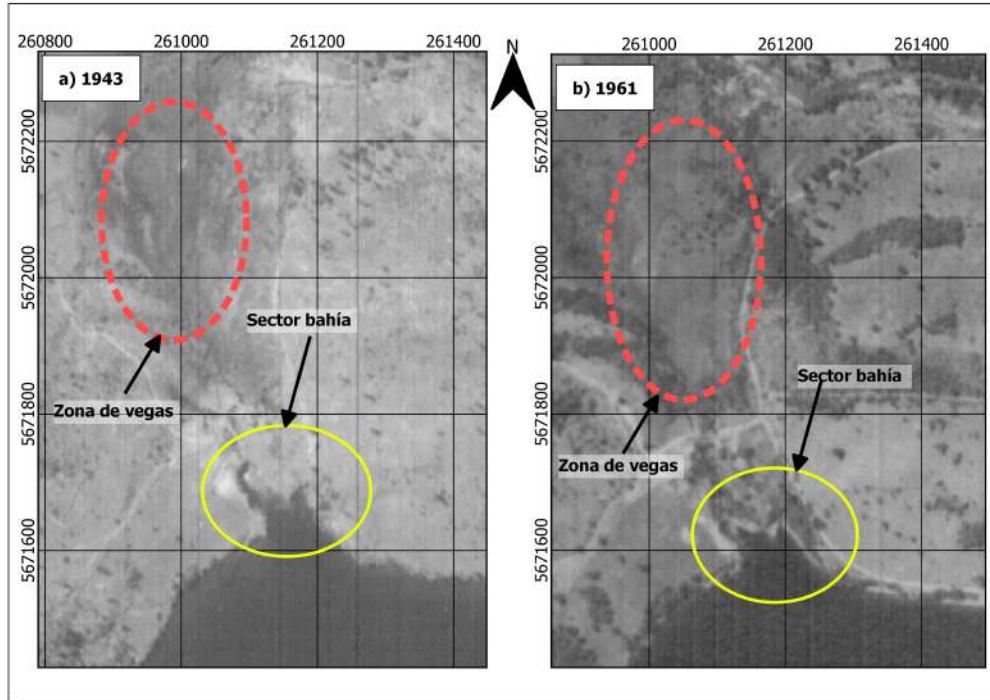


Figura 3.18: Zoom a la zona de la bahía en el sector Llanqui-Llanqui. a) Aerofotografía IGM 1943 y b) Aerofotografía IGM 1961. Ambas imágenes fueron suministradas por la corporación Caburgua Sustentable y fueron adquiridas en el Instituto Geográfico Militar. Fuente: Elaboración propia.

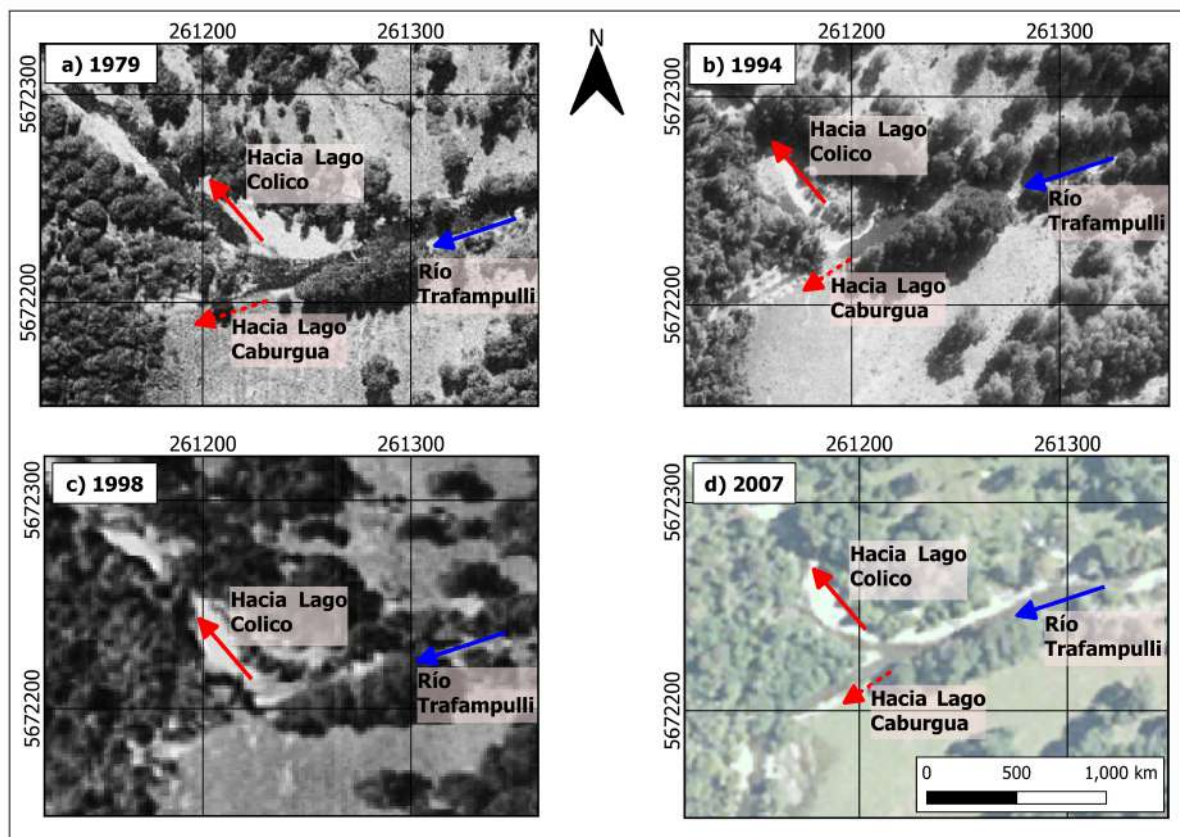


Figura 3.19: Evolución temporal del río Trafampulli en el sector de la defensa ribereña. **a)** Aerofotografía SAF 1979, **b)** Aerofotografía SAF 1994, **c)** Aerofotografía SAF 1998 y **d)** Aerofotografía SAF 2007 suministrada por la corporación Caburgua Sustentable. Fuente: Elaboración propia.

3.3. Información geológica

Desde el punto de vista geológico, el Lago Caburgua se encuentra en la Zona Volcánica Sur, una cadena de aproximadamente 60 volcanes de orientación norte-sur, que se extiende a lo largo de ~ 1500 km desde Chile Central a los 33°S hasta el Sur de Chile a los 46°S (Figura 3.20a; Stern et al. (2007)). Las rocas que componen el basamento de esta zona (Figura 3.20b) corresponden a rocas volcano-sedimentarias de la Formación Cura-Mallin (Jordan et al. 2001, Pedroza et al. 2017), y hacia el sur, por las rocas plutónicas del Batolito Norpatagónico (Munizaga et al. 1988, Pankhurst et al. 1999, Adriasola et al. 2006). Lavas que resultaron de las erupciones de los volcanes presentes y depósitos no consolidados que resultaron de procesos fluvio-glaciares cubren las rocas del basamento (Hickey -Vargas et al. 1989, Lowell et al. 1995, Lara et al. 2001, Lara and Moreno 2004, 2008). En particular, el Lago Caburgua se ubica en un valle glaciar relleno por sedimentos no consolidados que cubren al Batolito Norpatagónico (Complejo Intrusivo Huerquehue; Lara and Moreno (2008)). Estructuralmente hablando, el lago se encuentra limitado en el flanco oeste y este, por fallas de orientación norte-sur, subverticales, perteneciente al Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui (Lara and Moreno (2008)). A su vez, en el sector norte, el lago es cruzado por una falla de orientación noroeste, subvertical, perteneciente a las Fallas Transversales a los Andes (Sielfeld et al. 2019). Vale destacar que la última falla, además, coincide espacialmente con un escarpe observado en la carta batimétrica del lago realizada el año 1984.

Los sistemas de fallas mencionados anteriormente corresponden a fallas regionales de larga vida (Cembrano

and Lara 2009, Sánchez et al. 2013, Pérez-Flores et al. 2016). El Sistema de Fallas de Liquiñe-Ofqui (SFLO) es un sistema de fallas dextrales, de orientación general norte-sur y de alrededor de 1200 km, que actualmente acomoda la deformación impuesta por la subducción oblicua en la región del arco, principalmente desde los últimos 6 millones de años (Cembrano et al. 1996, Melnick et al. 2006, Rosenau et al. 2006, Astudillo-Sotomayor et al. 2021, De Pascale et al. 2021). Las Fallas Transversales a los Andes (FTA) comprenden una serie de fallas inversas-sinistrales, de orientación noroeste y, en algunos casos, de hasta 300 km de largo, las cuales están relacionadas a la reactivación de fallas resultantes de procesos tectónicos previos a los ~215 millones de años (Rosenau et al. 2006, Glodny et al. 2008, Radic 2010, Pearce et al. 2020). Tanto SFLO como FTA son estructuras corticales que alcanzan la transición frágil-dúctil en el arco volcánico a aproximadamente los 12 km de profundidad (Held et al. 2016, Kapinos et al. 2016, Sielfeld et al. 2019, Pérez-Estay et al. 2020, Villalobos et al. 2020).

3.3.1. Calidad de agua

Para el análisis de calidad de agua se consideraron las únicas 4 estaciones de monitoreo dentro del área del Lago Caburgua (Figura 3.21): (i) Lago Caburgua en Río Blanco, (ii) Lago Caburgua Sector Norte, (iii) Lago Caburgua Sector Centro, y (iv) Lago Caburgua en Sector Desagüe. Las variables medidas por las estaciones son conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), pH, SiO_2 (mg/L), fósforo total (mg/L), nitrógeno de amonio, NH_4NO_3 , en mg/L, nitrógeno de nitrito (mg/L), nitrógeno de nitrato (mg/L) y nitrógeno total ($\mu\text{g}/\text{L}$), con algunas medidas de clorofila, turbiedad y oxígeno disuelto. Estos parámetros dan una idea en cuanto a la calidad del agua del lago y de los nutrientes en este, los cuales no permiten realizar interpretaciones respecto del funcionamiento hidrogeológico del lago. La mayoría de los parámetros medidos se encuentran bajo el límite de detección y, además, las mediciones son irregulares temporalmente, lo que no permite realizar un análisis temporal adecuado. Los datos considerados en este trabajo se encuentran en los Anexos C, disponible de forma digital, y el resumen de la estadística básica de estos se encuentra en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10: Análisis estadístico de los parámetros medidos de calidad de agua. Fuente: Elaboración propia con con datos tomados de *Inventario Público de Información Hidrológica y Meteorológica* de la Dirección General de Aguas (<https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>).

Parámetro estadístico	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	Fósforo Total (mg/l)	SiO_2 (mg/L)	NH_4NO_3 (mg/l)	Nitrógeno - Nitrito (mg/l)	Nitrógeno de Nitrato (mg/l)	Nitrógeno Total ($\mu\text{g}/\text{l}$)	Estación
Mínimo	15,30	6,57	0,01	4,58	0,01	0,00	0,00	197,10	Lago Caburgua en Río Blanco.
Máximo	88,40	7,75	47,70	25,18	0,07	0,01	0,11	273,00	
Promedio	39,71	7,22	17,67	12,86	0,03	0,00	0,03	235,05	
σ	13,73	0,32	14,43	6,80	0,02	0,00	0,03	81,47	
Mínimo	29,70	6,70	1,00	3,36	0,01	0,00	0,00	30,10	Lago Caburgua en Sector Norte.
Máximo	35,40	7,90	31,30	11,80	0,06	0,00	0,20	392,80	
Promedio	32,24	7,44	8,43	9,19	0,02	0,00	0,03	168,72	
σ	1,73	0,30	7,06	3,62	0,02	0,00	0,04	102,10	
Mínimo	27,00	6,95	0,00	3,52	0,00	0,00	0,00	0,00	Lago Caburgua en Sector Centro.
Máximo	37,20	7,92	33,00	11,80	0,09	0,00	0,05	266,20	
Promedio	32,37	7,41	7,42	8,69	0,02	0,00	0,02	111,00	
σ	2,30	0,29	6,99	3,54	0,02	0,00	0,02	69,49	
Mínimo	29,40	6,96	2,40	3,57	0,01	0,00	0,00	31,30	Lago Caburgua en Sector Desagüe.
Máximo	35,50	7,91	33,10	13,30	0,09	0,00	0,10	306,80	
Promedio	32,09	7,43	10,26	9,22	0,03	0,00	0,02	115,28	
σ	1,71	0,29	8,46	3,52	0,02	0,00	0,02	72,75	

En adelante se describen brevemente, de norte a sur, los datos de las estaciones de calidad ubicadas en el Lago Caburgua:

1. La estación Lago Caburgua en río Blanco cuenta con 27 mediciones puntuales, las cuales están distribuidas de manera irregular en el tiempo desde el año 2001 a 2010 y luego del año 2017 a 2019 (Figura C.1).

En general, el agua muestreada por esa estación es de baja conductividad eléctrica, variando desde 15,3 a 88,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$, promediando 39,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El pH varía desde 6,57 a 7,75, promediando 7,22.

2. La estación Lago Caburgua en Sector Norte cuenta con 33 mediciones puntuales, las cuales están distribuidas de manera irregular en el tiempo desde el año 2001 a 2010 (Figura C.2). En general, el agua muestreada por esa estación es de baja conductividad eléctrica, variando desde 29,7 a 35,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$, promediando 32,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El pH varía entre 6,70 y 7,90, y el promedio es de 7,44.
3. La estación Lago Caburgua Sector Centro cuenta con 37 mediciones puntuales, las cuales están distribuidas de manera irregular en el tiempo desde el año 2001 a 2010 y luego del año 2017 a 2019 (Figura 3.22). En general, el agua muestreada por esa estación es de baja conductividad eléctrica, variando desde 27,0 a 37,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$, promediando 32,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El pH varía entre 6,95 y 7,92, y el promedio es de 7,41.
4. La estación Lago Caburgua en Sector Desagüe cuenta con 35 mediciones puntuales, las cuales están distribuidas de manera irregular en el tiempo desde el año 2001 a 2010 (Figura C.3). En general, el agua muestreada por esa estación es de baja conductividad eléctrica, variando desde 29,7 a 35,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$, promediando 32,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El pH varía entre 6,70 y 7,90, y el promedio es de 7,44.

3.4. Análisis de información geológica e hidrogeológica

3.4.1. Circulación de agua subterránea y fluidos por los sistemas de fallas

Tanto el Sistema de Fallas de Liquiñe-Ofqui (SFLO) como las Fallas Transversales a los Andes (FTA) ejercen un control estructural importante sobre las propiedades mecánicas del basamento, permitiendo la circulación de fluidos (i.e. gases y agua subterránea) a través de fracturas (Pérez-Flores et al. 2017, Molina et al. 2019, Sepúlveda et al. 2020). Sánchez et al. (2013) indican que SFLO ejerce una alta permeabilidad del basamento en el eje vertical promoviendo el ascenso de fluidos y magma (Tardani et al. 2016, Pérez-Flores et al. 2017, Held et al. 2018). En contraste, las FTA promueven la permeabilidad horizontal que limita el ascenso vertical de fluidos profundos (Sánchez et al. (2013)), aunque la existente condición de sobrepresión de fluidos permite la conexión entre ambientes profundos y someros (Held et al. 2018).

A su vez, la composición química de los más de 200 manantiales termales ubicados en la región se ve influenciada de acuerdo con el sistema de fallas al cual se asocian (Hauser 2000). A escala regional, la composición química de los manantiales termales asociados al SFLO tiene valores de pH entre 8,9 y 9,7, mientras que aquellos asociados con las FTA tienen valores de pH entre 7.8 y 8.7 (Sánchez et al. 2013, Wrage et al. 2017). Respecto a la temperatura de los manantiales termales, la diferencia no es muy clara entre ambos sistemas de fallas: desde 36° a 70°C y desde 32° a 82°C para los manantiales termales asociados a SFLO y FTA, respectivamente. Las aguas son de origen meteórico y las principales fuentes de iones disueltos en dichos manantiales corresponden a la interacción agua-roca y a la absorción de gases geotermales (Negri et al. 2018, Daniele et al. 2020). A lo largo del SFLO circulan gases ricos en H₂S y CO₂, mientras que en las FTA solo hay gases ricos en CO₂. También se observan diferencias importantes en la concentración de elementos traza de acuerdo con las propiedades hidráulicas de cada falla (Daniele et al. 2020). A lo largo de zonas de núcleo de falla (menor permeabilidad) la concentración de elementos traza es baja y se debe a interacción agua-roca a baja temperatura, mientras que, a lo largo de las zonas de daño (mayor permeabilidad), la concentración de elementos traza es alta y se debe a calentamiento por vapor. El análisis de gases antrópicos en los manantiales termales (CFC, SF₆) muestran concentraciones <10% en los manantiales relacionados a SFLO y de 12% a 49% en los asociados a las FTA (Held et al. 2018). Esto último sugiere que, a pesar de la gran influencia de ambientes profundos sobre los manantiales termales, hay procesos de recarga controlados por la topografía que renuevan los fluidos de los sistemas geotermales ubicados en la Zona Volcánica Sur en la actualidad (Pérez-Moreno et al. 2021). La dirección principal del flujo de agua subterránea debería ser desde cotas más elevadas a cotas más bajas. Sin embargo, la presencia de fallas genera una alta heterogeneidad en el sistema hidrogeológico, produciendo que los flujos de agua subterránea sean más complejos que solo seguir la topografía. Lo anterior

se debe a que las fallas se pueden comportar tanto como una barrera como un conductor para el flujo de agua subterránea. Para determinar dicho comportamiento es necesario un estudio hidrogeológico de detalle enfocado en el comportamiento hidráulico de fallas.

A partir de este análisis, se puede inferir que, dada la presencia de manantiales termales relacionados espacialmente a las fallas geológicas de la zona, existe circulación de agua en la roca fracturada y que podría haber establecido un sistema de circulación de agua subterránea cuya relación con el lago no ha sido estudiada aún. La última afirmación se debe principalmente a que no se cuenta con estudios hidrogeológicos detallados en la zona, que contemplen geofísica, hidrogeoquímica, isotopía, hidrodinámica, entre otros.

3.4.2. Niveles piezométricos

Para el análisis de variabilidad temporal de los niveles piezométricos se consideraron los únicos 2 pozos de observación dentro del área que abarca las subcuencas de Río Allipén, Lago Villarrica y Toltén Alto, y Río Pucón (Figura 3.23): (i) Vivero Forestal Magasa en Cunco y (ii) Villarrica.

El pozo Vivero Forestal Magasa en Cunco (5686.709 mN; 238.604 mE) cuenta con 55 mediciones desde julio de 2013 a febrero de 2021 (Figura 3.24a). Estas mediciones son puntuales, se realizan de forma irregular en el tiempo y no se especifica si corresponde a nivel estático y dinámico. Los niveles medidos varían entre 3,47 a 8,10 m bajo el nivel de la superficie. De forma general se observa que los niveles son mínimos durante los meses de verano y otoño, mientras que son máximos durante los meses de invierno y primavera. El patrón observado se mantiene estable durante los años estudiados.

El pozo Villarrica (5647.756 mN; 220.355 mE) cuenta con 4 mediciones desde diciembre de 2019 a septiembre de 2020 que varían desde 23,48 a 25,03 m bajo el nivel de la superficie (Figura 3.24b). Dada la escasa cantidad de mediciones, no se pudo llevar a cabo un análisis más profundo.

Considerando que la distancia de ambos pozos al Lago Caburgua es mayor a 25 km, la información de niveles piezométricos no es representativa para un análisis adecuado de las aguas subterráneas relacionadas al Lago Caburgua.

3.5. Derechos de Aprovechamiento de Aguas

Antes de realizar el análisis es necesario precisar las definiciones de los Derechos de Aprovechamiento de Aguas según naturaleza, tipo de derecho, y ejercicio de derecho de acuerdo a la clasificación indicada por el Código de Aguas:

- Según naturaleza, estos pueden ser Superficiales o Subterráneos. Son de naturaleza superficial aquellos derechos provenientes de fuentes a la vista del ser humano, incluyendo corrientes (cauces naturales o artificiales), o detenidas (como lagos, lagunas, estanques o embalses). Son de naturaleza subterránea aquellos derechos que permiten la extracción de aguas ocultas en el seno de la tierra y no han sido alumbradas.
- Según tipo de derecho, estos pueden ser Consuntivos o No Consuntivos. Son derechos consuntivos aquellos que facultan a su titular consumir totalmente las aguas en cualquier actividad. Son derechos no consuntivos aquellos que permiten emplear el agua sin consumirla y se obliga al titular a restituirla en la forma que lo determine el acto de adquisición o de constitución del derecho.
- Según ejercicio de derechos, estos pueden clasificarse como Permanente o Eventual. Son derechos permanentes aquellos que facultan al titular para usar el agua en la dotación que corresponda. Son derechos eventuales aquellos que facultan al titular para usar el agua en las épocas en que el caudal de matriz tenga un sobrante después de abastecidos los derechos de ejercicio permanente y los de ejercicio eventual constituidos con anterioridad. Una vez definido lo anterior, estos derechos pueden ser Continuos, Discontinuos o Alternados. Son de ejercicio continuo aquellos derechos que permiten usar el agua en forma

ininterrumpida durante las 24 horas del día los 365 días del año. Los derechos discontinuos sólo permiten usar el agua durante determinados períodos. Por último, los derechos de ejercicio alternado son aquellos en que el uso de agua se distribuye entre dos o más personas que se turnan sucesivamente.

El análisis de derechos de agua se realizó utilizando la base de datos de *Derechos de Aprovechamiento de Aguas registrados* obtenido en la plataforma web de la Dirección General de Aguas (DGA). Para llevar a cabo este análisis se siguieron los siguientes pasos:

1. Filtro según tipo de derecho. Para el estudio solo se consideraron los derechos de otorgamiento *consuntivos*, puesto que estos representan el consumo total del caudal de agua solicitado sin restitución alguna.
2. Estandarización de unidades de caudal. Dada la variabilidad de unidades de caudal registrados por derecho (L/s, L/min, L/día, L/h, L/mes, m³/s, m³/año, Mm³/año, acciones, %) se estandarizaron las unidades a m³/s. Vale señalar que los derechos registrados en unidades de *acciones y porcentaje de acciones* fueron considerados únicamente si se indicaba la equivalencia en caudal, en caso contrario estos datos no fueron considerados.
3. Filtro espacial. Este paso se realizó para analizar únicamente los derechos ubicados dentro del área de interés. Para llevar a cabo este paso fue necesario estandarizar el datum de los derechos de otorgamiento de agua, ya que se encuentran registrados con distintos datum (WGS84-geográficas, PSAD56-UTM, SAD69-UTM, WGS84-UTM) y husos (18°S y 19°S). Entonces, se llevó a cabo una reproyección de los datos y re-cálculo de las nuevas coordenadas en QGIS v.3.18.3 considerando como datum estándar el WGS84-UTM19S. Vale señalar que aquellos datos que no contaban con registro de coordenadas no fueron considerados en este estudio. A pesar de lo anterior, para este estudio se consideró un solo Derecho de Aprovechamiento de Aguas sin coordenadas con Código de Expediente ND-0902-197, dado que el caudal solicitado (1,50 m³/s) se puede considerar importante respecto el caudal medido en el río Trafamupulli. Se estimó la ubicación del punto de captación utilizando el croquis presentado en el expediente. Adicionalmente, en el expediente se reporta al río Trafampulli como afluente del lago Colico.

