



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS DE LA CUENCA DEL RÍO YELCHO, REGIÓN DE LOS LAGOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

VICTORIA SOLEDAD OPORTO GONZÁLEZ

PROFESORA GUÍA:

CARMEN COPIER MELLA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

MATÍAS TAUCARE TORO

LINDA DANIELE

SANTIAGO DE CHILE

2023

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Geóloga
ESTUDIANTE: Victoria Soledad Oporto González
FECHA: 2023
PROFESORA GUÍA: Carmen Copier Mella

RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS DE LA CUENCA DEL RIO YELCHO, REGIÓN DE LOS LAGOS

La cuenca del río Yelcho se ubica en la Provincia de Palena, en la Región de Los Lagos entre los paralelos 42° 15' y 43° 40' S y los meridianos 70° 55' y 72° 50' W, abarca una superficie total de 11.600 km² aproximadamente, correspondiendo 3900 km² a territorio chileno y 7.700 km² a territorio argentino.

De las formaciones geológicas presentes en la cuenca, destaca el Batolito Norpatagónico de composición principalmente granítica que aflora en la mayor parte del área de estudio, a excepción del sector oriental donde se presentan rocas volcano-sedimentarias. También destacan los depósitos sedimentarios del pleistoceno al holoceno los cuales se distribuyen en los valles formados como resultados de la erosión glacial.

Dentro de la cuenca se definen cinco unidades hidrogeológicas según la clasificación de Struckmeier & Margat (1995): (i) unidad de sedimentos saturados con agua con resistividades menores a 100 Ω m, interpretados como depósitos fluvio-glaciares compuestos principalmente por gravas, gravas arenosas y arenas. Se define como una unidad con un alto potencial hidrogeológico. En algunos sectores esta unidad presenta resistividades menores a 10 Ω m, lo que se interpreta como arcillas saturadas, las cuales poseen un bajo potencial hidrogeológico; (ii) unidad presente mayormente en superficie con resistividades entre los 1.000 Ω m y los 6.000 Ω m, interpretada como depósitos morrénicos y glaciofluviales no saturados, compuestas por bloques, gravas y arenas. Se define como una unidad con un bajo potencial hidrogeológico; (iii) unidad con resistividades entre los 100 Ω m y 1.000 Ω m, correspondiente a sedimentos no consolidados, sin saturación y con granulometrías variables. Se define que presentan un potencial hidrogeológico medio a bajo; (iv) unidad con un rango de resistividad entre los 1.000 y los 10.000 Ω m, correspondiente a rocas graníticas y rocas volcano-sedimentarias interpretadas como el basamento de la cuenca. Esta unidad presenta una permeabilidad secundaria debido a fallas presentes en el área de estudio, por lo que se infiere que puede poseer un medio a alto potencial hidrogeológico.

Las aguas subterráneas son clasificadas como bicarbonatadas cálcicas, por lo que se consideran como aguas relativamente jóvenes que poseen una fuente de recarga cercana, como la infiltración de aguas de lluvias.

AGRADECIMIENTOS

Quiero partir agradeciendo a mi familia, sin la cual no hubiera llegado a donde estoy, gracias por su apoyo y cariño. En especial agradezco a mi madre Rosa González, quién me acompañó en el proceso final de esta memoria, gracias por toda la paciencia y cariño que me entregaste, sin tu ayuda no lo hubiera logrado.

A Carlos, por estar a mi lado a lo largo de todo este proceso, por la paciencia y motivación en los momentos en los que creí no poder seguir. En verdad no me alcanzan las palabras para agradecer todo lo que has hecho por mí durante todos estos años. Te amo y gracias por siempre creer en mí.

A mis amigos de plan común, con los que compartí varios momentos graciosos y lindos durante los primeros años de universidad. En especial a Daniela, Constanza y Catalina, quienes pasaron a ser como mi familia, gracias por todos esos momentos de risas y llantos que hemos pasado juntas. Las quiero demasiado.

A mis amigos y compañeros de geología, Wilki, Francis, Matí, Jaime, Palo, Cami, Guille, Kim, Tille, Kelo y Kirty por su compañía, consejos y risas. No puedo dejar de agradecer a la Pau, con quien nos animamos y acompañamos en este último momento de entrega de la memoria.

A la profesora Carmen Copier por la oportunidad de poder desarrollar esta memoria bajo su guía, por su confianza y enseñanzas tanto profesionales como de la vida. Al profesor Matías Taucare y a la profesora Linda Daniele por su disposición para responder mis dudas y entregarme observaciones de cómo mejorar.

Al equipo de Geosafe S.A., en especial a Rodrigo Meneses por toda la ayuda que me brindó al desarrollar esta memoria, gracias por la paciencia y la simpatía.