Una vez que se filtraron los datos y se estandarizaron las unidades de caudal y espacial de los registros de Derechos de Aprovechamientos de Aguas, se llevó a cabo un análisis de variabilidad espaciotemporal y de naturaleza, considerando primero el área que abarca las subcuencas de río Allipén, Lago Villarrica y Toltén Alto, y río Pucón y luego el área correspondiente al Lago Caburgua (Figura 3.25). Se puede observar que los derechos superficiales se distribuyen de manera casi uniforme a lo largo del área considerada, mientras que los derechos subterráneos se concentran principalmente en la parte occidental del área (hacia la Depresión Central) y bordeando los ríos en los depósitos no consolidados. Además, se puede apreciar que al pasar el tiempo se han ido solicitando cada vez más derechos de agua consuntivos hacia las zonas más altas de las cuencas o en las nacientes de los ríos principales (Figura 3.26). Al analizar la variación temporal de los derechos de agua, se observa un claro dominio en la solicitud de los derechos de agua de naturaleza superficial en comparación a los de naturaleza subterránea (Figura 3.27). Al año 2021 de un total de 34,29 m³/s, 28,66 m³/s son de naturaleza superficial y 5,31 m³/s son de naturaleza subterránea, lo que equivale a un 83,58 % y 15,49 %, respectivamente. Si bien es notorio el dominio de derechos de naturaleza superficial, a partir del año 2008 se observa que incrementan las solicitudes de derechos de naturaleza subterránea con una tasa alrededor de 0,30 m³/s por año. Al comparar los Derechos de Aprovechamiento de Aguas otorgados, es decir las extracciones permitidas, con las precipitaciones históricas (Figura 3.3 de la sección 3.1.1), se deduce que este interés por el agua subterránea puede ser en respuesta a una disminución abrupta en las precipitaciones (ej.: ~ 35 % de disminución en el año 2007 respecto el 2006) y en los caudales de los ríos. Similar comportamiento se observa en el año 2017, donde los caudales subterráneos otorgados alcanzan los 0,81 m³/s coincidiendo con una abrupta disminución en las precipitaciones durante el año 2016 (similar a la registrada en 2007). Es importante señalar que el ejercicio de derechos de agua subterránea considerados es de tipo permanente y continuo, por lo que es una extracción o salida de agua permanente del sistema hidrogeológico de la zona.

Respecto al área de estudio (Figura 3.28), se consideran los caudales de extracción que inciden directamente en el balance del Lago Caburgua, es decir aquellos Derechos de Aprovechamientos de Aguas otorgado dentro

de la cuenca aportante del Lago Caburgua (obtenida procesamiento ráster de un modelo de elevación digital Alos Palsar). A la fecha (diciembre de 2021) se ha otorgado un total de 2,75 m³/s, de los cuales 99,82 % de los derechos son de naturaleza superficial (Figura 3.29). 2,49 m³/s, equivalente a 90,36 % del total de derechos otorgados, son de ejercicio de derecho Eventual (incluyendo continuo y discontinuo), lo que quiere decir que solo se faculta su uso cuando hay un sobrante después de abastecer los derechos de ejercicio permanente. Lo anterior se traduce en que se pueden utilizar 2,49 m³/s una vez que se haya abastecido los derechos permanentes otorgados en la cuenca que son equivalentes a 0,27 m³/s. Además, se puede apreciar que de manera general los derechos de agua otorgados se encuentran distribuidos alrededor del lago. Sin embargo, también se observa que existen concentraciones de derechos otorgados de tipo consuntivo al norte del área, en la parte alta del río Blanco y del río Trafampulli, con caudales de hasta 1,50 m³/s (Figura 3.28).

Al no existir estaciones fluviométricas sobre ambos ríos, es decir, registros históricos caudales, se procedió a estimar de manera simplificada los caudales medios para ambas cuencas, considerando la expresión:

$$Q_m = A P C_e \quad (3.1)$$

donde Q_m es caudal medio del río, A es el área de la cuenca, P precipitación media anual sobre la cuenca (desde 1979 a 2021) y C_e el coeficiente adimensional de escorrentía. En la Tabla 3.11 se presentan las área de influencia de las estaciones de precipitación sobre las cuencas de los ríos Blanco y Trafampulli, A_T representa el área de influencia de la estación Lago Tinquillo y A_{Tr} es el área de influencia de la estación Tricauco, P_m es la precipitación ponderada media en la cuenca ponderada por el área de influencia y Q_m es el caudal medio de la cuenca. Considerando un coeficiente de escorrentía de 0,65, los porcentajes de caudales otorgados en los Derechos de Aprovechamiento de Aguas sobre el río Blanco y río Trafampulli equivalen a 1,58 % y 98,89 % del caudal medio de ambos ríos, respectivamente. Si bien no es posible determinar de manera precisa el total de caudal relacionado a las extracciones existentes, el aporte de agua desde ambos ríos al lago se verá disminuido por tales extracciones. Para obtener valores reales, se recomienda instalar estaciones fluviométricas en ambos ríos y monitorear las extracciones efectivas (ver sección de Recomendaciones).

Tabla 3.11: Estimación de los caudales medios sobre los ríos Blanco y Trafampulli, y caudales de Derechos de Aprovechamiento de Aguas otorgados en ambos ríos y su respectivo porcentaje. Fuente: Elaboración propia.

Corriente	A_T [km ²]	A_{Tr} [km ²]	P_m [MM]	Q_m [m ³ /s]	Q_{DAA} [m ³ /s]	% Otorgamiento
Trafampulli	43		2.658,4	2,36	3,33	98,89
Blanco	148,4	16,3	2065,6	8,85	0,14	1,58

De los derechos mencionados anteriormente, se examinarán 4 de ellos tanto por los caudales otorgados como por la historia detrás de la solicitud. Estos se encuentran ubicados en la parte alta del río Trafampulli, con código de expediente: *ND* – 0902 – 197, *VT* – 0902 – 528, *ND* – 0902 – 801670, y *ND* – 0902 – 801669.

El primero, de código *ND* – 0902 – 197, corresponde a un derecho inscrito el año 1995, el cual es de tipo consuntivo, de naturaleza superficial, de ejercicio de derecho Eventual y Continuo, y de 1,50 m³/s de caudal. Este derecho fue solicitado por el agricultor don Hernán Montenegro Pereira, sin especificar su uso, para extraer agua desde el río Trafampulli aguas arriba del sector Puerto Negro. Don Hernán realizó la solicitud el año 1988, pero con ejercicio de derecho Permanente y Continuo. Ante esta solicitud, doña Sonia García González presentó una oposición el mismo año indicando que el caudal del Río Trafampulli es menor al caudal solicitado. Por lo anterior, en enero y marzo de 1989 se realizaron aforos al río 100 m aguas arriba de donde se había solicitado, y se midieron caudales de 0,93 m³/s y 0,59 m³/s, respectivamente. Es decir, en 1989 el caudal del río Trafampulli era menor al solicitado por don Hernán Montenegro Pereira. En 1991 se niega la solicitud a don Hernán y en 1992 la DGA propone que el ejercicio de derecho sea Eventual en lugar de permanente, la cual es aceptada por don Hernán. A partir de un balance hídrico por precipitaciones realizado en 1993, se estima que el caudal del río Trafampulli debe ser de 4,90 m³/s y, en consecuencia, en 1994 la DGA Regional indica que no hay daño ecológico al otorgar los derechos solicitados por don Hernán. Luego, el año 1994 se presentó un informe técnico (DRA/N informe n°206) para establecer el caudal ecológico equivalente al 15 %

del caudal del río Trafampulli. El caudal para diciembre es de 2,40 m³/s, enero es de 1,50 m³/s, febrero es de 1,30 m³/s, marzo es de 1,20 m³/s y abril es de 1,20 m³/s, equivalentes a un caudal ecológico de 1,90 m³/s, 1,00 m³/s, 0,80 m³/s, 0,70 m³/s y 0,70 m³/s, respectivamente. Finalmente en enero de 1995 se otorga el derecho solicitado a don Hernán Montenegro Pereira.

Vale señalar que los derechos otorgados a lo largo del río Trafampulli que son de ejercicio Eventual fueron solicitados posterior a 1994, y aquellos de ejercicio permanente suman un caudal total de 0,25 m³/s correspondiente a un 16,45% del caudal solicitado por don Hernán. Si bien el Derecho de Aprovechamiento de Aguas otorgado por la Dirección General de Aguas a don Hernán Montenegro Pereira es de ejercicio de derecho Eventual y Continuo, en la práctica, si lo permite el caudal del río, él puede utilizar de manera permanente un caudal aproximado de 1,25 m³/s de agua proveniente del río Trafampulli, valor que debería disminuir durante períodos secos.

El segundo, de código *VT* – 0902 – 528, corresponde a un derecho inscrito el año 2017, el cual es de tipo consuntivo, de naturaleza superficial, de ejercicio de derecho Eventual y Discontinuo, y de caudal promedio anual equivalente a 0,24 m³/s. Este derecho fue solicitado por la empresa Nevados del Caburgua S.A. para extraer agua desde la naciente del río Trafampulli y usarla en la generación de energía hidroeléctrica.

El tercero, de código *ND* – 0902 – 801670, corresponde a un derecho inscrito el año 2021, el cual es de tipo consuntivo, de naturaleza superficial, de ejercicio de derecho Eventual y Discontinuo, y de caudal promedio anual equivalente a 0,10 m³/s. Este derecho fue solicitado por la empresa Energía La Cumbre SPA para extraer agua desde la parta alta del Río Trafampulli sin especificar su uso.

El cuarto, de código *ND* – 0902 – 801669, corresponde a un derecho inscrito el año 2021, el cual es de tipo consuntivo, de naturaleza superficial, de ejercicio de derecho Eventual y Discontinuo, y de caudal promedio anual equivalente a 0,40 m³/s. Este derecho fue solicitado por la empresa Energía La Cumbre SPA para extraer agua desde la parta alta del río Trafampulli sin especificar su uso.

Es importante señalar que al extraer agua desde la parte alta del río Trafampull, disminuye el caudal del río aguas abajo, afectando las entradas permanentes e intermitentes tanto superficiales como subterráneas al Lago Caburgua. Los cambios que se generan en las aguas superficiales pueden dar lugar a cambios en las entradas subterráneas, ya que puede disminuir recarga potencial a consecuencia de cambios en la infiltración.

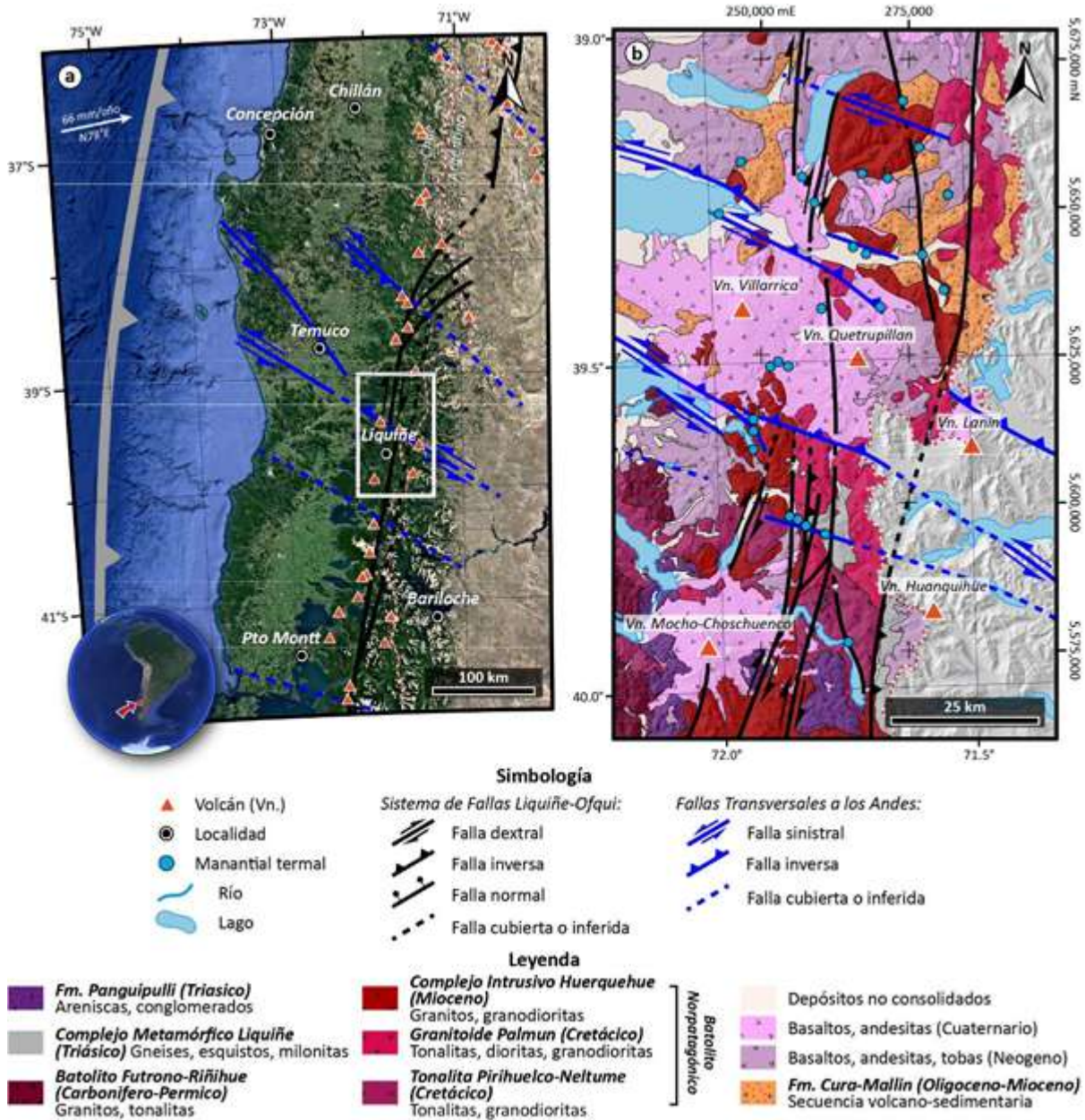
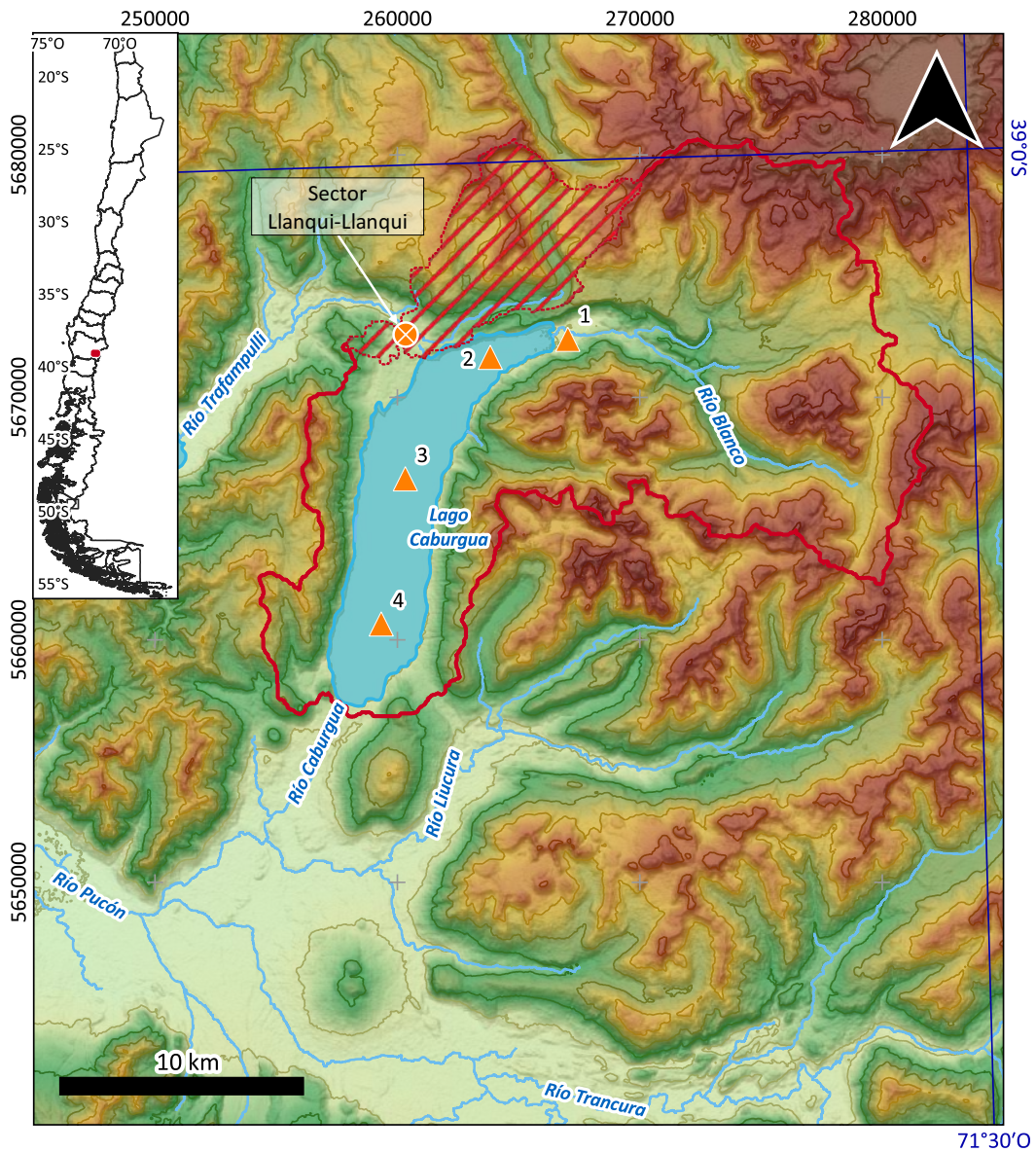


Figura 3.20: a) Rasgos tectónicos principales de la Zona Volcánica Sur mostrando el Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui (líneas negras) y las Fallas Transversales a los Andes (líneas azules). La flecha blanca representa el vector de convergencia entre la Placa Nazca y la Placa Sudamericana (Angermann et al. 1999). b) Mapa geológico regional del área de estudio mostrando la relación espacial entre los volcanes y manantiales termales respecto a los sistemas de fallas mayores. La información litológica y estructural está basada en los siguientes trabajos: (Rosenau et al. 2006, Lara and Moreno 2008, Held et al. 2016, Kapinos et al. 2016, Pérez-Flores et al. 2016, Sielfeld et al. 2019). Figura modificada de (Daniele et al. 2020). Datum: WGS84-UTM19S.



Simbología

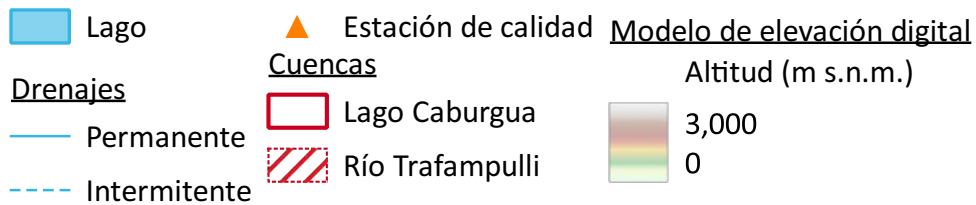


Figura 3.21: Distribución espacial de las estaciones de monitoreo de calidad de agua en el área del Lago Caburgua. Elaboración propia con datos tomados del *Inventario Público de Información Hidrológica y Meteorológica* de la Dirección General de Aguas. 1: Lago Caburgua en río Blanco, 2: Lago Caburgua Sector Norte, 3: Lago Caburgua Sector Centro, 4: Lago Caburgua en Sector Desagüe. Datum: WGS84-UTM19S.

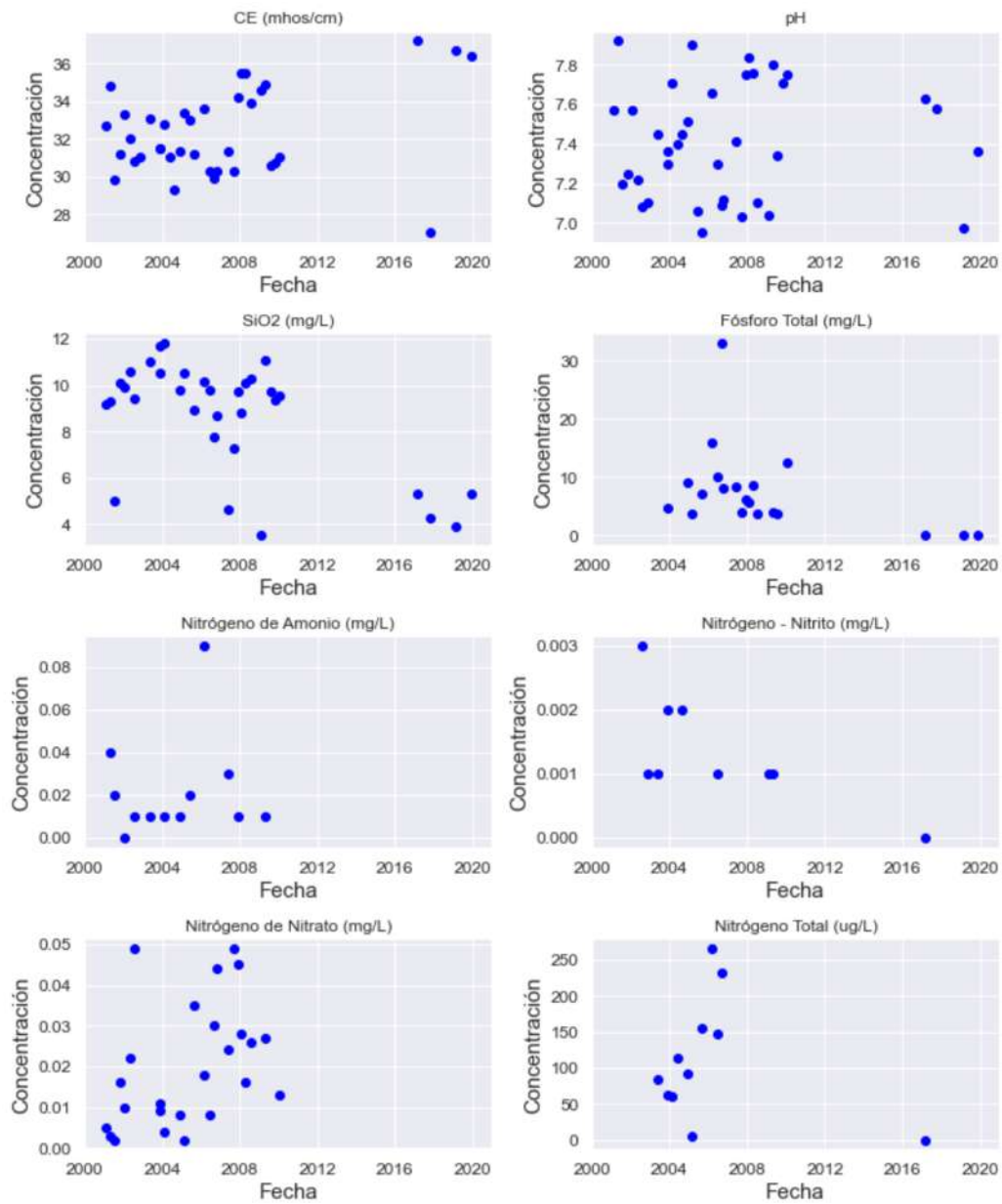
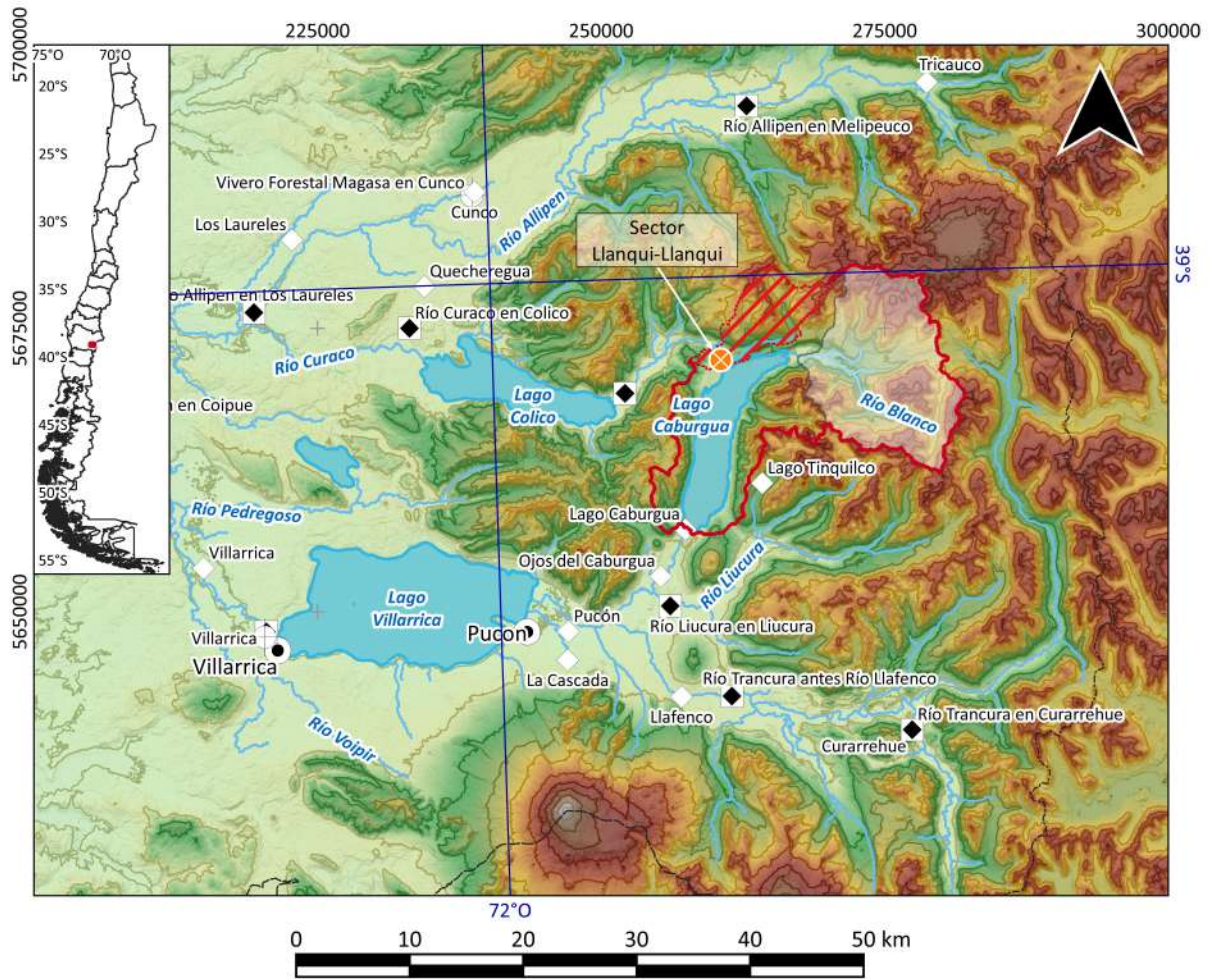


Figura 3.22: Variación temporal de los parámetros medidos en la estación de calidad Lago Caburgua en Sector Centro. Fuente: Elaboración propia con datos tomados del *Inventario Público de Información Hidrológica y Meteorológica* de la Dirección General de Aguas.



Simbología

● Capital comunal	■ Lago	<u>Cuencas</u>	<u>Modelo de elevación digital</u>
□ Límite regional	<u>Estaciones de monitoreo</u>	■ Lago Caburgua	Altitud (m s.n.m.)
<u>Drenajes</u>	◇ Meteorológica	□ Río Blanco	■ 3,000
— Permanente	◆ Fluiométrica	▨ Río Trafampulli	■ 0
- - - Intermitente	⊕ Pozo		

Figura 3.23: Distribución espacial de las estaciones de monitoreo ubicadas dentro del área que abarca las subcuencas de Río Allipén, Lago Villarrica y Toltén Alto, y Río Pucón. 1: Curarrehue, 2: Pucón, 3: Lago Caburgua, 4: Puesto, 5: Villarrica, 6: Los Laureles, 7: Llafenco, 8: Río Trancura en Curarrehue, 9: Río Liucura en Liucura, 10: Río Toltén en Villarrica, 11: Río Allipén en Los Laureles, 12: Vivero Forestal Magasa en Cunco, 13: Villarrica. Datum: WGS84-UTM19S

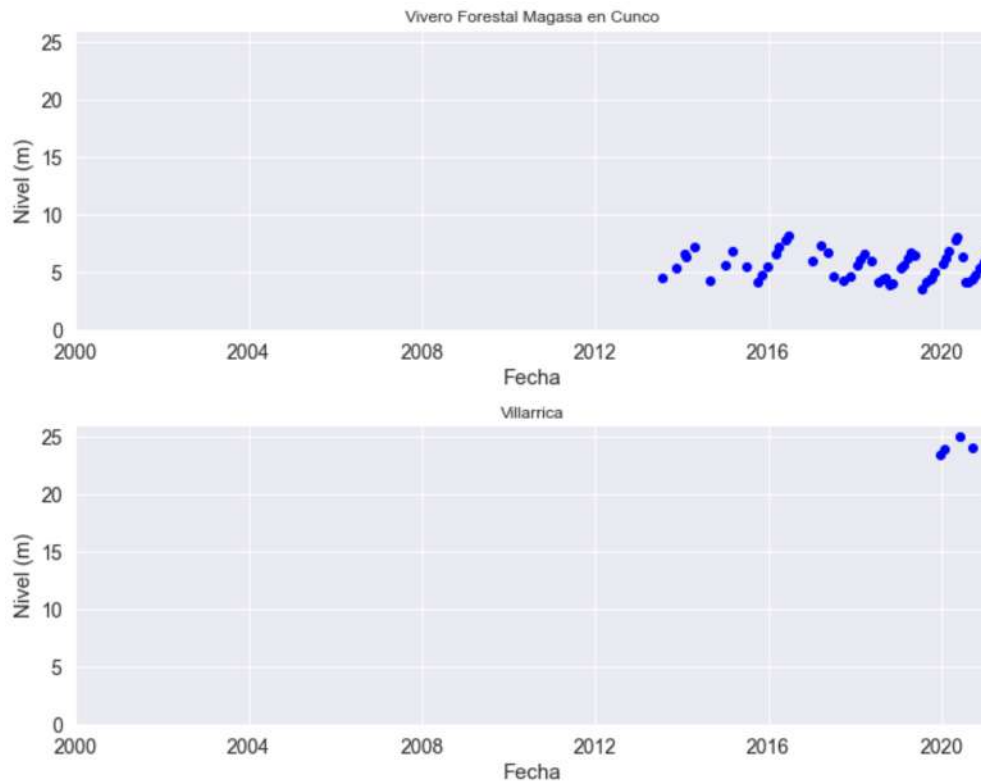
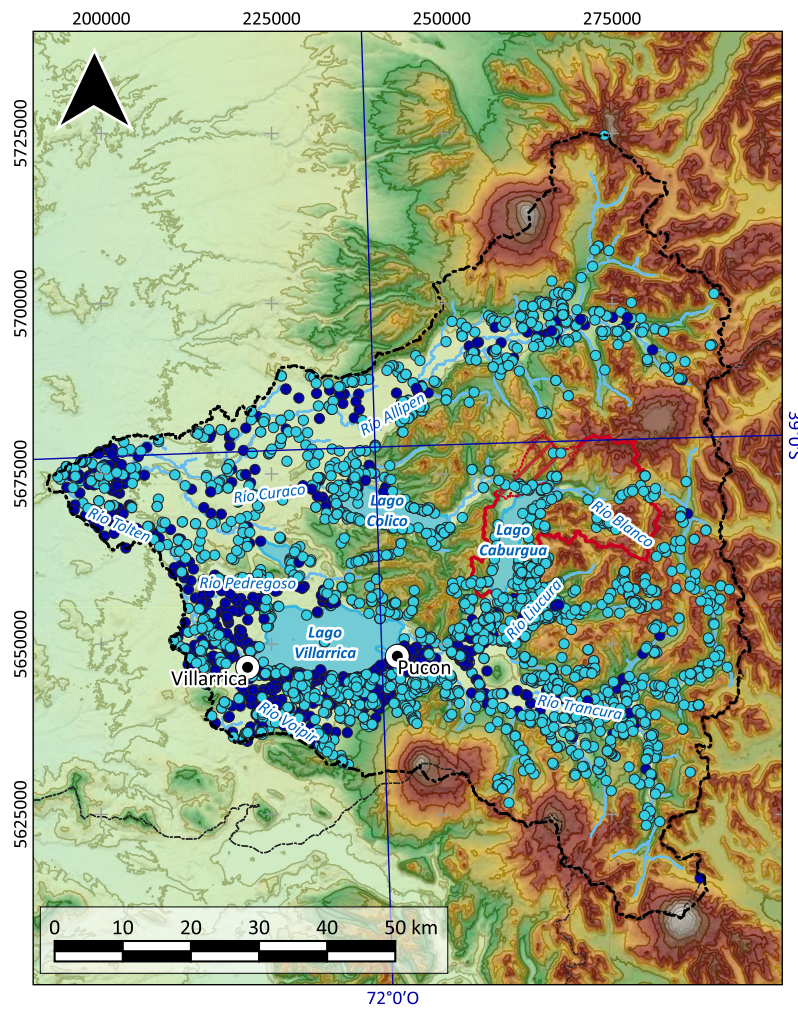


Figura 3.24: Variación temporal de los niveles piezométricos medidos en los pozos de observación: a) Vivero Forestal Magasa en Cunco, b) Villarrica. Fuente: Elaboración propia con datos tomados *Inventario Público de Información Hidrológica y Meteorológica* de la Dirección General de Aguas (<https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>). Datum WGS84-UTM19S.



Simbología

- | | |
|------------------------|---|
| ● Localidad | <u>Derechos de Aprovechamiento de Aguas</u> |
| ■ Lago | ● Subterráneo |
| <u>Red de drenajes</u> | ● Superficial |
| — Permanente | <u>Modelo de elevación digital</u> |
| - - - Intermitente | Altitud (m s.n.m.) |
| Cuencas | ■ 3,000 |
| ■ Lago Caburgua | ■ 0 |
| ▨ Río Trafampulli | ▭ Límite regional |
| | ▭ Cuenca hidrográfica |

Figura 3.25: Distribución espacial de los derechos de agua consuntivos según naturaleza (subterráneo y superficial) para el área que abarca las subcuencas de Río Allipén, Lago Villarrica y Toltén Alto, y Río Pucón. Fuente: Elaboración propia utilizando los datos obtenidos de la plataforma web de la Dirección General de Aguas (DGA). Datum: WGS84-UTM19S.

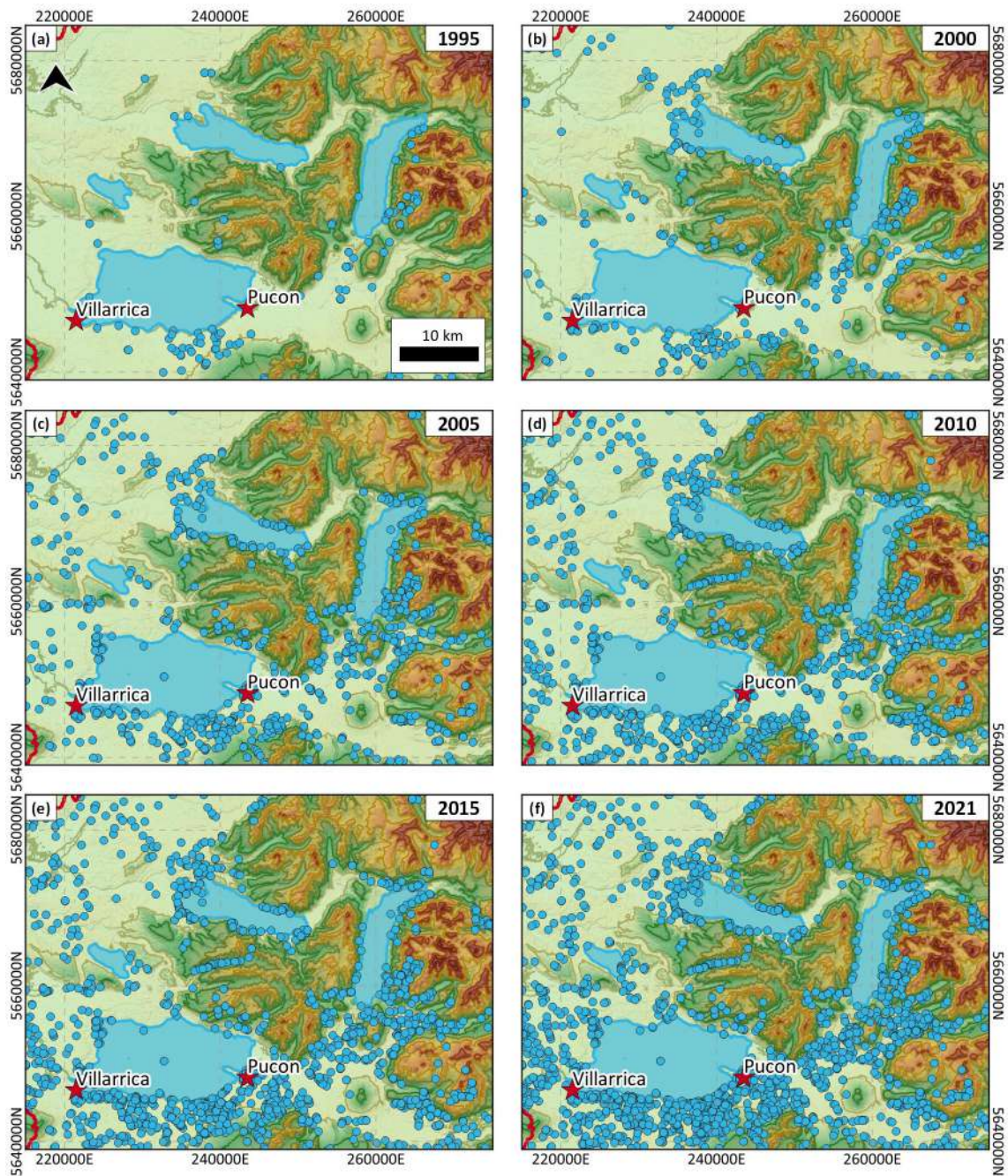


Figura 3.26: Evolución temporal y espacial del otorgamiento de Derechos de Aprovechamiento de Agua tipo consuntivos (circulo celeste). Fuente: Elaboración propia utilizando los datos obtenidos de la plataforma web de la Dirección General de Aguas (DGA). Datum: WGS84-UTM19S.

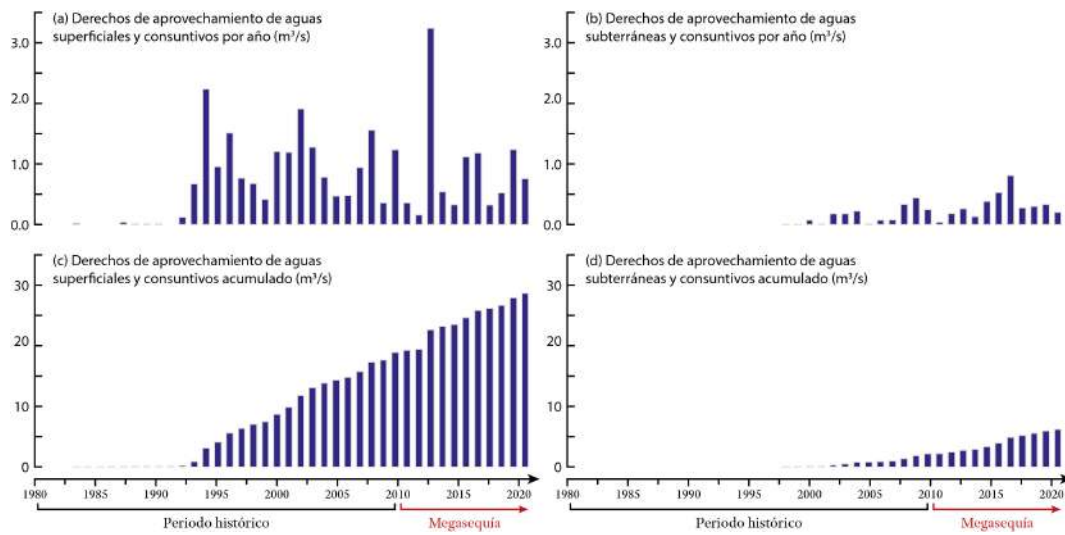
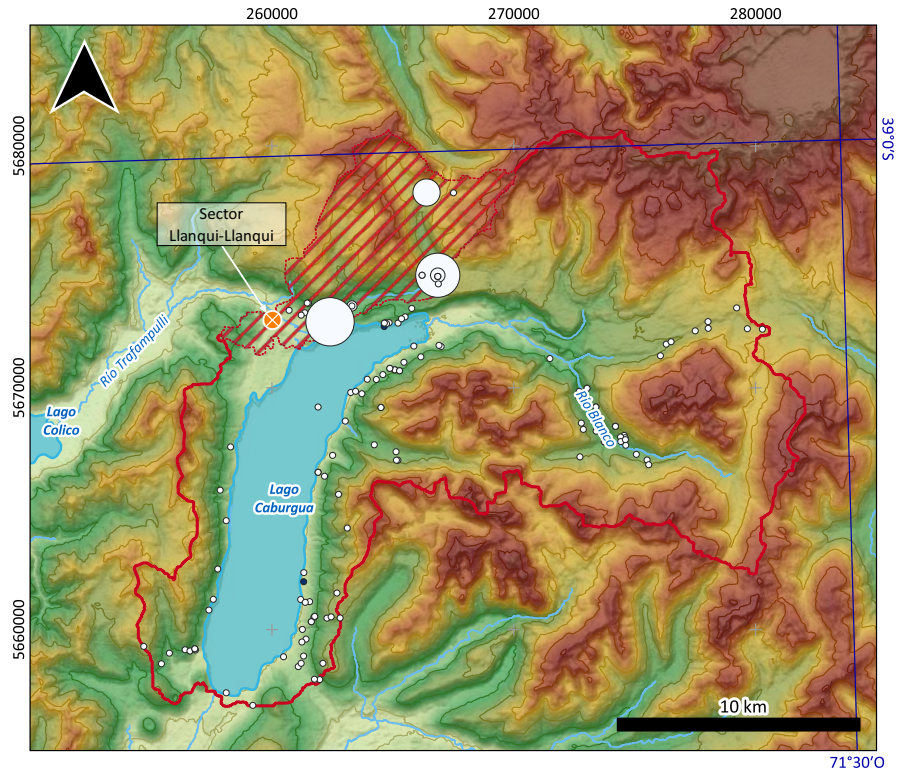


Figura 3.27: Variación temporal del otorgamiento de derechos consuntivos de agua en m^3/s para el área que abarca las subcuencas de río Allipén, Lago Villarrica y Toltén Alto, y Río Pucón. Fuente: Elaboración propia utilizando los datos obtenidos de la plataforma web de la Dirección General de Aguas (DGA).



71°30'0

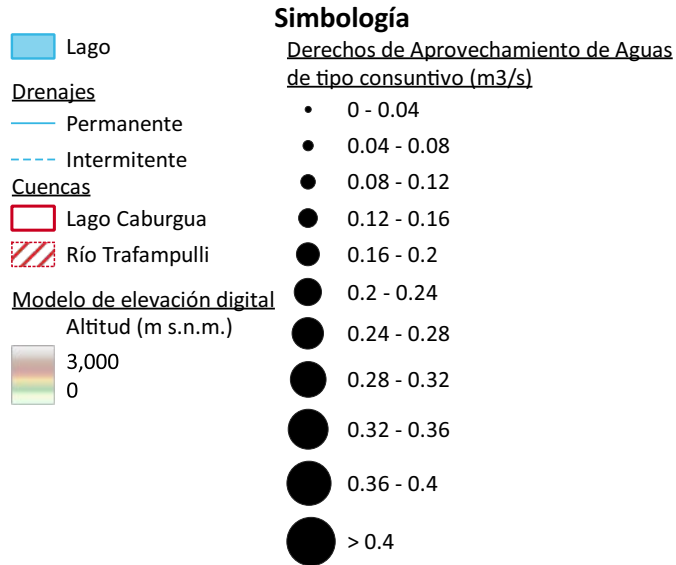


Figura 3.28: Distribución espacial de los derechos de agua consuntivos en m³/s para el área del Lago Caburgua según naturaleza: Subterráneo en azul y superficial en blanco. Fuente: Elaboración propia utilizando los datos obtenidos de la plataforma web de la Dirección General de Aguas (DGA). Datum: WGS84-UTM19S.

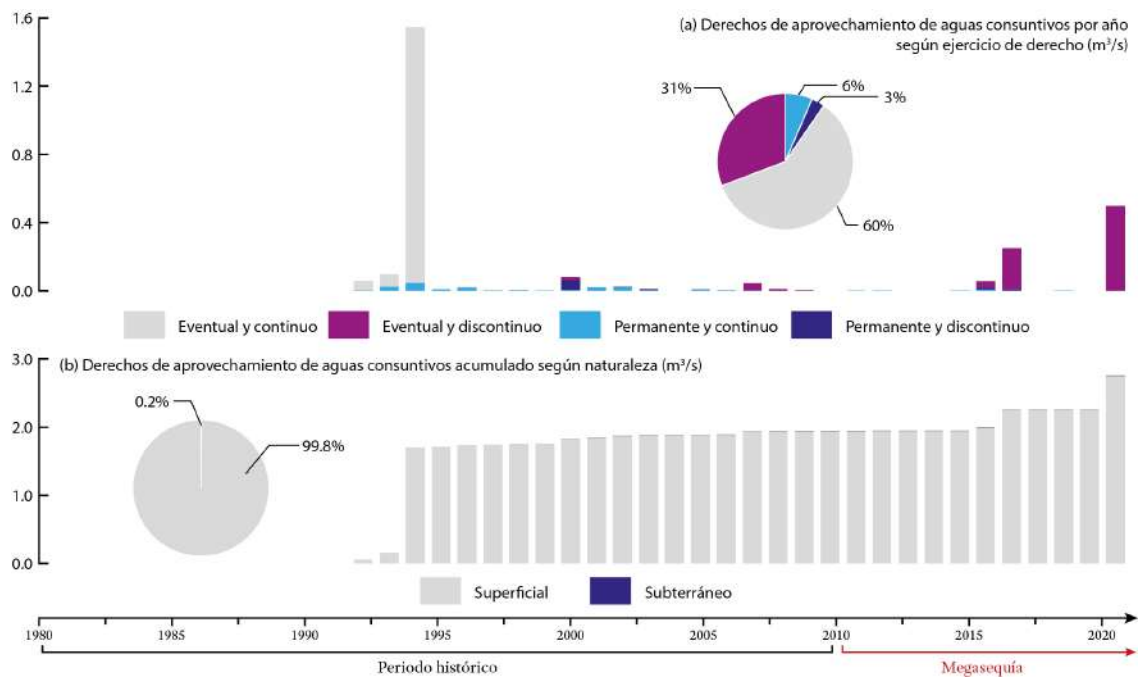


Figura 3.29: Variación temporal del otorgamiento de derechos consuntivos de agua en m³/s para el área del Lago Caburgua. Fuente: Elaboración propia utilizando los datos obtenidos de la plataforma web de la Dirección General de Aguas (DGA).

4. Análisis multitemporal de cobertura de nieve y cuerpos de agua

El análisis multitemporal de nieve y cuerpos de agua se realizó con imágenes satelitales de los productos Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8. No se consideró el producto satelital Sentinel 2 dado que tiene una menor longitud de registros que la de los productos satelitales Landsat. Se utilizó el índice normalizado *Normalized Difference Snow Index (NDSI)* para la detección de nieve en la cuenca del lago Caburgua. Las imágenes satelitales analizadas consideran el período de invierno para la cobertura de nieve y verano para el área del lago. La adquisición de las imágenes satelitales se hizo a través del servidor Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos¹.

Para el análisis de las imágenes satelitales se consideró la reclasificación de coberturas por medio de entrenamiento supervisado de firmas espectrales y, además, los índices normalizados NDSI para la cobertura nival y NDVI para cuerpos de agua. Los índices espectrales se obtienen a partir de operaciones algebraicas entre bandas espectrales y el resultado permite obtener una imagen en la cual se resaltan los píxeles relacionados con vegetación, agua, nieve u otro, según sea el índice considerado.

El índice NDSI, es un indicador que muestra la cobertura de nieve en áreas terrestres. Considera las bandas espectrales verde y de infrarrojos de onda corta (SWIR) para trazar la cubierta de nieve sobre un área. La nieve absorbe la mayor parte de la radiación incidente en el SWIR, mientras que, las nubes no lo hacen, esto permite a NDSI distinguir la nieve de las nubes.

$$NDSI = \frac{B_{verde} - B_{SWIR}}{B_{verde} + B_{SWIR}} \quad (4.1)$$

El índice NDVI, es un índice sensible a la cobertura vegetal. Considera las bandas espectrales roja e infrarrojo cercano.

$$NDVI = \frac{B_{rojo} - B_{NIR}}{B_{rojo} + B_{NIR}} \quad (4.2)$$

4.1. Cobertura nival

Para el análisis del área de la cobertura nival se consideraron 18 años imágenes satelitales, el período analizado fue entre 1998 y 2021. Sin embargo, para los años 2000, 2002, 2003, 2005, 2008 y 2012, no se encontraron imágenes satelitales del mes de agosto de buena calidad y por esta razón estos años no fueron considerados en el análisis de cobertura nival. Es importante resaltar que el mes de agosto fue considerado para el análisis dado que es cuando se genera la mayor acumulación de nieve en la cordillera y además se encontró menor presencia de nubes en las imágenes, sin embargo, es recomendable hacer este análisis con una mayor cantidad de imágenes satelitales por año, de esta forma se puede evaluar la dinámica de la cobertura nival a una mayor resolución temporal.

Por otra parte, la Figura 4.1 presenta la evolución temporal de la cobertura nival en la cuenca del lago Caburgua para los años 1999, 2006, 2009 y 2020. El sombreado blanco representa la cuenca del río Blanco, el sombreado azul la cuenca del río Trafampulli y el polígono rojo la cuenca del Lago Caburgua. En la figura se observa una disminución del área nival respecto a 1999, sin embargo, este comportamiento no es representativo de la dinámica de la cobertura nival, ya que considerar solo una imagen al año no es suficiente para concluir sobre la evolución temporal de la cobertura de nieve. La Figura 4.2 presenta la variación temporal de la

¹<https://earthexplorer.usgs.gov/>

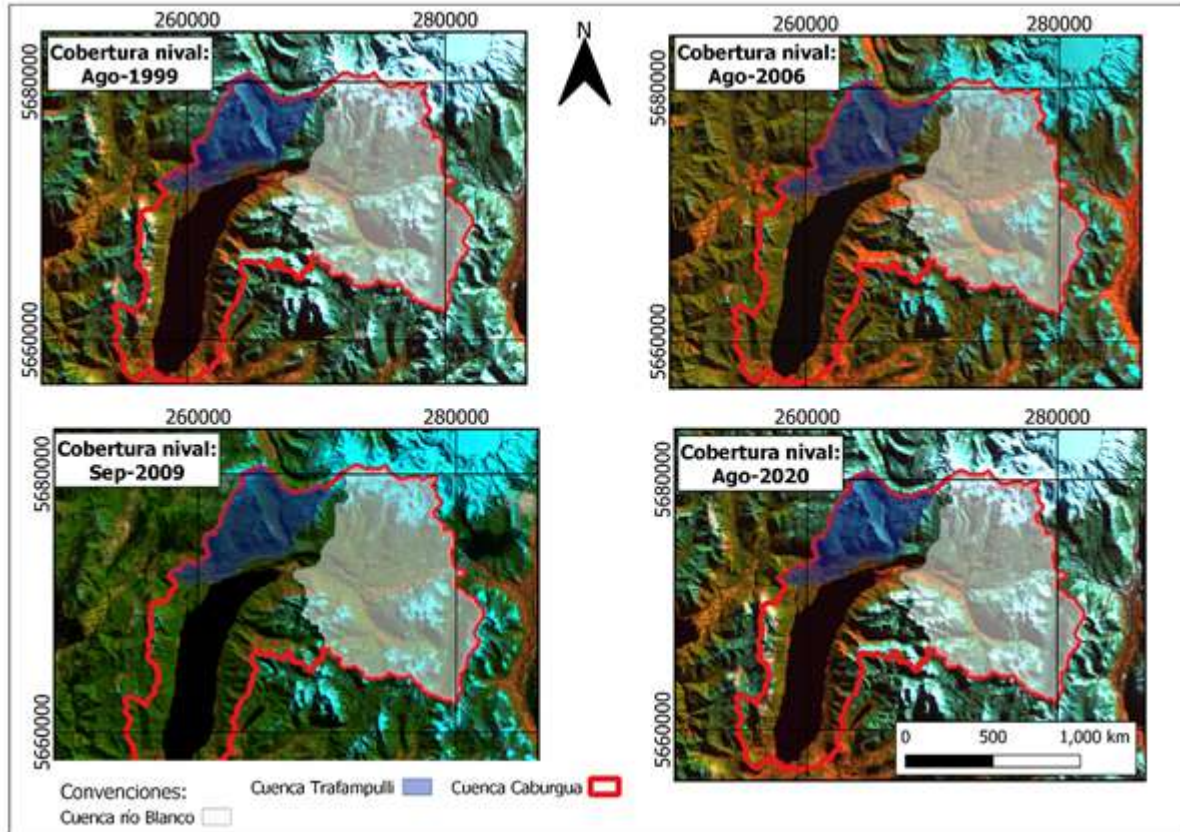


Figura 4.1: Variación temporal de la cobertura nivel sobre la cuenca del lago Caburgua. Fuente: Elaboración propia utilizando imágenes Landsat 8. Datum: WGS84-UTM19S.

cobertura nival sobre la cuenca para los 18 años considerados en el análisis. La serie muestra un incremento de la superficie nival en los últimos dos años, mientras que, para el período 2001-2018 el promedio del área nival fue de 32 km². Sin embargo, el incremento de nieve de los últimos dos años no implicaría una acumulación de nieve por períodos largos de tiempo.

El área nival de la cuenca y el nivel del agua del lago Caburgua se analizaron simultáneamente en la Figura 4.3. La figura doble eje presenta en negro el nivel del lago, eje vertical izquierdo, y en azul área de la nieve, eje vertical derecho. Se puede observar que no existe una relación clara entre la disminución del nivel del lago y la variación de la cobertura nival.

4.2. Cuerpos de agua

El análisis del área del espejo de agua se realizó para el lago Caburgua, Colico y Villarrica. Se consideraron imágenes del mes de marzo ya que son representativas para analizar el tamaño del lago en verano, por ser época de estiaje. Se utilizaron las combinaciones de bandas 432 para Landsat 7 (desde 1998 a 2013) y 543 para Landsat 8 (de 2014 a 2021), resultante en una imagen infrarroja, ya que permite un mayor contraste entre el área del lago y el terreno aledaño. Por un lado, la Figura 4.4 presenta la evolución temporal de los espejos de agua para el mes de marzo en algunos años representativos. Por otro lado, la Tabla 4.1 presenta el resumen de las áreas de los espejos de aguas en el tiempo, para imágenes desde 1998 hasta 2021.

La Figura 4.5a muestra una comparación entre las áreas de los espejos de agua de los Lagos Caburgua y

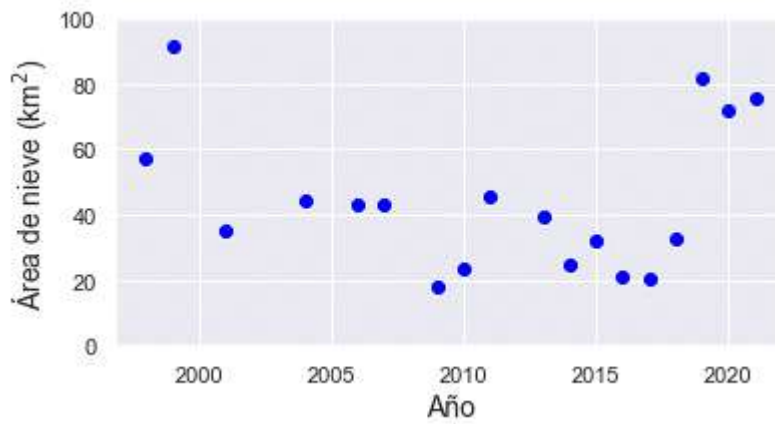


Figura 4.2: Cobertura nivel sobre la cuenca del lago Caburgua. Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos del procesamiento de imágenes LandSat.

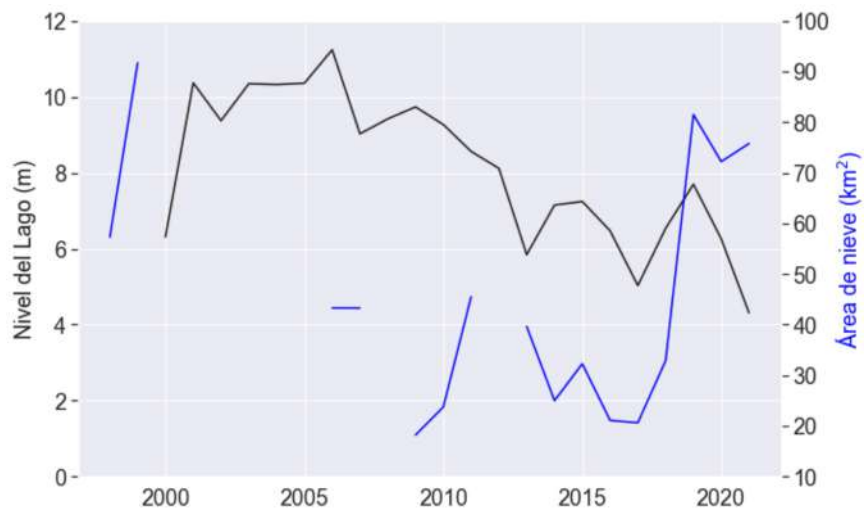


Figura 4.3: Variación temporal del nivel del lago Caburgua y del área de nieve en la cuenca. Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos del procesamiento de imágenes LandSat y de niveles suministrados por la Dirección General de Aguas.

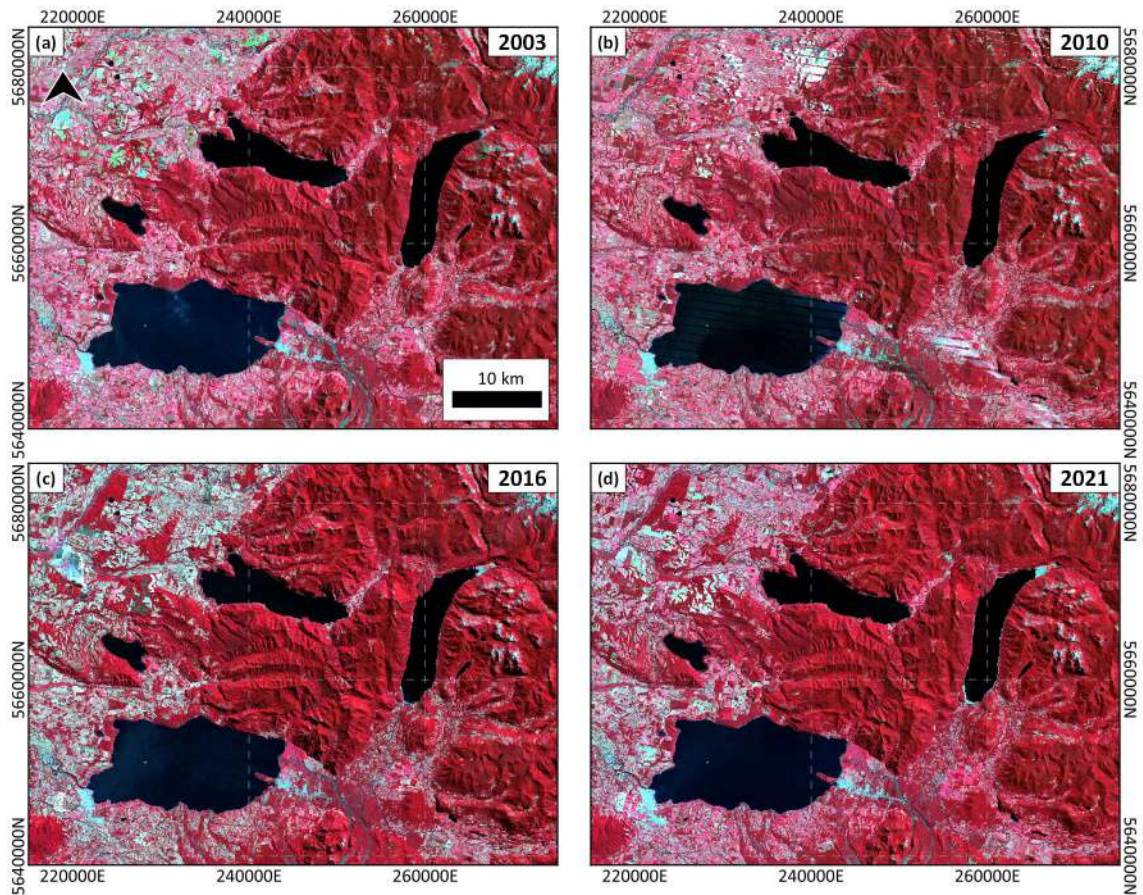


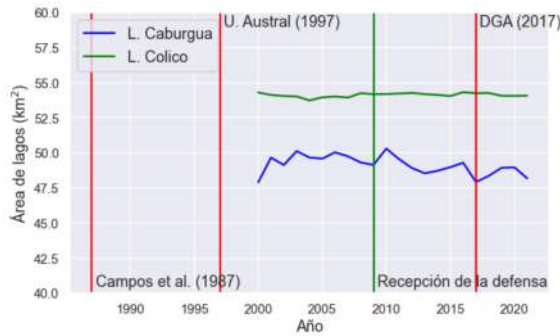
Figura 4.4: Imágenes Landsat (infrarrojo) mostrando la variación anual de la superficie de los lagos. Fuente: Elaboración propia.

Colico, la línea verde representa el año en el que la obra de defensa ribereña sobre margen izquierda del río Trafampulli, fue recepcionada por la DGA y las líneas rojas representan los años en los cuales se han realizado estudios que contienen información sobre el Lago Caburgua. La Figura 4.5b presenta la evolución temporal del espejo de agua del Lago Villarrica. De acuerdo con la Figura 4.5, los lagos Villarrica y Colico tienen un área del espejo de agua aproximadamente constante a lo largo del tiempo. Mientras que, el Lago Caburgua presenta fluctuaciones de nivel de más de un metro en un período de tiempo corto (Figura 4.5a).

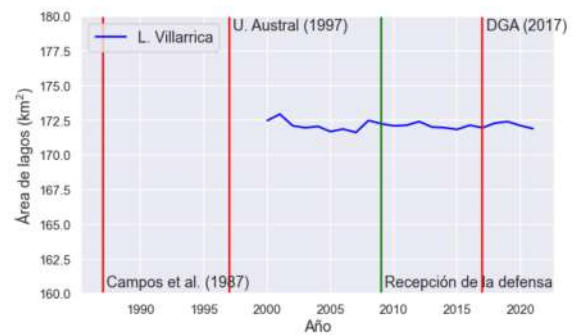
Las variaciones más notorias en el área se observan en el Lago Caburgua y esto podría estar asociado a la topografía de la zona aledaña al lago (mayor pendiente). Al analizar en detalle la serie temporal del Lago Caburgua, y comparar con las variables hidroclimáticas y derechos de agua (Figura 4.6), se observa que entre 1998 y el 2010 la superficie varía principalmente de acuerdo con las precipitaciones, mostrando áreas menores en años con precipitaciones menores y recuperando rápidamente su superficie ante años húmedos. Sin embargo, a partir del año 2010, la disminución del área del lago es progresiva a una tasa de $0,19 \text{ km}^2$ por año, lo cual coincide principalmente con la disminución progresiva en las precipitaciones (Megasequía) y, en menor grado, con un aumento en el otorgamiento de derechos de agua consuntivos (Figura 4.6).

Tabla 4.1: Áreas de espejos de agua para los lagos Caburgua, Colico y Villarrica calculadas a partir del procesamiento de imágenes satelitales. Fuente: Elaboración propia utilizando imágenes Landsat 8. Datum: WGS84-UTM19S.

Fecha	Áreas [km ²]			Fecha	Áreas [km ²]		
	Caburgua	Colico	Villarrica		Caburgua	Colico	Villarrica
03-04-1998	49,517	54,236	172,73	22-01-2010	50,305	54,188	172,106
26-02-1999	-	-	-	26-02-2011	49,543	54,224	172,143
31-03-2000	47,897	54,299	172,49	17-04-2012	48,918	54,267	172,415
18-03-2001	49,659	54,125	172,944	03-03-2013	48,539	54,181	172,025
05-03-2002	49,128	54,049	172,116	10-02-2014	48,718	54,127	171,972
20-02-2003	50,122	54,018	171,966	13-02-2015	48,980	54,049	171,849
10-03-2004	49,663	53,731	172,067	19-03-2016	49,291	54,318	172,148
25-02-2005	49,581	53,952	171,692	06-03-2017	47,918	54,242	171,971
27-01-2006	50,039	54,013	171,875	25-03-2018	48,356	54,262	172,303
03-03-2007	49,748	53,936	171,629	24-02-2019	48,935	54,067	172,411
21-03-2008	49,31	54,251	172,492	14-03-2020	48,965	54,056	172,128
24-03-2009	49,141	54,178	172,261	01-03-2021	48,179	54,077	171,902



(a) Área de los lagos lago Caburgua y Colico durante el mes de Marzo. Fuente: Elaboración propia.



(b) Área del Villarrica durante el mes de Marzo. Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.5: Variación temporal de la superficie de los lagos presentes en el área de estudio.

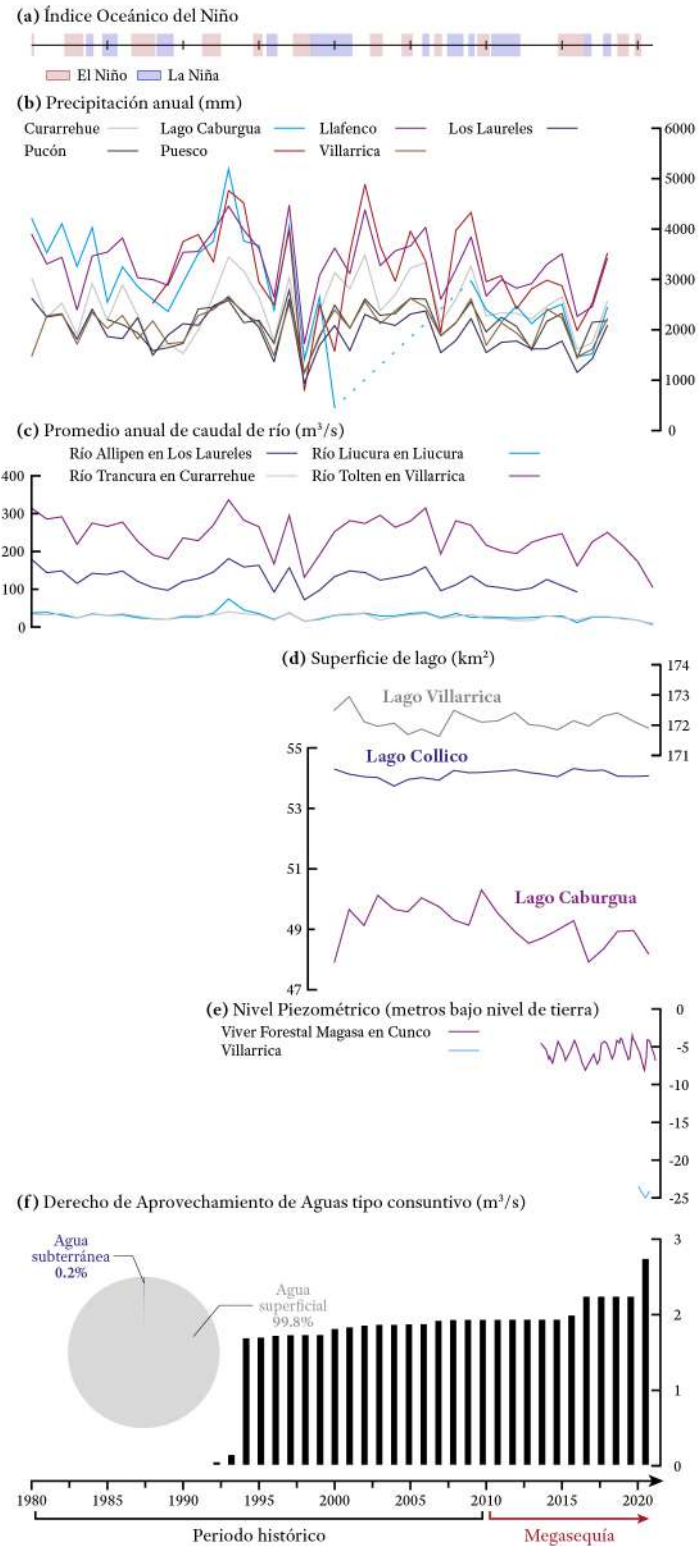


Figura 4.6: Resumen de la evolución temporal de los derechos de aprovechamientos de agua consuntivos acumulados para el área del Lago Caburgua en comparación con las variables hidroclimáticas. Fuente: Elaboración propia.

5. Modelo Conceptual

Un paso importante durante un estudio hidrológico e hidrogeológico es el desarrollo de un modelo conceptual, el cual se puede definir como:

- Una representación cualitativa y simplificada de la complejidad encontrada en un sistema hidrogeológico natural, que integra sus características más esenciales, y es la base para un modelo numérico (Gillespie et al. 2012)
- Una descripción de los factores naturales y antrópicos que gobiernan y contribuyen al movimiento del agua subterránea en el subsuelo (Kresic and Mikszewski 2012).
- Una representación cualitativa del sistema de agua subterránea que se ajusta a los principios hidrogeológicos y se basa en información geológica, geofísica, hidrológica, hidrogeoquímica, hidráulica y cualquier otra información auxiliar. A menudo se considera como una *representación pictórica del sistema de flujo de agua subterránea, frecuentemente en forma de diagrama de bloques o sección transversal* y puede incluir una descripción de cómo el agua entra, fluye y sale de los sistemas hidrogeológicos (Anderson et al. 2015).
- Una representación que proporciona una descripción general sistemática e internamente coherente de los límites del sistema hidrogeológico, las propiedades y los procesos relevantes para responder una pregunta de investigación, reduciendo la brecha entre la caracterización hidrogeológica y el modelado de aguas subterráneas. A menudo se ve como una hipótesis o una combinación de hipótesis para los aspectos del sistema hidrogeológico que son relevantes para el objetivo del modelo (Enemark et al. 2019).

De esta forma, por medio de un modelo conceptual, que considera la información recopilada y analizada durante este estudio, se identifican las variables principales que participan en el balance hídrico del sistema hidrogeológico del Lago Caburgua y se describe el funcionamiento e interacción de dichas variables.

La Figura 5.1 muestra la interacciones superficiales y subterráneas existentes entre los 3 lagos presentes en el área (C: Lago Caburgua; Co: Lago Colico; V: Lago Villarrica). El río Blanco es la principal entrada de agua superficial del Lago Caburgua; si bien el río Trafampulli es afluente al Lago Colico, en el modelo conceptual este también aporta parcialmente al Lago Caburgua en el sector Llanqui-Llanqui, aporte que se constata a partir de la evidencia histórica de imágenes aéreas y otras de al menos la década de 1970. Existe un alto nivel de incertidumbre respecto a la magnitud de dicho aporte (previo a 2009), así como respecto a si su origen era natural o bien producto de la acción humana. El sector Llanqui-Llanqui es una zona de baja pendiente que se caracteriza por la presencia de un humedal perenne de aproximadamente 0,16 km². De lo anterior, se infiere que existe un aporte de agua subterránea desde el río Trafampulli hacia el humedal, que es alimentado por flujos subsuperficiales que saturan los poros del suelo. El Lago Caburgua desagua, actualmente, de manera subterránea al río Caburgua, un tributario del río Liucura que es afluente del río Pucón, y que finalmente descarga de forma permanentemente al Lago Villarrica. Por último, la información topográfica disponible (Alos Palsar) revela que la naciente del río Caburgua se encuentra a una cota más elevada que el Lago Caburgua, lo que sugiere, probablemente, que una falla geológica influencia la circulación de agua subterránea. En el pasado, acorde a testimonios de personas del sector, hace mas de dos décadas existía un efluente superficial desde el lago Caburgua hacia el río homónimo.

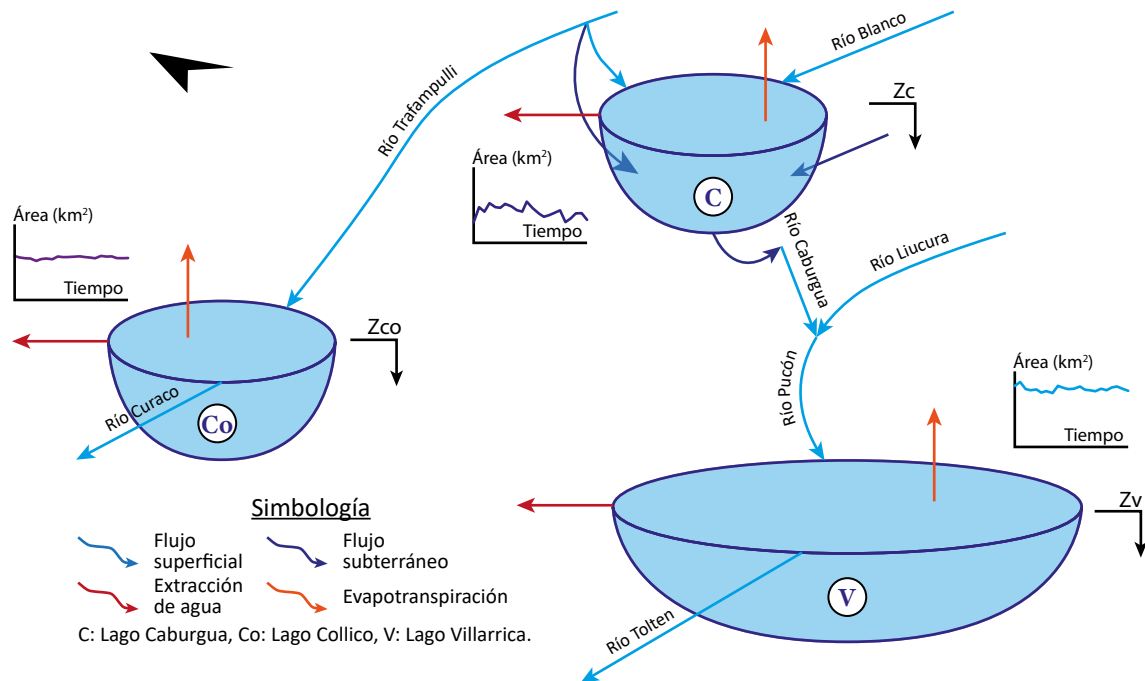


Figura 5.1: Modelo esquemático que explica la interacción hidrogeológica entre los 3 lagos de la zona: Lago Caburgua (C), Lago Colico (Co) y Lago Villarrica (V). Además, se muestra la variación en el tiempo del área (km^2) de cada lago. Z_c , Z_{co} y Z_v simbolizan el eje en profundidad de los lagos Caburgua, Colico y Villarrica, respectivamente.

En la Figura 5.2 se representa el funcionamiento del sistema hidrogeológico del Lago Caburgua previo y posterior a la instalación de la defensa ribereña en el sector Llanqui-Llanqui. Como se mencionó en el párrafo anterior, el río Trafampulli es un drenaje que podría aportar agua al Lago Caburgua. Además, el lago recibe aportes de agua por precipitaciones, principalmente durante los meses de invierno, y del derretimiento de nieve durante los meses de primavera. Del análisis de superficie del lago, se deriva que el lago está muy vinculado a las precipitaciones, disminuyendo su área aproximadamente 2 km^2 durante períodos secos y recuperando su superficie durante años húmedos (Figura 4.6).

En el año 2009 se llevó a cabo la instalación de una defensa ribereña que permite el paso de agua superficial, desde el río al lago, sólo para caudales mayores de $67,7 \text{ m}^3/\text{s}$ asociados a períodos de retorno mayores a cinco años. Además, aproximadamente desde el año 2006 las precipitaciones han disminuido progresivamente en 21,7% hasta la actualidad, lo que ha llevado a una baja en el caudal de los ríos a escala regional.

Si bien hay aforos puntuales en el río Trafampulli en el sector de Rinconada, que datan desde el año 2016, desde la instalación de la defensa ribereña no se han observado aportes de agua superficial, de gran magnitud, provenientes del río Trafampulli al Lago Caburgua. DGA (2022) realizó una visita a terreno el 22 de diciembre de 2021, en el informe indicó que encontraron afloramientos de agua en el sector de vegas drenando hacia el Lago Caburgua, a pesar de que no se realizaron aforos sobre este flujo, se observa que el caudal es de unos pocos litros por segundo y el caudal aforado sobre el Trafampulli es de $0,64 \text{ l/s}$.

No obstante, el sistema hidrogeológico del Lago Caburgua es más complejo y existiría interacción entre agua superficial y flujos de agua subterránea tanto someros como profundos. Esto se evidencia tanto por la zona de vega en el sector Llanqui-Llanqui como por la presencia de dos pozos al borde del lago (código de expediente $NR-0902-622$ y $ND-0902-14801$, de acuerdo con el registro de derechos de otorgamiento de agua de la Dirección General de Aguas), ambos con derechos permanentes y continuos por $2,00 \text{ l/s}$ y $2,86 \text{ l/s}$, respectivamente. En este último pozo, se realizó un ensayo de bombeo en septiembre de 2015, donde se midió

el nivel estático a 18,96 m de profundidad. Aunque no se cuenta con la estratigrafía de ninguno de los pozos, si se considera que el fondo de este valle fluvio-glaciar presenta depósitos no consolidados que cubren a las rocas del basamento, a lo menos ambos pozos extraen agua de estos depósitos.

El basamento del área de estudio está compuesto por rocas volcano-sedimentarias e intrusivas que se encuentran fracturadas por la actividad de dos sistemas de fallas de escala regional: Sistema de Fallas de Liquiñe-Ofqui (SFLO) y Fallas Transversales a los Andes (FTA). Dos ramas de orientación norte-sur del SFLO encajonan al Lago Caburgua (oeste y este) dentro de un valle fluvio-glaciar. Una falla de orientación noroeste, agrupada dentro de las FTA, cruza el Lago Caburgua generando un escarpe en el fondo del lago. A pesar de que estudios anteriores (ej.: DGA (2016)) han considerado el basamento como una unidad prácticamente impermeable, la presencia de numerosos manantiales termales en la zona (ej.: Termas de río Blanco, Termas San Sebastián, Termas de Liucura, Termas de Pucón Indómito, Termas Quimey-Co, entre otras), que descargan agua desde rocas fracturadas, son evidencia de la existencia de circulación de agua subterránea por las rocas que conforman el basamento.

El conjunto revela un sistema articulado, donde los recursos hídricos superficiales, lago y agua subterránea interactúan. Sin embargo, varios aspectos relacionados al funcionamiento no se conocen en detalle, limitando la evaluación de los posibles cambios ocurridos en el tiempo.

Por último, las salidas de agua del Lago Caburgua corresponden a la evaporación, al desagüe subterráneo del lago en el río Caburgua y a las extracciones de agua tanto superficial como subterránea. El desagüe subterráneo se produce por el valle que conecta la ribera sur del lago con el río Caburgua-Liucura-Pucón, que en ese tramo fluye en dirección aproximada nor-este sur-oeste. El flujo subterráneo depende de la sección transversal de este acuífero, cuyo ancho se estima en a lo menos 600 m a partir de la medición de la longitud de la ribera sur. La profundidad es desconocida pero una estimación inicial es que podría ser equivalente a la profundidad del lago en su extremo sur. Finalmente, la permeabilidad del suelo es desconocida, pero se estima que este acuífero está compuesto por sedimentos no consolidados de influencia glacial, de tipo morrena, lo que permite situar de manera preliminar el rango de magnitudes que podría alcanzar su conductividad hidráulica. Se han otorgado derechos de aprovechamiento de agua en la cuenca aportante al lago Caburgua, lo cual puede impactar la entrada de agua hacia el lago. En los ríos Blanco (la principal entrada de agua superficial del lago) y Trafampulli se han otorgado 0,14 m³/s y 2,33 m³/s, respectivamente. Se desconoce el grado de intensidad de uso de estos derechos de aprovechamiento, así como el destino que se le ha dado a estas aguas.

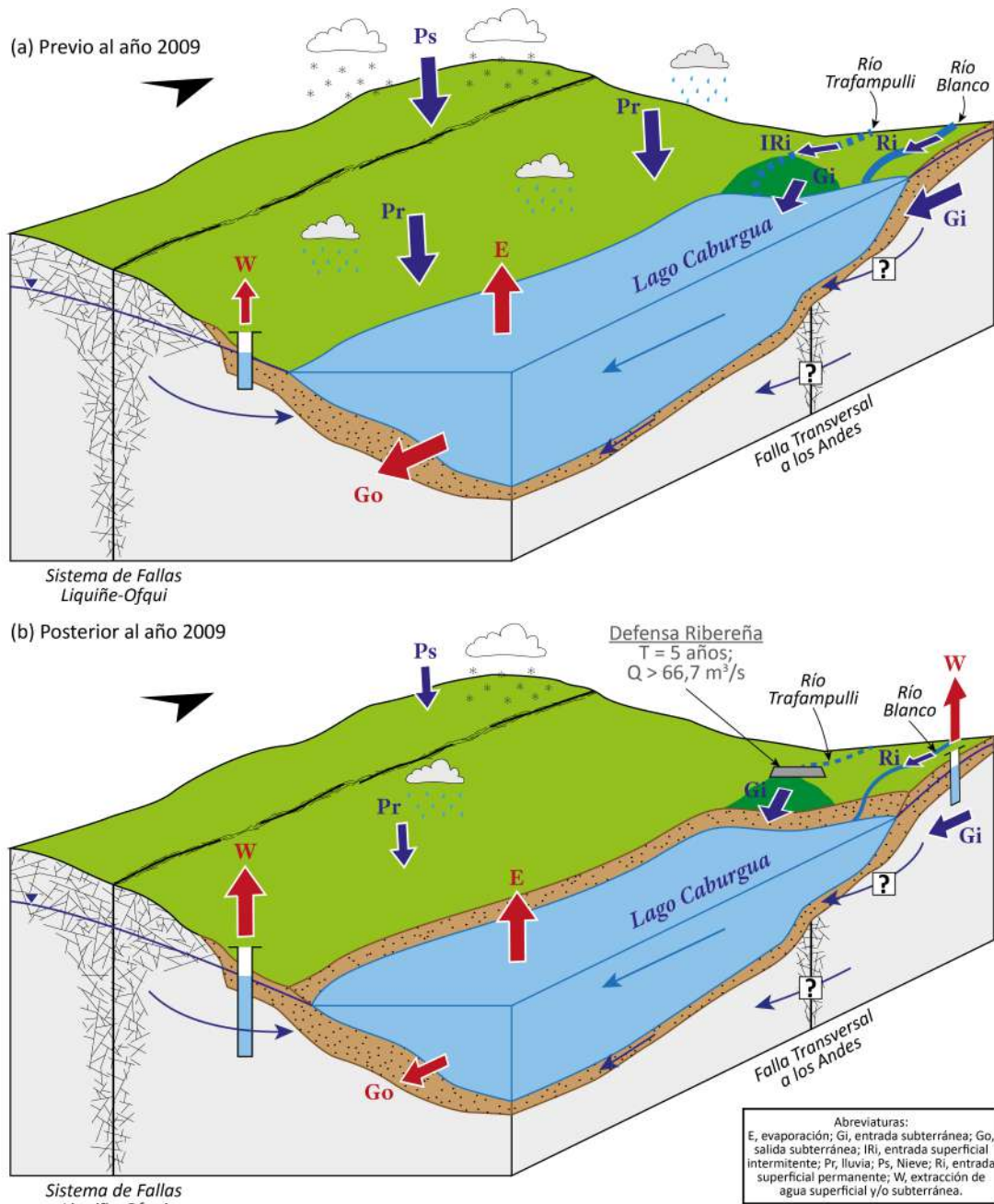


Figura 5.2: Modelo hidrogeológico conceptual del Lago Caburgua. Se muestran los principales componentes que interactúan en el sistema: G_i , flujo de agua subterránea entrante; R_i , flujo de agua superficial entrante; P , precipitaciones (lluvia y nieve); E , evapotranspiración; W , extracciones (subterráneas y superficiales); G_o , flujo de agua subterránea saliente; R_o , flujo de agua superficial saliente. Fuente: Elaboración propia.

6. Balance hídrico

El balance hídrico en un cuerpo de agua está dado por la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = P_l + Q_i - Q_o - E \quad (6.1)$$

donde $\Delta S/\Delta t$ es la variación del almacenamiento en el tiempo, P_l es la precipitación sobre el cuerpo de agua, Q_i es el flujo afluente, Q_o es el flujo efluente y E es la evaporación. Es importante resaltar que tanto Q_i como Q_o consideran las componentes superficiales y subterráneas. El análisis de balance hídrico del Lago Caburgua se ve dificultado por la importante carencia de observaciones directas de una serie de variables que afectan su evolución. En consecuencia, en este estudio se debieron realizar una serie de supuestos que se detallan a continuación.

- *Precipitación sobre el lago*: Los aportes de precipitación sobre el lago se estimaron como la multiplicación de la precipitación anual sobre el lago y el área superficial del mismo. Si bien el área superficial es variable, para este ejercicio se supuso un valor constante e igual a 50 km². La precipitación anual sobre el lago se calculó a base de la precipitación modelada por el CR2Met para el punto la estación Lago Caburgua corregida según la precipitación registrada en la estación de Lago Caburgua de la DGA. En particular, los datos faltantes de los últimos años se estimaron a base de correlaciones entre la información disponible en las estaciones Lago Tinquilco, Lago Caburgua y Tricauco y los valores del producto CR2Met. El detalle de esta estimación se presenta en el Anexo D disponible en digital.
- *Caudales afluentes cuenca aportante*: Los volúmenes afluentes al lago Caburgua se estimaron como el producto entre la precipitación anual sobre el área de la cuenca aportante, el área de dicha cuenca, y un coeficiente de escorrentía. El coeficiente de escorrentía engloba de manera conceptual las pérdidas por intercepción y evapotranspiración que ocurren en el primer horizonte de suelo y que reducen el volumen de agua disponible para transformarse en escorrentía. La precipitación sobre el área aportante se estimó a base del producto CR2Met (considerando como representativo el punto de latitud 39°06'17"S y longitud 71°37'17"W), la que se correlacionó con la precipitación en el lago para obtener los valores faltantes el producto CR2Met en los últimos años.
- *Conexión con río Trafampulli*: La conexión entre el río Trafampulli aportó volúmenes desconocidos hasta ahora, desde fechas pretéritas que se remontan varias décadas, y que se interrumpieron el año 2009. Ante este nivel de desconocimiento, en este ejercicio de modelamiento se supuso un volumen anual constante desde el inicio de la modelación hasta el año 2009, cuyo valor fue sensibilizado en la etapa de calibración del modelo.
- *Evaporación desde el lago*: La evaporación se calculó mediante el método de Penman, utilizando variables meteorológicas extraídas de los productos Explorador Eólico y Explorador Solar del Ministerio de Energía. El detalle de esta estimación se presenta en el Anexo A.
- *Caudales Efluentes*: Los antecedentes recabados permiten suponer que el principal afluente del lago Caburgua es subterráneo, mientras que los efluentes superficiales se verifican sólo esporádicamente en períodos hidrológicamente húmedos. Para simular los efluentes subterráneos se utilizó la fórmula de Darcy, la Figura 6.1 muestra un esquema simplificado de los parámetros de la ley de Darcy. Donde $P1$ y $P2$ son los puntos de control de nivel piezométrico, Δl la distancia entre piezómetros, Δh la diferencia de niveles de agua entre los piezómetros $P1$ y $P2$, K es la conductividad hidráulica de la litología, y B el ancho transversal de la salida subterránea del flujo. Suponiendo una condición hidrológica de nivel constante aproximadamente en la ubicación, $P1$ y cota del río Pucón, $P2$, que corre de Este a Oeste en un eje aproximadamente perpendicular al eje principal del lago. Utilizando la cota del río, que se fijó en

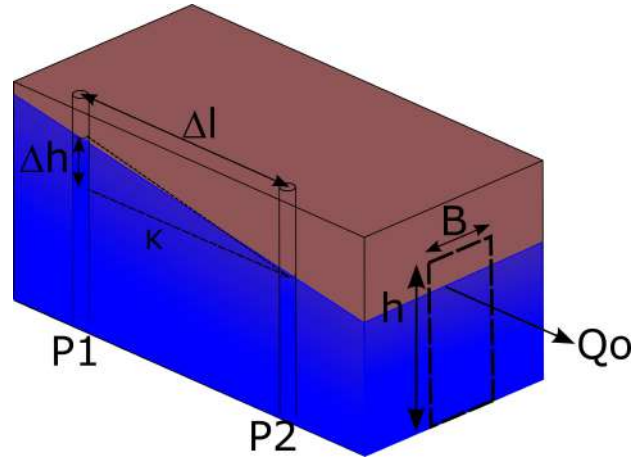


Figura 6.1: Esquema conceptual de la ley de Darcy. Fuente elaboración propia.

297 m s.n.m. a partir de información cartográfica, se calculó el gradiente hidráulico con el nivel simulado del lago en el paso de tiempo anterior. Luego, este gradiente hidráulico se multiplicó por un área de flujo igual al producto del ancho aproximado del valle y una profundidad estimada igual a la diferencia de cota entre el nivel del lago y la cota de referencia del río Pucón. Finalmente, la conductividad hidráulica es un parámetro incierto del modelo, cuyo valor se calibró a partir de estimaciones iniciales correspondientes a rellenos aluviales con componente glacial.

- *Derechos de aprovechamiento de aguas*: De acuerdo a la información recopilada, se asumieron valores para los volúmenes extraídos asociados a Derechos de Aprovechamiento de Aguas como *efluentes del lago*. Si bien los derechos constituidos no necesariamente lo son desde el cuerpo del lago, se supone que los volúmenes extraídos desde cauces superficiales y desde acuíferos aguas arriba del Lago Caburgua en efecto reducen la disponibilidad de agua afluente hacia el lago. No se conocen los volúmenes efectivamente extraídos desde los puntos de captación asociados a los derechos otorgados, por lo que en principio se asumió que el total de derechos consuntivos permanentes es captado. Los Derechos de Aprovechamiento de Aguas de carácter consuntivo y ejercicio de derecho permanentes representan sólo un 9% del total de derechos constituidos en la zona, de modo que en el ejercicio de modelamiento se adoptaron multiplicadores para sensibilizar el efecto de estos volúmenes sobre el nivel del lago.

Con estas consideraciones la expresión para el balance hídrico discretizada en el tiempo para el Lago Caburgua está dada por:

$$S_{t+1} = S_t + P_{l,t} + Q_{i,t} - Q_{o,t} - E_t + Q_{DTf,t} - Q_{oe,t} \quad (6.2)$$

Donde S_t representa el almacenamiento en tiempo t , $P_{l,t}$ representa la precipitación sobre el lago en el tiempo t , $Q_{i,t}$ representa el caudal afluente en el tiempo t , $Q_{o,t}$ representa el caudal efluente en el tiempo t , E_t es la evaporación en el tiempo t y $Q_{DTf,t}$ representa la conexión con el río Trafampulli y $Q_{oe,t}$ representa el efecto de las extracciones de agua autorizadas por la DGA. El análisis del balance se realizó para el período 2000-2021, y el modelo se ajustó para reproducir lo más fielmente los niveles observados del Lago. Todas las variables se utilizaron con paso de tiempo anual; cuando fue posible, se calcularon promedios anuales de variables observadas a mayor frecuencia. Los parámetros ajustados -de forma manual- en el proceso de calibración fueron la conductividad hidráulica del acuífero de salida al sur del lago y el coeficiente de escorrentía que afecta la precipitación que cae sobre la cuenca aportante. Otros parámetros, que no se calibraron, incluyen el ancho de la sección transversal de acuífero que drena el lago, la intensidad de uso de los Derechos de Aprovechamiento de Aguas.

A fin de verificar las hipótesis sobre el descenso del lago Caburgua, se simuló tres escenarios adicionales -además del escenario base- con el modelo de balance hídrico. Los escenarios modelados son:

1. Escenario base:

Incluye aportes por precipitación de acuerdo a la serie CR2Met, aporte constante del río Trafampulli, $Q_{DTf}=0,3 \text{ m}^3/\text{s}$, sólo para el período 2000-2009, y extracciones de agua asociadas a los Derechos de Aprovechamiento de Aguas en la cuenca del Lago Caburgua (Figura 3.28), afectados por un factor de 3 por el uso de Derechos de Aprovechamiento de Aguas con ejercicio de derecho eventual, es decir, se triplican las extracciones permanentes. Esto dado que en la cuenca del Lago Caburgua solo el 9% del total de Derechos de Aprovechamiento de Aguas otorgados, equivalente a $0,27 \text{ m}^3/\text{s}$, son de ejercicio de derecho permanente.

2. Escenario 2 - Precipitaciones:

Para visualizar el efecto de la megasequía, en este escenario las precipitaciones posteriores a 2010 se ponderaron por un factor igual a 1,08, de manera de mantener un aporte aproximadamente invariante (en cuanto a tendencias de largo plazo) en el tiempo. Todos los demás supuestos se mantuvieron constantes respecto del Escenario Base.

3. Escenario 3 - Extracciones de derechos de aprovechamiento:

En este escenario, manteniendo todo lo demás constante respecto del escenario base, se aplicó un incremento de hasta cinco veces sobre las extracciones de agua asociadas a los Derechos de Aprovechamiento de Aguas de ejercicio permanente en la cuenca del Lago Caburgua (Figura 3.28), sin superar el total de derechos otorgados. El objetivo de esta simulación es sensibilizar el efecto que podrían tener las extracciones sobre el nivel del lago, en caso de materializarse con mayor intensidad.

4. Escenario 4 - Aportes del río Trafampulli:

Manteniendo todos los demás supuestos constantes respecto al Escenario Base, en este escenario se supusieron aportes desde el río Trafampulli constantes e iguales a $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$, para el período 2000-2021. Lo anterior, con el fin de evaluar el hipotético efecto relativo que podrían haber tenido los aportes faltantes desde Trafampulli, ante un escenario de sequía como el efectivamente observado desde 2010 en adelante.

Para el análisis del almacenamiento se consideró un coeficiente de escorrentía de 0,65, para el aporte del flujo superficial. La calibración manual del modelo arrojó una conductividad hidráulica de $0,00101505 \text{ m/s}$ como mejor parámetro para representar las salidas subterráneas desde el lago. Luego de estimar la variación del almacenamiento en el tiempo como columna de agua, se supuso que en el año 2000, fecha en que se iniciaron los registros de niveles en el Lago Caburgua, se tenía una cota asociada de $H_0= 489,7 \text{ m s.n.m.}$

La Figura 6.2 muestra el nivel observado del lago Caburgua para el período 2000-2021 junto con las simulaciones descritas anteriormente. Se aprecia que la simulación en el escenario base representa razonablemente las fluctuaciones observadas en nivel del lago Caburgua, con un período aproximadamente estable previo a 2010, para dar paso luego a una década de progresivo vaciamiento del lago. La simulación base captura estas tendencias, aunque diverge de los valores observados de manera más ostensible en los últimos cinco años de la serie. No obstante lo anterior, a la luz de las múltiples fuentes de incertidumbre que inciden sobre este ejercicio, incluyendo aquellas asociadas a la observación de niveles en el lago, se considera ésta como una simulación aceptable ($R^2= 0,64$; $RMSE= 1,89 \text{ m}$).

La simulación del Escenario 2, donde se aumentan sintéticamente las precipitaciones después del año 2010, muestra que el nivel del lago se mantiene aproximadamente estable, un poco por encima de los 490 m s.n.m (es decir, 5 m por encima de lo indicado por las observaciones en 2021 y 10 m por encima de la simulación del escenario base para ese mismo año. En este escenario, basta un 6% de incremento en las precipitaciones para estabilizar el nivel del lago. Este porcentaje fue calibrado, puesto que al utilizar el porcentaje (14%) correspondiente al cociente entre la precipitación media antes y después de 2010, los niveles del lago aumentaban de manera no realista. Por otro lado, en la simulación del Escenario 3 se aumentan las extracciones de Derechos de Aprovechamiento de Aguas en la cuenca del Lago Caburgua (Figura 3.28), suponiendo un factor de 5 veces el caudal de derechos otorgados de ejercicio permanentes. Este valor sólo tiene el objetivo de mostrar el potencial efecto que podría tener un ejercicio intensivo de los derechos permanentes y eventuales otorgados

en la cuenca, en relación con los otros volúmenes que intervienen en el balance hidrológico del lago. Finalmente, la simulación del Escenario 4, donde se asume un aporte de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ constante desde el río Trafampulli, resulta en un incremento del nivel del lago que es más pronunciado aún que la evolución de esta variable observada con antelación al año 2009. En este escenario, la tendencia post 2010 se revierte y se establece a la baja, aunque de manera atenuada, producto de la disminución de precipitaciones y por consiguiente de los afluentes naturales al embalse. Este comportamiento permite concluir que, incluso en un escenario hipotético de aportes ininterrumpidos desde el río Trafampulli al lago Caburgua, la reducción de precipitaciones observada desde 2010 hubiera tenido un efecto significativo sobre la cota del lago al cabo de 10 años de sequía, y es por tanto el factor de sequía el principal causante del descenso del lago.

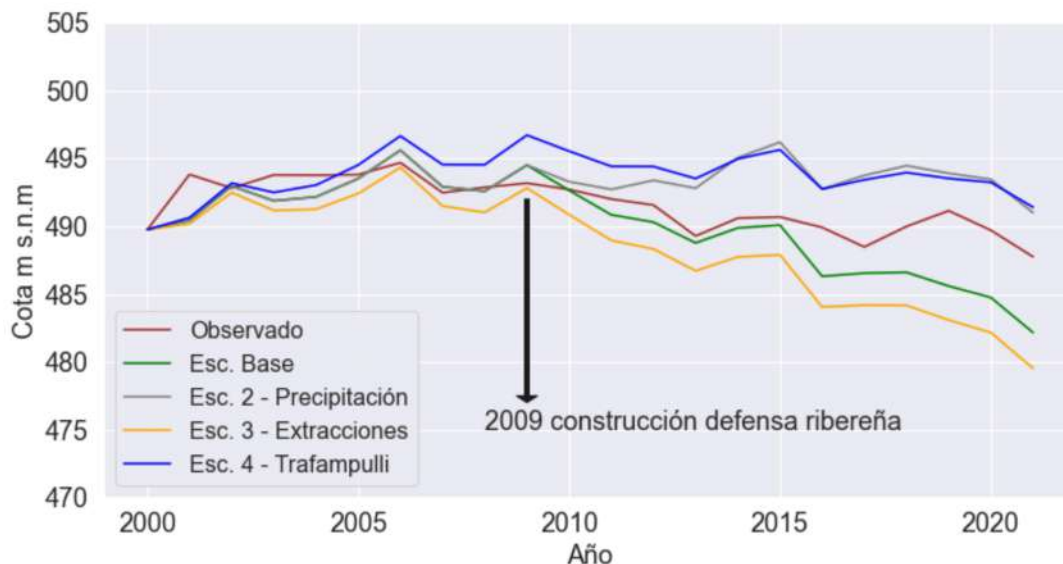


Figura 6.2: Nivel del lago Caburgua y niveles modelados a través del balance hídrico. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.1: Volúmenes promedio del balance hídrico ($\text{Hm}^3/\text{año}$).

	Escenario Base	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
P_l	122,79	131,68	122,79	122,79
Q_i	460,35	488,01	460,35	460,35
Q_{DTf}	3,87	3,87	3,87	23,65
Q_{oe}	22,28	22,25	37,14	22,28
Q_o	526,55	543,49	517,63	526,55
E	43,24	43,24	43,24	43,24

Finalmente, la Tabla 6.1 presenta el resumen de los volúmenes promedio anuales del balance hídrico. Se muestra que la principal entrada de flujo al lago está asociada al caudal Q_i , y es del orden de $470 \text{ Hm}^3/\text{año}$, mientras que el flujo asumido aportante desde el río Trafampulli es un 3%, respecto a la precipitación, para los Escenarios Base, 2 y 3. En el escenario 4, que supone un aporte de $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$, el flujo aportante desde el río Trafampulli es de 19,26% respecto al flujo asociado a la precipitación. Por otra parte, el desagüe subterráneo del lago, Q_o , es del orden de $500 \text{ Hm}^3/\text{año}$. La extracción asociada a los Derechos de Aprovechamiento de Aguas y evaporación representan el 4% y 8% de las salidas del modelo, respectivamente. Es decir, el principal ingreso de agua, es por aportes de precipitación y el principal efluente es por el desagüe natural del lago hacia el río Caburgua.

7. Sistematización de hipótesis sobre el descenso del Lago Caburgua

En esta sección se discuten cuatro principales hipótesis que se han planteado para explicar las posibles causas del descenso de los niveles del Lago Caburgua. El análisis se realiza entre los años 2000 y 2021, donde se cuenta con información de niveles observados en el lago. Las hipótesis se discuten a la luz de los antecedentes recopilados, los resultados de la simulación de balance hídrico del lago, y de los escenarios alternativos modelados.

7.1. Cambios en el régimen de precipitaciones y temperaturas

A partir del análisis comparativo entre la variación temporal de la superficie del lago y las precipitaciones (4.6), se puede indicar que hay una relación directa, es decir, al disminuir o aumentar las precipitaciones, la superficie del lago responde de la misma forma. Previa al 2010, la cota de superficie del lago disminuía durante años secos y se recuperaba durante años húmedos. No obstante, a partir de 2010, las precipitaciones han disminuido progresivamente en el centro y sur de Chile y la superficie del lago ha mostrado la misma tendencia. A nivel regional se ha observado que los caudales de los ríos han disminuido en respuesta a la disminución en las precipitaciones. Aunque no se cuentan con un registro en continuos de datos de caudales en los ríos Blanco y Trafampulli, es plausible suponer que sus cauces han reducido sus caudales en la última década al igual que lo han hecho los ríos en esta región. La simulación del escenario 2, en que solamente se modifican las precipitaciones de tal manera de eliminar la tendencia decreciente posterior a 2010, da cuenta del fuerte impacto que un aumento de un porcentaje menor en las precipitaciones anuales podría tener sobre el balance del lago. En efecto, con un 5% de aumento post 2010 sería suficiente para mantener los niveles aproximadamente estables respecto de la década anterior.

7.2. Modificaciones en las filtraciones subterráneas del lago por actividad sísmica

Las fallas presentes en el área de estudio, es decir, aquellas pertenecientes al Sistema de Fallas Liquiñe Ofqui y a las Fallas Transversales a los Andes, han sido documentadas como fallas activas en numerosos estudios (Melnick et al. 2006, Sielfeld et al. 2019, Pearce et al. 2020, Pérez-Estay et al. 2020, Villalobos et al. 2020, Astudillo-Sotomayor et al. 2021, De Pascale et al. 2021). Debido a esto se examinaron los datos históricos de sismos registrados en el área que abarca las subcuencas de río Allipen, Lago Villarrica y Tolten Alto, y río Pucón (Figura 7.1), para así evaluar alguna variación en la actividad sísmica relacionada con las fallas que pudiera dar cuenta de posibles modificaciones en las filtraciones subterráneas del lago.

Se consideraron los datos del catálogo del Servicio Geológico de Estados Unidos¹, de los cuales se seleccionaron aquellos sismos de magnitud $\geq 4,5$ Mw. También se examinaron los sismos presentados por Sielfeld et al. (2019), que corresponden al registro de una red sísmica instalada durante los años 2014 y 2015 en el marco del proyecto FONDECYT N°1141139, en conjunto a los registros de la red sísmica permanente del Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur.

Los sismos presentados en el catálogo del USGS corresponden a 15 eventos registrados entre los años 1979 y 2020, con magnitudes variables entre 4,1 y 5,1 Mw, de los cuales 60% ocurrieron a una profundidad

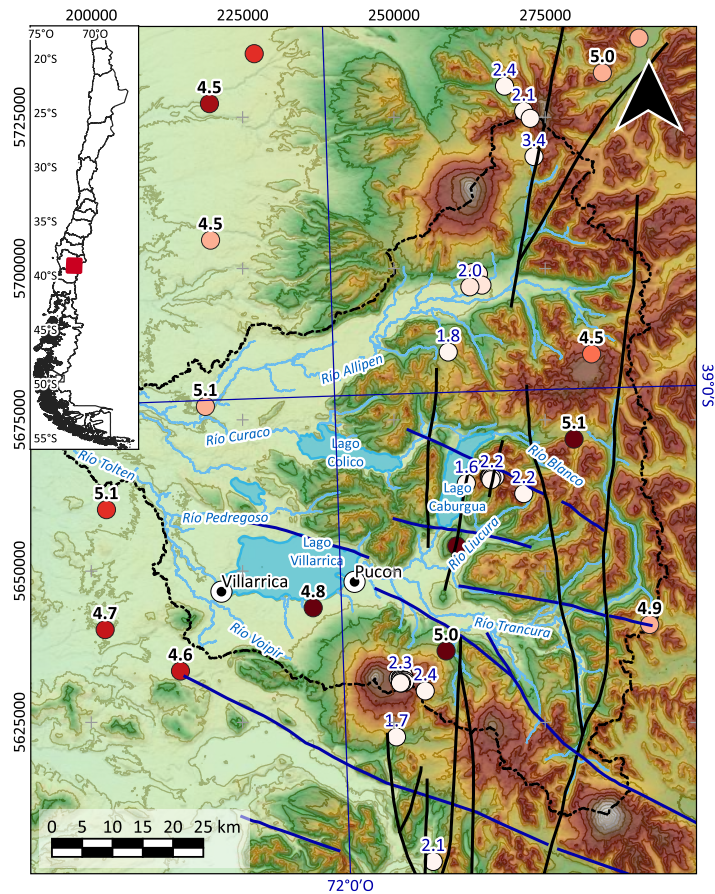
¹<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

de ≥ 70 km. Este dato sugiere que la mayoría de los sismos ocurrieron en la placa subductante y no en la corteza continental. Mientras que los sismos registrados por Sielfeld et al. (2019) corresponden a 37 sismos de magnitud $\leq 3,4$ Mw dentro de los cuales el 86 % de estos ocurrieron entre 7 y 10 km de profundidad, es decir, en la corteza continental.

Si bien existen sismos corticales registrados por Sielfeld et al. (2019) que tienen una estrecha relación de causalidad con la actividad de las fallas, los datos disponibles no permiten establecer la existencia de alguna relación con los grandes sismos de subducción que han ocurrido en Chile y la variación en la actividad sísmica de las fallas presentes en el área de estudio, en especial con el terremoto del Maule de magnitud 8,8 Mw ocurrido en el año 2010. Considerando los datos disponibles, no es posible atribuir la disminución del nivel del lago a la actividad sísmica actual registrada en las fallas geológicas, cuya actividad abarca una escala de tiempo de millones de años. Por lo tanto, esta hipótesis no parece explicar los descensos del nivel del lago registrados en los últimos años. Para poder establecer alguna relación entre el nivel del lago y la actividad de las fallas, se sugiere:

- Cuantificar la deformación de las rocas en la zona. A partir de la instalación de una densa red de GPS se puede medir el desplazamiento del terreno durante períodos intersísmicos y cosísmicos (ej. González et al. (2021)).
- Determinar el campo de estrés local. Con una red permanente de sismómetros se pueden medir eventos sísmicos muy pequeños, a partir de los cuales se puede realizar una inversión de datos y obtener el campo de estrés asociado (ej. Ammirati et al. (2019))
- Registrar de manera continua y con alta frecuencia la variación del nivel de agua subterránea de algún pozo cercano al lago.

Hipotéticamente se debería observar un desplazamiento divergente en el terreno y un campo local de estrés extensional. Esto permitiría inferir el desarrollo de fracturas de extensión (diaclasas) que facilitarían la filtración de agua del lago hacia niveles más profundos. Si los niveles de agua subterránea disminuyen asociados a algún evento sísmico, se podría establecer alguna relación de causa y efecto.



Simbología

- | | |
|--------------------------------------|---|
| ● Capital comunal | ▭ Subcuencas Río Allipén, Lago Villarrica y Toltén Alto |
| ■ Lago | |
| Drenajes | |
| — Permanente | |
| - - - Intermitente | |
| Fallas geológicas | |
| — Sistema de Fallas de Liquiñe-Ofqui | |
| — Fallas Transversales a los Andes | |
| Modelo de elevación digital | |
| Altitud (m s.n.m.) | |
| ■ 3,000 | |
| ■ 0 | |
| | Profundidad de sismos (km) |
| | ○ 0-10 |
| | ○ 10-20 |
| | ○ 20-30 |
| | ○ 30 - 40 |
| | ○ 40 - 50 |
| | ○ 50 - 60 |
| | ○ 60 - 70 |
| | ○ 70-80 |
| | ○ 80-90 |
| | ○ 90-100 |
| | ○ >100 |

Figura 7.1: Ubicación de sismos analizados. Los sismos con etiqueta negra corresponden a aquellos presentados en el catálogo del USGS (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>), mientras que aquellos con etiqueta azul son los presentados por Sielfeld et al. (2019). El área delimitada en rojo corresponde a la unión de las subcuencas hidrográficas Río Allipén, Lago Villarrica y Toltén Alto, y Río Pucón. Datum: WGS84-UTM19S. Fuente: Elaboración propia.

7.3. Alteraciones en el curso de cauces afluentes

Se analizaron los antecedentes existentes sobre el proceso que llevó a cabo la construcción de la defensa ribereña para modificar el cauce del río Trafampulli y su relación con la disminución del nivel del Lago Caburgua. Durante el año 2006, vecinos del Lago Colico realizaron una denuncia al señor Marcelo Benito (Expediente VV-0902-145), indicando que este habría modificado el cauce del río Trafampulli para que parte de su caudal, del orden de un 60 %, se dirigiera al Lago Caburgua. Como resultado de esta denuncia, la Dirección General de Aguas solicitó a don Marcelo Benito la instalación de la defensa ribereña para la restitución de cauce. La obra en cuestión entró en operación el año 2009 y a partir de esa fecha no se han observado aportes de agua superficial provenientes del río Trafampulli al Lago Caburgua.

Existe evidencia de larga data entre la conexión superficial del río Trafampulli y el Lago Caburgua. Desde al menos el año 1979 fotografías aéreas muestran un flujo superficial que va desde el río hacia el lago Caburgua, pero no puede determinarse si el flujo superficial es perenne o efímero, ni tampoco si es natural o artificial, dado que no existen registros históricos de caudal sobre el río Trafampulli, ni de niveles históricos sobre el lago Colico que permitan analizar estos interrogantes. Como ya se discutió, la simulación del llamado Escenario 2 da pie para concluir que la disminución de precipitaciones producto de la sequía que persiste desde 2010 es suficiente para explicar, con creces, la evolución de niveles desde el lago. Por otro lado, la simulación del escenario 4, en que se supone un aporte constante de $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ desde el río Trafampulli al lago Caburgua, genera un efecto de aumento en el nivel del lago que excede lo observado y alcanza prácticamente los 495 m s.n.m en 2009. Este aumento es contrarrestado con posterioridad a 2010 por la disminución de precipitaciones, para llegar a un nivel de aproximadamente 492 m s.n.m en promedio durante la década de 2010. En consecuencia, es poco plausible que el aporte desde el río Trafampulli previo a 2009 haya alcanzado una magnitud similar a $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$, sino que más bien es dado suponer que estos aportes pudieran haber alcanzado valores promedio anual del orden de algunos cientos de litros por segundo. Entonces, si bien resulta evidente que cualquier disminución de afluentes tendrá un efecto negativo sobre el balance hídrico del lago, es muy poco probable que el cese de los aportes del Trafampulli haya jugado un rol de primer orden en el descenso de nivel del lago.

7.4. Incrementos en las extracciones de agua desde cuerpos de agua, controladas y no controladas.

Se realizó una revisión espacio-temporal de los otorgamientos de Derechos de Aprovechamiento de Aguas consuntivos y regularizados por parte de la Dirección General de Aguas, con el fin de evaluar el efecto de las extracciones permitidas en el área de estudio. Se observa un aumento gradual en la cantidad acumulada de los Derechos de Aprovechamiento de Aguas a lo largo del tiempo, hasta $2,75 \text{ m}^3/\text{s}$ al 2021, los cuales incluyen derechos consuntivos eventuales (91 %) y permanentes (9 %), y una tendencia a solicitar derechos de agua hacia las zonas más altas donde se encuentran las nacientes de los ríos principales (Río Blanco y Río Trafampulli). Esta tendencia es leve, y más bien se manifiesta en algunos derechos otorgados en los años 1994, 2000, 2007 y 2016. Dada la magnitud de los derechos concedidos en esas fechas, se puede asumir que para el período de simulación (2000-2021) el caudal de derechos otorgados es aproximadamente constante. Si bien el caudal efectivamente extraído a partir de estos derechos es desconocido, se aprecia del modelo de balance que el volumen extraído incluso en escenarios pesimistas representa una fracción menor (4 - 7 %) respecto de los efluentes naturales al lago. Por esta razón puede rechazarse la hipótesis de que las extracciones por sí solas pudieran constituir un factor de primer orden que explique el descenso en los niveles del lago Caburgua.

8. Recomendaciones

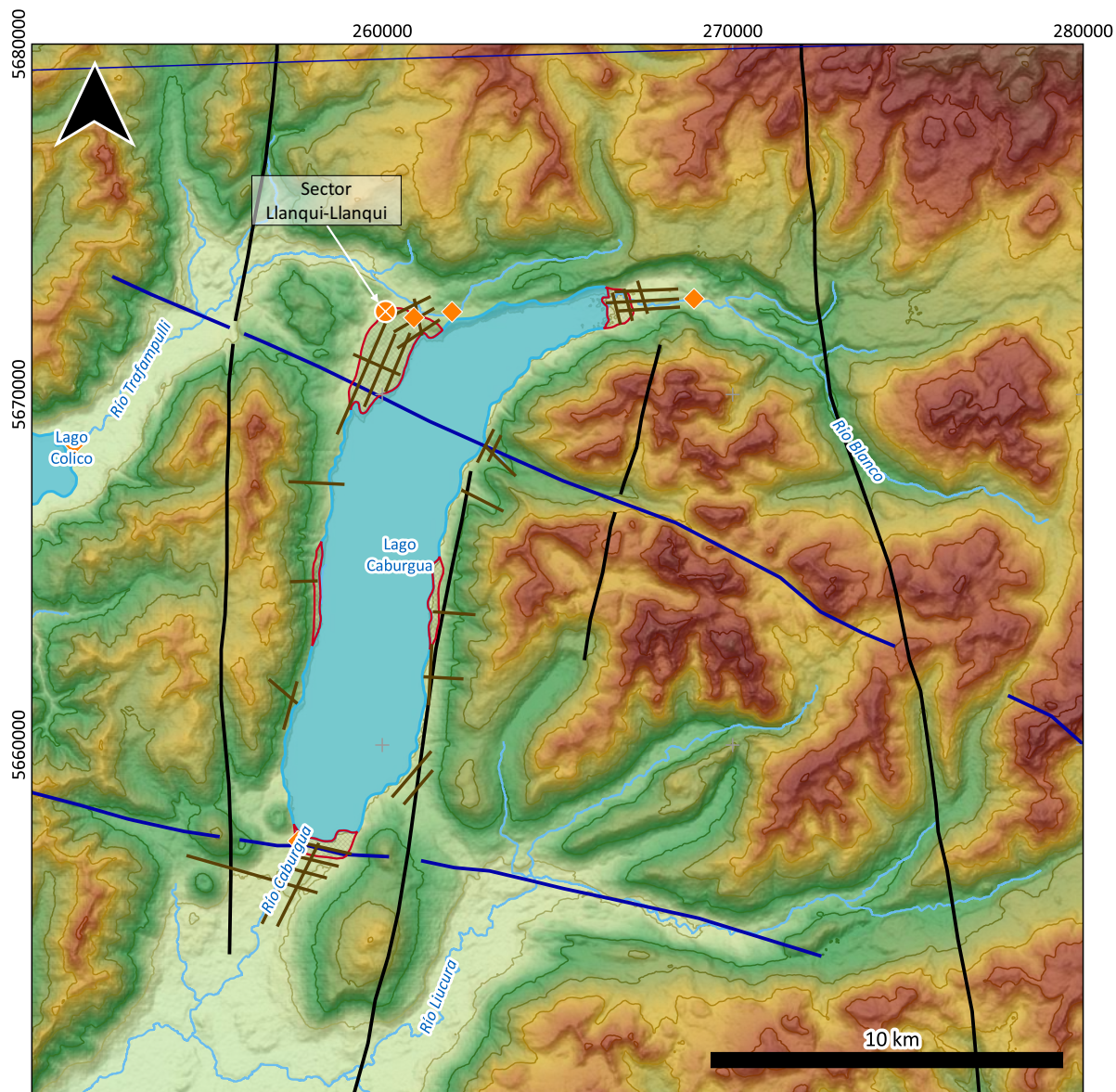
Las conclusiones obtenidas del presente estudio están sujetas a incertidumbre que proviene principalmente de los siguientes factores:

1. Inexistencia de información medida sobre los afluentes al lago Caburgua.
2. Desconocimiento de los caudales efluentes desde el lago, su dinámica y relación con el nivel del espejo de agua.
3. Incertidumbre respecto al nivel de extracciones asociado a los derechos de aprovechamiento constituidos en la cuenca.
4. Incertidumbre respecto al período y magnitud de los aportes desde el río Trafampulli hacia el lago Caburgua verificados con anterioridad a la construcción de la obra de defensa ribereña.

Con el objetivo de reducir la incertidumbre sobre los resultados de este estudio se recomienda considerar dos enfoques:

1. Reducción de incertidumbre sobre balance hidrológico Lago Caburgua.
 - Implementar un control fluviométrico en los principales cauces que desaguan al lago.
 - Realizar una actualización batimétrica del lago.
 - Realizar un estudio hidrogeofísico orientado a esclarecer la presencia de niveles de agua subterránea y geometría de las posibles unidades hidrogeológicas y el rol de las estructuras geológicas presentes en el área.
 - Implementar dos pozos profundos hasta el basamento rocoso, aguas abajo de la descarga del lago Caburgua para la caracterización de propiedades hidráulicas; instalación de una estación fluviométrica agua arriba del sector Ojos del Caburgua.
2. Definir con un GPS de alta precisión el nivel de referencia para el monitoreo del nivel del lago Caburgua.
3. Estimación de aportes históricos del río Trafampulli.
 - Instalación de una estación fluviométrica aguas arriba del sector de vegas.
 - Estudio hidrológico de caudales máximos, medios y mínimos de la cuenca del río Trafampulli. Adicionalmente se requiere analizar la dinámica fluvial del río Trafampulli en el sector de vegas, aguas arriba y abajo de la obra de defensa actual. La modelación hidráulica del flujo debe ser al menos en dos dimensiones (2D), se recomienda realizar para tales efectos un levantamiento topográfico de alta resolución en las tres componentes, longitud, latitud y cota, a demás se sugiere realizar aforos químicos y con correntómetro, para validar los valores aforados.

La caracterización de los efluentes pasa por cuantificar las salidas superficiales y subterráneas desde el lago. En cuanto a las segundas, se sugiere realizar un estudio hidrogeofísico orientado a esclarecer la presencia de niveles de agua subterránea y geometría de las posibles unidades hidrogeológicas, así como el rol de las estructuras geológicas presentes en el área. Con énfasis en mediciones de gravedad y de resistividad eléctrica. En particular, se sugiere realizar Tomografía de Resistividad Eléctrica porque permite la medición de resistividad eléctrica a lo largo de perfiles. En la Figura 8.1 se muestran los potenciales sitios de interés para realizar las mediciones mencionadas a lo largo de perfiles de entre 1 y 4 km. Se estima que en un período de 7 a 8 semanas son requeridas para la ejecución de 2 perfiles de Tomografía Eléctrica.



Simbología

- | | | |
|--|--------------------|------------------------------------|
| ◆ Estación fluviométrica | ▭ Lago | <u>Fallas geológicas</u> |
| — Perfiles Geofísicos (gravedad + ERT) | <u>Drenajes</u> | — Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui |
| ▭ Área para monitoreo subterráneo | — Permanente | — Fallas Transversales a los Andes |
| | - - - Intermitente | <u>Modelo de elevación digital</u> |
| | | Altitud (m s.n.m.) |
| | | ▭ 3,000 |
| | | ▭ 0 |

Figura 8.1: Localización de las estaciones fluviométricas propuestas, rombos naranjas y de los perfiles Geofísicos propuestos, líneas negras.

9. Conclusiones

A partir de los datos analizados, es posible concluir que:

- La geomorfología fluvial en el sector de vegas del río Trafampulli es compleja y comprende una zona donde hay un abrupto cambio de pendiente del río, lo que conlleva una transición desde una zona de alta energía, de producción y transporte de sedimentos a una zona de baja energía y de depositación.
- La precipitación y por ende los caudales presentan tendencias decrecientes en el tiempo, tendencia que se agudiza a partir del año 2010. Sin embargo, la temperatura no presenta tendencias crecientes marcadas. La precipitación en el sector del lago Caburgua ha disminuido en un 14% entre la primera y la segunda décadas del siglo XXI.
- Existe evidencia de una conexión de agua superficial entre el río Trafampulli y el lago Caburgua al menos desde la década de 1970. Imágenes consecutivas no son concluyentes respecto a la continuidad temporal de esa conexión, puesto que no siempre se aprecia con igual claridad en las fotografías aéreas. Esto puede deberse a una naturaleza intermitente de la conexión, o bien a falencias en las imágenes aéreas. No existen antecedentes cuantitativos sobre la magnitud del caudal trasvasado, sobre su régimen de variabilidad temporal, ni información que permita establecer si dicho conexión era de origen natural o antrópico.
- Dada la presencia de manantiales termales relacionados espacialmente a fallas geológicas de escala regional y de larga vida (al menos desde los últimos 4 millones de años), se establece que existe circulación de agua en la roca fracturada en el entorno del lago.
- El análisis de sismos muestra la ocurrencia de terremotos de magnitud <5 Mw, de los cuales aquellos con mayor magnitud ocurren a profundidades >70 km. Los datos existentes no permiten establecer la existencia de alguna relación de las variaciones en el nivel de lago Caburgua con sismos mayores, como el terremoto del Maule ocurrido el año 2010. En este informe se descarta la hipótesis de una relación entre el descenso del lago y la actividad sísmica, debido a que las fallas existentes en la zona han estado activas desde tiempos geológicos.
- La limitada información existente de niveles piezométricos no permite realizar un análisis más acabado para entender el funcionamiento hidrogeológico del Lago Caburgua. Sin embargo, a partir de la existencia de pozos instalados en los depósitos no consolidados, así como la presencia de humedales, se puede concluir que los niveles medidos, entre 3 y 25 m de profundidad, evidencian la presencia de un flujo someros de agua subterránea.
- A escala regional, se identifica un aumento progresivo en la solicitud de Derechos de Aprovechamiento de Aguas de naturaleza subterránea, con ejercicio de derecho permanente y continuo, muy posiblemente en respuesta a la disminución progresiva de las precipitaciones. Además, existe una tendencia en el tiempo a solicitarlos hacia las zonas más altas donde se encuentran las nacientes de los ríos principales (río Blanco y río Trafampulli). A escala local, los Derechos de Aprovechamiento de Aguas no reflejan la tendencia regional en lo que respecta al aumento progresivo en el tiempo. Sin embargo, se observa que existen concentraciones de derechos otorgados de tipo consuntivo al norte del área, en la parte alta del río Blanco y del río Trafampulli, equivalentes a $0,14 \text{ m}^3/\text{s}$ y $2,33 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. Sin embargo, no es posible atribuir a este fenómeno el descenso en el nivel del lago, puesto que no existe concordancia temporal entre el otorgamiento de derechos y los momentos de mayor cambio de tendencia en los niveles del lago, además de la modesta magnitud de estos caudales comparados con las estimaciones realizadas de afluentes y efluentes naturales al lago.

- Entre los años 1998 y 2010, la superficie del Lago Caburgua muestra una rápida respuesta (al corto plazo) a la variabilidad de las precipitaciones, disminuyendo los años secos y recuperando rápidamente su superficie ante años húmedos. Sin embargo, desde el 2010 la superficie del lago ha disminuido progresivamente (sin recuperación) a una tasa de $0,19 \text{ km}^2/\text{año}$, lo cual se correlaciona de manera directa con la disminución sostenida de las precipitaciones. El modelo de balance hídrico propuesto no permite concluir que la interrupción de flujos desde el río Trafampulli por la construcción de una defensa ribereña haya tenido un rol significativo en el descenso del nivel del lago.

Considerando que los objetivos de este estudio son identificar las posibles causas del descenso sostenido en el nivel del Lago Caburgua, se concluye que el motivo de primer orden es la disminución en las precipitaciones a partir de 2010. Se recomiendan acciones, a efectos de reducir las incertidumbres asociadas a i) el funcionamiento hidrológico del lago Caburgua y ii) los aportes históricos desde el río Trafampulli. Estas acciones incluyen:

- Instalación de estaciones fluviométricas en los ríos Blanco, Trafampulli y Caburgua.
- Instalación de piezómetros en el acuífero que desagua el lago Caburgua.
- Desarrollo de un estudio hidrogeológico del acuífero que desagua el lago Caburgua.
- Desarrollo de un estudio hidrológico e hidráulico del río Trafampulli en el sector de Llanqui-Llanqui.

Referencias

- Adriasola, A. C., Thomson, S. N., Brix, M. R., Hervé, F., and Stöckhert, B. (2006). Postmagmatic cooling and late Cenozoic denudation of the North Patagonian Batholith in the Los Lagos region of Chile, 41°-42°15S. *International Journal of Earth Sciences*, 95(3):504–528.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., and Ab, W. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Technical report, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Ammirati, J., Vargas, G., Rebolledo, S., Abrahami, R., Potin, B., Leyton, F., and Ruiz, S. (2019). The Crustal Seismicity of the Western Andean Thrust (Central Chile, 33°–34° S): Implications for Regional Tectonics and Seismic Hazard in the Santiago Area. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(5):1985–1999.
- Anderson, M. P., Woessner, W. W., and Hunt, R. J. (2015). Modeling Purpose and Conceptual Model. *Applied Groundwater Modeling*, pages 27–67.
- Angermann, D., Klotz, J., and Reigber, C. (1999). Space-geodetic estimation of the nazca-south america euler vector. *Earth and Planetary Science Letters*, 171(3):329–334.
- Astudillo-Sotomayor, L., Jara-Muñoz, J., Melnick, D., Cortés-Aranda, J., Tassara, A., and Strecker, M. R. (2021). Fast Holocene slip and localized strain along the Liquiñe-Ofqui strike-slip fault system, Chile. *Scientific Reports 2021 11:1*, 11(1):1–10.
- Cembrano, J., Hervé, F., and Lavenu, A. (1996). The Liquiñe Ofqui fault zone: a long-lived intra-arc fault system in southern Chile. *Tectonophysics*, 259(1-3):55–66.
- Cembrano, J. and Lara, L. (2009). The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: A review. *Tectonophysics*, 471(1-2):96–113.
- Daniele, L., Taucare, M., Viguier, B., Arancibia, G., Aravena, D., Roquer, T., Sepúlveda, J., Molina, E., Delgado, A., Muñoz, M., and Morata, D. (2020). Exploring the shallow geothermal resources in the Chilean Southern Volcanic Zone: Insight from the Liquiñe thermal springs. *Journal of Geochemical Exploration*, 218:106611.
- De Pascale, G. P., Froude, M., Penna, I., Hermanns, R. L., Sepúlveda, S. A., Moncada, D., Persico, M., Easton, G., Villalobos, A., and Gutiérrez, F. (2021). Liquiñe-Ofqui's fast slipping intra-volcanic arc crustal faulting above the subducted Chile Ridge. *Scientific Reports 2021 11:1*, 11(1):1–12.
- DGA (1987). Balance hídrico de Chile. Technical report, Dirección General de Agua, Chile, Santiago.
- DGA (1995). Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica. Technical report, Dirección General de Aguas, Chile, Santiago.
- DGA (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, cuenca del río Toltén. Desarrollado por: CADE- IDEPE. Technical report, Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- DGA (2016). Estudio Hidrogeológico, región de la Araucanía. Desarrollado por: ARCADIS. Technical report, Dirección General de Aguas, Chile.
- DGA (2017). Reporte de la red de control de lagos de la dirección general de aguas año 2017. Technical report, Dirección General de Aguas, Chile.
- DGA (2022). Minuta N° 1: Visita a terreno río Trafampulli. Technical report, Dirección General de Aguas, Chile, Santiago.

- Enemark, T., Peeters, L. J., Mallants, D., and Batelaan, O. (2019). Hydrogeological conceptual model building and testing: A review. *Journal of Hydrology*, 569:310–329.
- Gillespie, J., Nelson, S. T., Mayo, A. L., and Tingey, D. G. (2012). Why conceptual groundwater flow models matter: a trans-boundary example from the arid Great Basin, western USA. *Hydrogeology Journal*, 20(6):1133–1147.
- Glodny, J., Echter, H., Collao, S., Ardiles, M., Burón, P., and Figueroa, O. (2008). Differential Late Paleozoic active margin evolution in South-Central Chile (37°S–40°S) – the Lanahue Fault Zone. *Journal of South American Earth Sciences*, 26(4):397–411.
- González, G., Pasten-Araya, F., Victor, P., González, Y., Valenzuela, J., and Shrivastava, M. (2021). The role of interplate locking on the seismic reactivation of upper plate faults on the subduction margin of northern Chile. *Scientific Reports 2021 11:1*, 11(1):1–12.
- Hauser, A. (2000). Mapa de fuentes de aguas termales de Chile, 1:3.000.000. Technical report, Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Santiago.
- Held, S., Schill, E., Pavez, M., Díaz, D., Muñoz, G., Morata, D., and Kohl, T. (2016). Resistivity distribution from mid-crustal conductor to near-surface across the 1200km long Liquiñe-Ofqui Fault System, southern Chile. *Geophysical Journal International*, 207(3):1387–1400.
- Held, S., Schill, E., Schneider, J., Nitschke, F., Morata, D., Neumann, T., and Kohl, T. (2018). Geochemical characterization of the geothermal system at Villarrica volcano, Southern Chile; Part 1: Impacts of lithology on the geothermal reservoir. *Geothermics*, 74:226–239.
- Hickey-Vargas, R., Roa, H. M., Escobar, L. L., and Frey, F. A. (1989). Geochemical variations in Andean basaltic and silicic lavas from the Villarrica-Lanin volcanic chain (39.5° S): an evaluation of source heterogeneity, fractional crystallization and crustal assimilation. *Contributions to Mineralogy and Petrology 1989 103:3*, 103(3):361–386.
- Jordan, T. E., Matthew Burns, W., Veiga, R., Pángaro, F., Copeland, P., Kelley, S., and Mpodozis, C. (2001). Extension and basin formation in the southern Andes caused by increased convergence rate: A mid-Cenozoic trigger for the Andes. *Tectonics*, 20(3):308–324.
- Kapinos, G., Montahaei, M., Meqbel, N., and Brasse, H. (2016). Three-dimensional electrical resistivity image of the South-Central Chilean subduction zone. *Tectonophysics*, 666:76–89.
- Kresic, N. and Mikszewski, A. (2012). Hydrogeological Conceptual Site Models : Data Analysis and Visualization. *Hydrogeological Conceptual Site Models*.
- Lara, L. and Moreno, H. (2004). Geología del Área Liquiñe-Neltume, Regiones de La Araucanía y de Los Lagos. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 83, 23 p., 1 mapa escala 1:100.000. Technical report, Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Santiago.
- Lara, L. and Moreno, H. (2008). Geología del Área Pucón-Curarrehue Escala 1:100000 (No. 115). Regiones de la Araucanía y de Los Ríos. Technical report, Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Santiago.
- Lara, L., Rodríguez, C., Moreno, H., and Pérez de Arce, C. (2001). Geocronología K-Ar y geoquímica del volcanismo plioceno superior-pleistoceno de los Andes del sur (39-42°S). *Revista Geológica de Chile*, 28(1):67–90.
- López Moreno, J. I. (2008). Estimación de pérdidas de agua por evaporación en embalses del Pirineo. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 34(0):61.
- Lowell, T. V., Heusser, C. J., Andersen, B. G., Moreno, P. I., Hauser, A., Heusser, L. E., Schlüchter, C., Marchant, D. R., and Denton, G. H. (1995). Interhemispheric Correlation of Late Pleistocene Glacial Events. *Science*, 269(5230):1541–1549.

- Melnick, D., Rosenau, M., Folguera, A., and Echtler, H. (2006). Neogene tectonic evolution of the Neuquen Andes western flank (37–39°S). *Special Paper of the Geological Society of America*, 407:73–95.
- Ministerio de Obras Públicas (2014a). Evaluación de la condición trófica de la red de control de lagos de la DGA. Realizado por: MW Ambientales. Technical report, Dirección General de Agua, Chile, Santiago.
- Ministerio de Obras Públicas (2014b). Regío de la Araucanía fase 4 : Aprobación del estudio definitivo Tomo 4: Puentes Ingeniería básica. Estudio hidrológico - Puente Caburgua. Technical report, Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- MMA (2019). Análisis y evaluación de medidas de reducción de nutrientes (nitrógeno y fósforo) para incorporar al plan de descontaminación del lago Villarrica. Desarrollado por: Universidad de la Frontera. Technical Report 56, Ministerio del Medio Ambiente, Chile, Temuco.
- Molina, E., Arancibia, G., Sepúlveda, J., Roquer, T., Mery, D., and Morata, D. (2019). Digital Rock Approach to Model the Permeability in an Artificially Heated and Fractured Granodiorite from the Liquiñe Geothermal System (39°S). *Rock Mechanics and Rock Engineering* 2019 53:3, 53(3):1179–1204.
- MOP (1998). Estudios limnológicos de los Lagos Caburgua y Maihue. Desarrollado por: Universidad Austral. Technical report, Ministerio de Obras Públicas y Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- Munizaga, F., Herve, F., Drake, R., Pankhurst, R. J., Brook, M., and Snelling, N. (1988). Geochronology of the Lake Region of south-central Chile (39°–42°S): Preliminary results. *Journal of South American Earth Sciences*, 1(3):309–316.
- Negri, A., Daniele, L., Aravena, D., Muñoz, M., Delgado, A., and Morata, D. (2018). Decoding fjord water contribution and geochemical processes in the Aysen thermal springs (Southern Patagonia, Chile). *Journal of Geochemical Exploration*, 185:1–13.
- Pankhurst, R. J., Weaver, S. D., Hervé, F., and Larrondo, P. (1999). Mesozoic-Cenozoic evolution of the North Patagonian Batholith in Aysen, southern Chile. *Journal of the Geological Society*, 156(4):673–694.
- Pearce, R. K., de la Muela, A. S., Moorkamp, M., Hammond, J. O. S., Mitchell, T. M., Cembrano, J., Vargas, J. A., Meredith, P. G., Iturrieta, P., Pérez-Estay, N., Marshall, N. R., Smith, J., Yáñez, G., Griffith, W. A., Marquardt, C., Stanton-Yonge, A., and Núñez, R. (2020). Reactivation of Fault Systems by Compartmentalized Hydrothermal Fluids in the Southern Andes Revealed by Magnetotelluric and Seismic Data. *Tectonics*, 39(12):e2019TC005997.
- Pedroza, V., Le Roux, J. P., Gutiérrez, N. M., and Vicencio, V. E. (2017). Stratigraphy, sedimentology, and geothermal reservoir potential of the volcanoclastic Cura-Mallín succession at Lonquimay, Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 77:1–20.
- Pérez-Estay, N., Yáñez, G., Crempien, J., Roquer, T., Cembrano, J., Valdenegro, P., Aravena, D., Arancibia, G., and Morata, D. (2020). Seismicity in a Transpressional Volcanic Arc: The Liquiñe-Ofqui Fault System in the Puyuhuapi Area, Southern Andes, Chile (44°S). *Tectonics*, 39(11):e2020TC006391.
- Pérez-Flores, P., Cembrano, J., Sánchez-Alfaro, P., Veloso, E., Arancibia, G., and Roquer, T. (2016). Tectonics, magmatism and paleo-fluid distribution in a strike-slip setting: Insights from the northern termination of the Liquiñe-Ofqui fault System, Chile. *Tectonophysics*, 680:192–210.
- Pérez-Flores, P., Veloso, E., Cembrano, J., Sánchez-Alfaro, P., Lizama, M., and Arancibia, G. (2017). Fracture network, fluid pathways and paleostress at the Tolhuaca geothermal field. *Journal of Structural Geology*, 96:134–148.
- Pérez-Moreno, R., Reich, M., Daniele, L., Morata, D., Held, S., and Kleinsasser, J. (2021). Stable isotope and anthropogenic tracer signature of waters in an Andean geothermal system. *Applied Geochemistry*, 128:104953.

- Radic, J. (2010). Las cuencas cenozoicas y su control en el volcanismo de los Complejos Nevados de Chillán y Copahua-Callaqui (Andes del Sur, 36-39°S). *Andean Geology*, 37(1):220–246.
- Rosenau, M., Melnick, D., and Echtler, H. (2006). Kinematic constraints on intra-arc shear and strain partitioning in the southern Andes between 38°S and 42°S latitude. *Tectonics*, 25(4).
- Sánchez, P., Pérez-Flores, P., Arancibia, G., Cembrano, J., and Reich, M. (2013). Crustal deformation effects on the chemical evolution of geothermal systems: the intra-arc Liquiñe–Ofqui fault system, Southern Andes. <https://doi.org/10.1080/00206814.2013.775731>, 55(11):1384–1400.
- Sepúlveda, J., Arancibia, G., Molina, E., Gilbert, J. P., Duda, M., Browning, J., Roquer, T., Morata, D., Ahrens, B., and Bracke, R. (2020). Thermo-mechanical behavior of a granodiorite from the Liquiñe fractured geothermal system (39°S) in the Southern Volcanic Zone of the Andes. *Geothermics*, 87:101828.
- Siefeld, G., Lange, D., and Cembrano, J. (2019). Intra-Arc Crustal Seismicity: Seismotectonic Implications for the Southern Andes Volcanic Zone, Chile. *Tectonics*, 38(2):552–578.
- Stern, C. R., Moreno, H., López-Escobar, L., Clavero, J. E., Lara, L. E., Naranjo, J. A., Parada, M. A., and Alexandra Skewes, M. (2007). Chilean volcanoes.
- Tardani, D., Reich, M., Roulleau, E., Takahata, N., Sano, Y., Pérez-Flores, P., Sánchez-Alfaro, P., Cembrano, J., and Arancibia, G. (2016). Exploring the structural controls on helium, nitrogen and carbon isotope signatures in hydrothermal fluids along an intra-arc fault system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 184:193–211.
- UACH (2021). Nivel de agua Lago Caburgua- Universidad Austral de Chile. Technical report, Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- Villalobos, A., Easton, G., Maksymowicz, A., Ruiz, S., Lastras, G., De Pascale, G. P., and Agurto-Detzel, H. (2020). Active Faulting, Submarine Surface Rupture, and Seismic Migration Along the Liquiñe–Ofqui Fault System, Patagonian Andes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(9):e2020JB019946.
- Woelfl, S., Garcia, P., and Duarte, C. (2010). Chlorella-bearing ciliates (Stentor, Ophrydium) dominate in an oligotrophic, deep North Patagonian lake (Lake Caburgua, Chile). *Limnologica*, 40(2):134–139.
- Wrage, J., Tardani, D., Reich, M., Daniele, L., Arancibia, G., Cembrano, J., Sánchez-Alfaro, P., Morata, D., and Pérez-Moreno, R. (2017). Geochemistry of thermal waters in the Southern Volcanic Zone, Chile – Implications for structural controls on geothermal fluid composition. *Chemical Geology*, 466:545–561.

Anexos

A. Evaporación

Al no disponer de registros de evaporímetro de bandeja en las inmediaciones del lago Caburgua, la estimación de la evaporación desde la superficie es necesaria para la cuantificación del balance hídrico.

El proceso de evaporación depende de factores meteorológicos, como el viento, la presión atmosférica, temperatura del aire y radiación solar. En este estudio la evaporación fue estimada mediante la ecuación de Penman (Allen et al. 1998, López Moreno 2008).

Donde E_0 corresponde a la evaporación por unidad de área; Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor en $\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$; es la constante psicrométrica en $\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$; λ es el calor latente de vaporización en MJkg^{-1} , Rn es la radiación neta en $\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ y Ea es la componente aerodinámica. La estimación de los parámetros Rn , λ , Δ y Ea se describen a continuación:

La constante psicrométrica es $=0,66510^{-3}P$, donde P es la presión atmosférica en kPa .

La pendiente de la curva de presión de vapor puede estimarse como:

$$\Delta = 4096 \frac{[0,6108 \exp^{\frac{17,27T}{(T+237,3)^2}}]}{(T + 237,3)^2} \quad (\text{A.1})$$

Donde T es la temperatura del aire en $^\circ\text{C}$.

Por otra parte, la componente aerodinámica, ea , está dada por:

$$Ea = 0,35 \left(0,5 + 0,621375 \frac{U}{100}\right) 7,500638(es - ea) \quad (\text{A.2})$$

donde es es la presión de saturación, ea es la presión de vapor actual y están dados por las siguientes expresiones:

$$es = \frac{eTmax + eTmin}{2} \quad (\text{A.3})$$

$$ea = 0,6108 \exp^{\frac{17,27 T_{rocio}}{T_{rocio}+237,3}} \quad (\text{A.4})$$

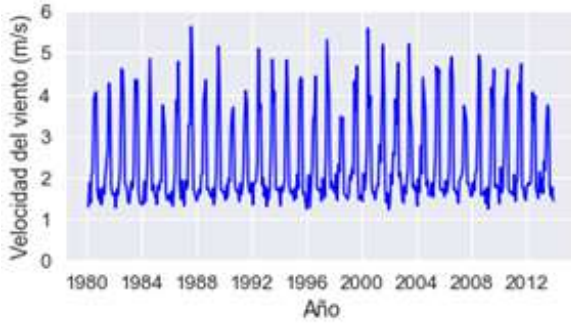
A continuación se presenta el análisis de información para la radiación solar y el viento sobre el lago Caburgua.

A.1. Viento

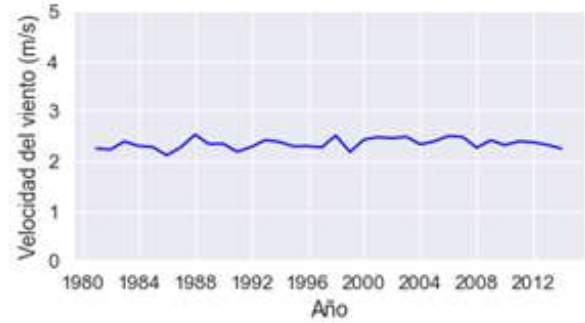
La velocidad media anual del viento, requerida para la estimación de evaporación desde el lago Caburgua, fue estimada considerando los resultados de las simulaciones del Explorador Eólico¹ del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile para una altura de 5,5 m. Luego, considerando un perfil de velocidad logarítmico fue posible estimar la serie de velocidad del viento para una altura de 2,0 m sobre el lago Caburgua y pudo determinarse que las series de viento no tienen tendencia. Las simulaciones del Explorador Eólico permitieron reconstruir datos de viento desde 1980 hasta 2013. Las Figura A.1a y Figura A.1b presentan las series de velocidad media del viento, mensual y anual, respectivamente, a una altura de dos metros de altura sobre el Lago Caburgua.

Por otra parte, las velocidades mayores del viento se estiman durante los meses de invierno y pueden alcanzar hasta los 4,1 m/s. En invierno las velocidades del viento están por debajo de 2,0 m/s (Figura A.1c), mientras que la velocidad media anual del viento a 2,0 m sobre el lago Caburgua es de 2,34 m/s.

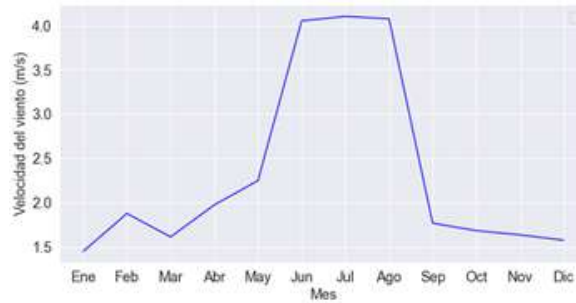
¹<http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/>



(a) Velocidad media mensual del viento a 2,0 m de altura sobre el lago Caburgua.



(b) Velocidad media anual del viento a 2,0 m de altura sobre el lago Caburgua.



(c) Variación estacional de la velocidad del viento.

Figura A.1: Velocidad del viento sobre el Lago Caburgua. Fuente: Elaboración propia con datos del Explorador Eólico.

A.2. Radiación solar

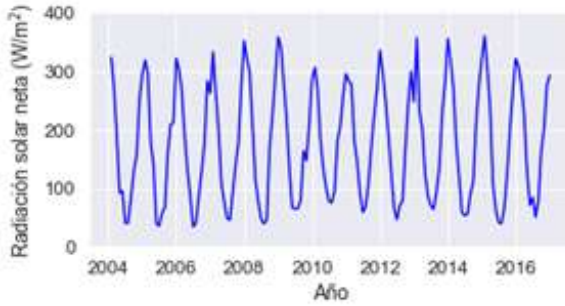
La radiación solar neta fue obtenida considerando los datos de las simulaciones del Explorador Solar². La radiación neta (R_n) se estimó como la diferencia entre la radiación global horizontal (ghi) y la radiación difusa reflejada (sct), ambas variables simuladas por el Explorador Solar. Bajo este análisis se estima una Radiación Neta media anual de $175,42 \text{ W/m}^2$

La radiación solar neta, R_n , es la diferencia entre la radiación incidente y la radiación reflejada.

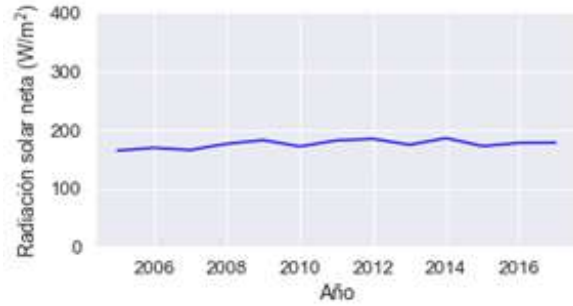
$$R_n = R_{\text{incidente}} - R_{\text{reflejada}} \quad (\text{A.5})$$

La Figura A.2a y A.2b, presentan la radiación solar neta mensual y anual sobre el lago Caburgua, respectivamente, mientras que la Figura A.2c. presenta la variación estacional de la radiación solar neta, que tiene valores máximos en el orden de 330 W/m^2 y mínimos del orden de 50 W/m^2 . Por otra parte, el período de simulación de radiación solar solo presenta resultados entre 2004 y 2016. Sin embargo, dada la estabilidad de esta variable en el tiempo, la climatología de radiación se consideró una aproximación válida para la estimación de la evaporación desde el lago Caburgua.

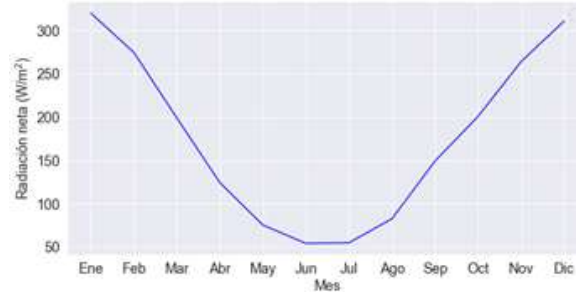
²<https://solar.minenergia.cl/exploracion>



(a) Radiación solar neta mensual sobre el Caburgua.



(b) Radiación solar neta anual sobre el Caburgua.



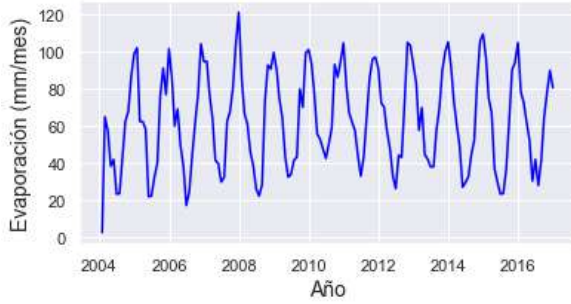
(c) Variación estacional de la radiación solar neta sobre el Caburgua.

Figura A.2: Radiación solar neta en el Lago Caburgua. Fuente: Elaboración propia con datos del Explorador Solar.

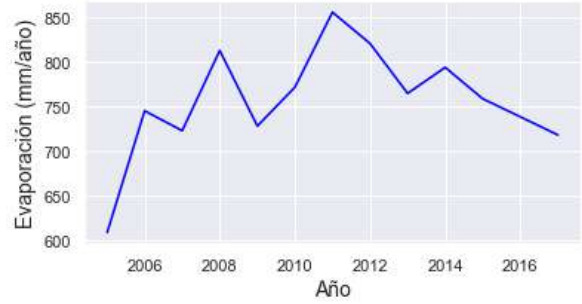
Por otra parte, la velocidad del viento que debe considerarse para la estimación de la evaporación es a una altura de 2,0 m, se consideró válido el perfil logarítmico para estimar la velocidad a 2,0 m de altura con base en un datos de altura a 5,5 m.

A.3. Estimación de la evaporación

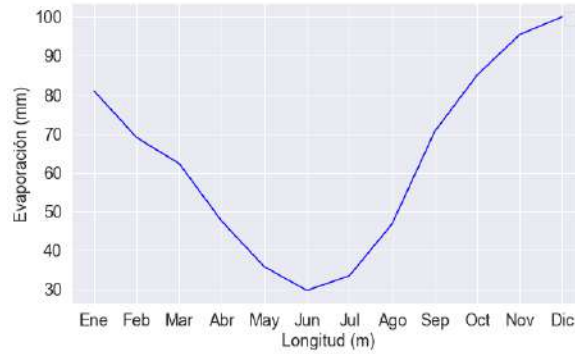
Dado que los cuerpos de agua lénticos pueden considerarse como una fuente *ilimitada* de agua, por lo tanto la evaporación potencial es igual a la evaporación potencial. La Figura A presenta la evaporación mensual, anual y la variación estacional estimadas con la metodología presentada en este Anexo. La tendencia de la evaporación en el tiempo no puede ser analizada, ya que el período de análisis tiene menos de 30 años de datos. Por otra parte, las mayores evaporaciones se presentan en los meses de verano y esto es esperable ya que durante este período del año, es cuando se presenta la mayor radiación solar neta (Figura A.3c). Adicionalmente, la serie indica que la evaporación de agua por unidad de área sobre el Lago es del orden de 2,3 mm/día .



(a) Evaporación mensual desde el lago Caburgia.



(b) Evaporación anual desde el lago Caburgia.



(c) Variación estacional de la Evaporación desde el lago Caburgia.

Figura A.3: Evaporación desde el Lago Caburgia. Fuente: Elaboración propia con base en la metodología planteada en el Anexo A.

B. Caudales máximos río Trafampulli

La estimación de los caudales máximos instantáneos sobre el río Trafampulli en el sector del desvío hacia el lago Caburgua se realizó considerando metodologías empíricas, ya que la cuenca no está instrumentada con estaciones fluviométricas. Se implementó las metodologías propuestas por DGA (1995) para la estimación de los caudales máximos instantáneos para el período de retorno de Tr 5 años y Tr 10 años.

1. Método regional

- Acorde a DGA (1995) se determinó que la zona homogénea a la cual pertenece la cuenca del río Trafampulli es la W_p y por lo tanto acorde a la Tabla 3.20 de DGA (1995) se obtiene de la curva de frecuencia regional que $Q(T)/Q(10) = 0,87$ para el período de retorno de 5 años.
- El caudal máximo diario para el período de retorno de 10 años, Q_{10} en m^3/s , se estimó considerando la siguiente expresión:

$$Q_{10} = 2 \cdot 10^3 A^{0,973} (P_{24}^{10})^{1,224} \quad (B.1)$$

Donde A es el área pluvial en km^2 y P_{24}^{10} es la precipitación máxima de período de retorno de 10 años, expresada en mm. La estimación de la precipitación máxima en 24 h, P_{24} , se realizó ponderando por el área los datos de precipitación máxima en 24 h de las estaciones Lago Caburgua, Lago Tinquilco y Tricauco. Luego se realizó un análisis de frecuencia para estimar la precipitación máxima en 24 h para el período de retorno de 10 años, P_{24}^{10} . Los datos de precipitación máxima fueron suministrados por la Dirección General de Aguas. En la carpeta Anexo B, formato digital, está la hoja de cálculo para la estimación de los caudales máximos del río Trafampulli.

- Posteriormente se determinó el factor α de la Tabla 3.24 de DGA (1995) para convertir el caudal medio diario máximo a caudal instantáneo máximo. Para la zona homogénea W_p , el coeficiente α es de 1,19.

2. Método de Verni y King Modificado

Este método relaciona el caudal instantáneo máximo de una crecida con la precipitación diaria máxima P_{24} y el área pluvial a través de una relación de potencias (DGA 1995). La estimación se hace mediante la siguiente expresión:

$$Q(T) = 0,00618 C(T) P_{24}^{1,24} A^{0,88} \quad (B.2)$$

donde Q es el caudal instantáneo máximo asociado al período de retorno T años, expresado en m^3/s , $C(T)$ es el coeficiente empírico de período de retorno T años, P_{24} es la precipitación diaria asociada al período de retorno T años, expresada en mm y A_p es el área pluvial en km^2 . Este método tiene validez para cuencas sin control fluviométrico, de régimen pluvial y nivopluvial con áreas entre 20 y 10.000 km^2 . Acorde a la Tabla 3.25 de DGA (1995) el coeficiente empírico para el período de retorno de 10 años en la IX región es 0,89.

3. Método de Racional modificado

El método racional es un método ampliamente utilizado en hidrología para cuencas pequeñas. DGA (1995) recomienda usar este método ajustando los coeficientes de escorrentía y rango de validez está entre 20 y 10.000 km^2 .

$$Q = \frac{C i A}{3,6} \quad (B.3)$$

donde Q es el caudal máximo instantáneo para el período de retorno T , en m^3/s , C es el coeficiente de escorrentía modificado asociado al período de retorno T , i es la intensidad de la lluvia asociado a una duración igual al tiempo de concentración pluvial, en mm/h y A es el área pluvial aportante expresada

en km.

El coeficiente de escorrentía para la IX región es: 0,28.

C. Calidad de agua

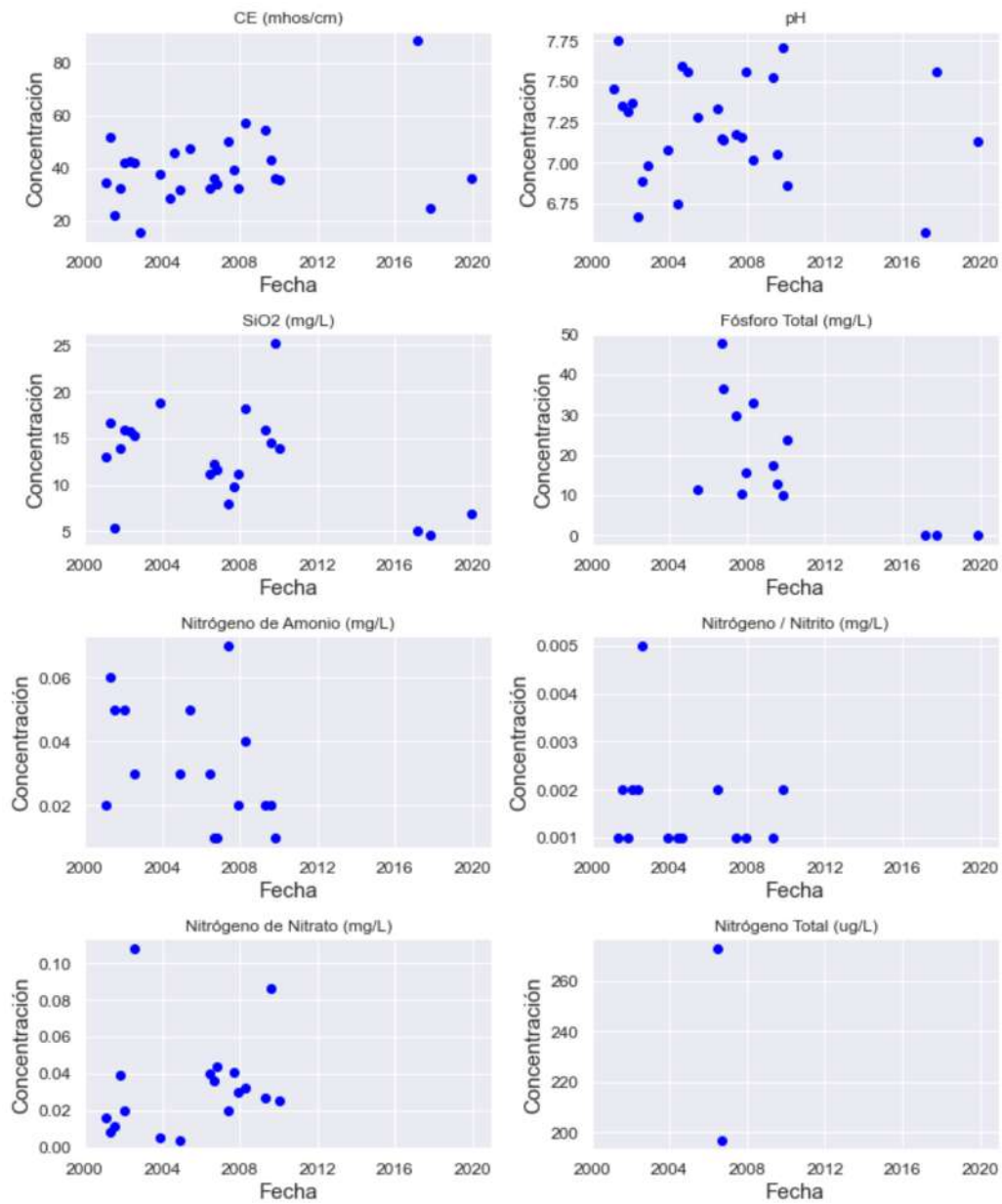


Figura C.1: Variación temporal de los parámetros medidos en la estación de calidad Lago Caburgua en Río Blanco. Fuente: Elaboración propia con datos tomados del *Inventario Público de Información Hidrológica y Meteorológica* de la Dirección General de Aguas.

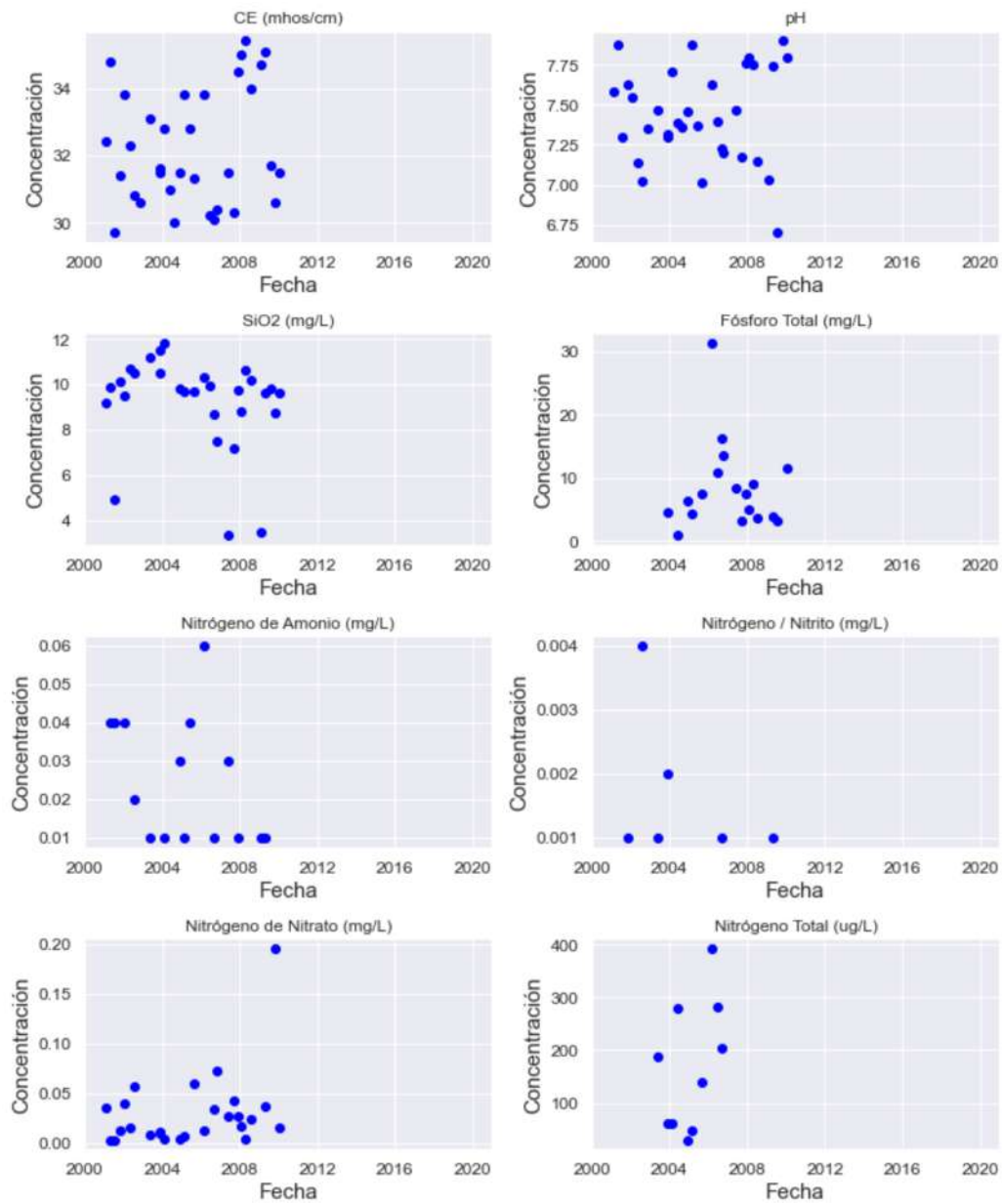


Figura C.2: Variación temporal de los parámetros medidos en la estación de calidad Lago Caburgua en Sector Norte. Fuente: Elaboración propia con datos tomados del *Inventario Público de Información Hidrológica y Meteorológica* de la Dirección General de Aguas.

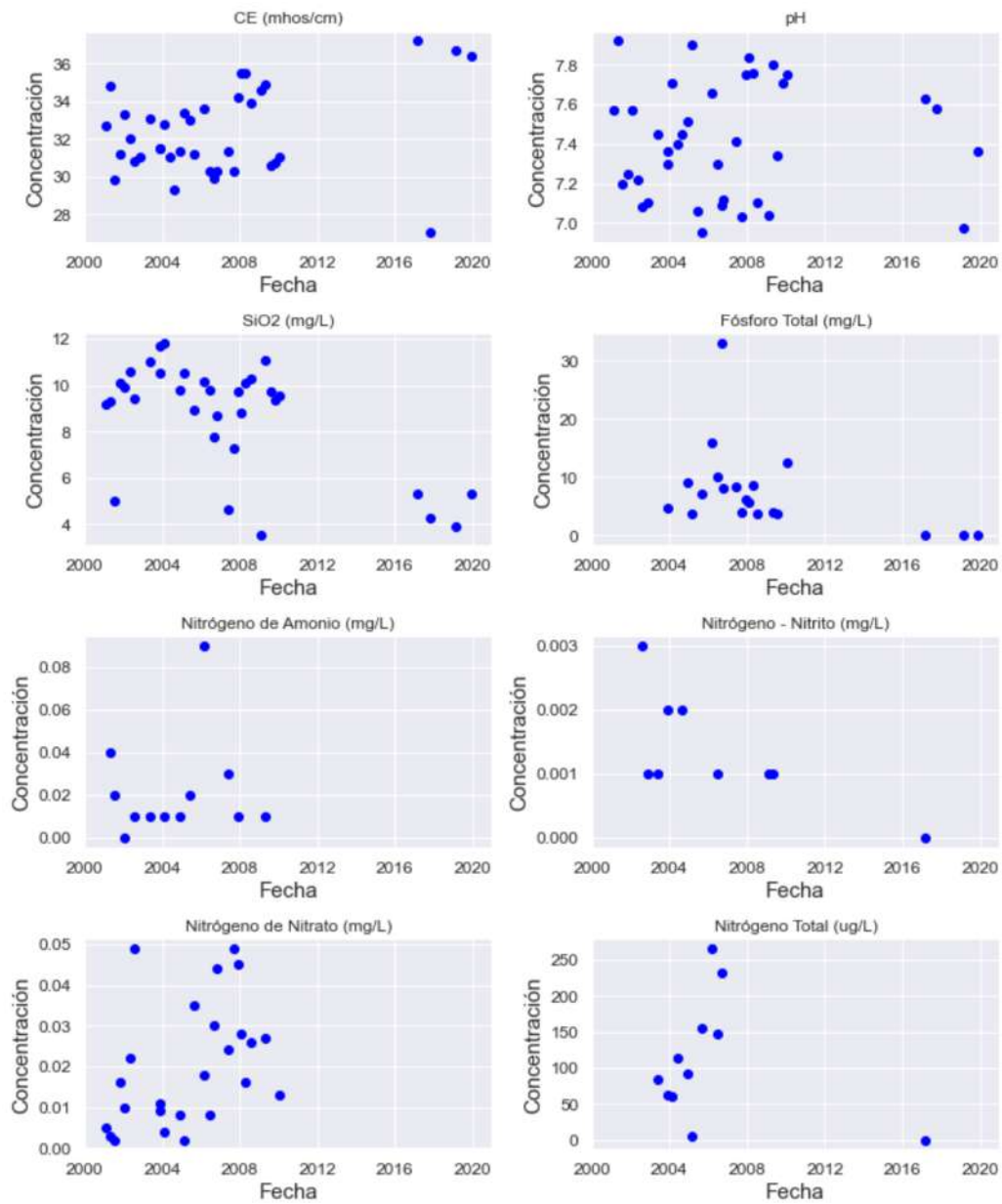


Figura C.3: Variación temporal de los parámetros medidos en la estación de calidad Lago Caburgua en Sector Desagüe. Fuente: Elaboración propia con datos tomados del *Inventario Público de Información Hidrológica y Meteorológica* de la Dirección General de Aguas.