Al equipo de Difusión Colegios y en especial a la Pili, quién me aconsejó en momentos en que me vi aproblemada en esta etapa.

Finalmente, pero no menos importante, a todos mis compañeros perrunos con los que he compartido a lo largo de mi vida. Gracias por su amor incondicional.

Tabla de contenido

1. Introducción.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.3 Ubicación y acceso	3
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 Objetivo General	4
1.4.2 Objetivos Específicos.....	4
1.5 Metodología de Trabajo.....	5
1.5.1 Recopilación de Antecedentes	5
1.5.2 Análisis de prueba de bombeo	5
1.5.3 Determinación de unidades hidrogeológicas.....	5
1.5.4 Geometría de relleno	5
1.5.5 Caracterización de aguas subterráneas y superficiales.....	5
1.6 Antecedentes bibliográficos.....	6
1.7 Clima.....	6
1.8 Hidrografía.....	8
2. Marco Geográfico.....	9
2.1 Geomorfología	9
2.2 Uso de Suelos.....	10
3. Marco Geológico	13

3.1 Geología regional.....	13
3.1.1 Geología estructural	16
3.2 Geología local	17
3.2.1 Rocas estratificadas	17
3.2.2 Rocas intrusivas.....	18
3.2.3 Rocas metamórficas	18
4. Caracterización Hidrológica.....	19
4.1 Precipitación	20
4.2 Temperatura	25
4.3 Caudales.....	27
4.4 Evapotranspiración	30
4.5 Extracciones.....	33
4.5.1 Superficiales	33
4.5.2 Subterráneas	34
5. Caracterización Hidrogeológica	38
5.1 Unidades hidrogeológica	38
5.1.1 Unidades hidrogeológicas	38
5.1.2 Distribución de unidades	40
5.2 Geometría de relleno.....	48
5.3 Parámetros hidráulicos.....	50

5.3.1 Transmisividades.....	51
5.3.2 Coeficiente de almacenamiento	53
6. Caracterización geoquímica	54
6.1 Parámetros fisicoquímicos.....	54
6.1.1 pH.....	55
6.1.2 Temperatura	55
6.1.3 Conductividad eléctrica.....	55
6.1.4 Potencial Redox (ORP).....	55
6.2 Análisis Químicos.....	56
6.2.1 Diagrama de Piper	57
6.2.2 Diagrama de Stiff	59
6.3 Calidad de agua.....	60
7. Discusiones.....	64
8. Conclusiones.....	66
9. Bibliografía.....	69
Anexos	75
Anexo A: Ensayos de Bombeo	75
Anexo B: Muestras de Agua.....	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Cuenca del río Yelcho. El área de estudio corresponde a la parte chilena. Fuente: Elaboración propia.....	2
Fig. 2. Ubicación y acceso de la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia ocupando como mapa base Google Maps.....	4
Fig. 3. Tipos de climas presentes en la cuenca del río Yelcho según la clasificación realizada por Köppen (1884) y modificada en Sarricolea P. et al. (2016). Fuente: Sarricolea P. et al., 2016.	7
Fig. 4. Hidrografía de la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del BNA.....	9
Fig. 5. Uso de suelos en la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia a partir del Catastro uso de suelos y vegetación de la CONAF (2013).	11
Fig. 6. Tipos de suelos presentes en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir del Harmonized World Soil Database, 2012.	13
Fig. 7. Distribución de las unidades litológicas, zonas de fallas principales y volcanes dentro de la X Región. Fuente: Extraído de Cembrano & Lara (2009).....	16
Fig. 8. Mapa que muestra las unidades geológicas presentes en la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia a partir del mapa de Chile 1:1.000.000 del SERNAGEOMÍN.	19
Fig. 9. Estaciones pluviométricas con influencia en la cuenca del río Yelcho. Al lado derecho se muestra los polígonos de Thiessen que muestra las áreas de influencia de cada estación pluviométrica. Fuente: Elaboración propia.	21
Fig. 10. Comparación de las series de precipitación anual medidos por la DGA (azul) y las modeladas por el CR2MET (rojo). Fuente: Elaboración propia con datos de precipitación de la DGA y del CR2Met.....	23
Fig. 11. Media mensual de la precipitación obtenida de cada estación presente en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la plataforma Mawün basados en datos de la DGA y CR2MET.....	24
Fig. 12. Estaciones meteorológicas con influencia en la cuenca del río Yelcho. Al lado derecho se observa los polígonos de Thiessen que muestra las áreas de influencia de cada estación. Fuente: Elaboración propia.	25
Fig. 13. Temperatura media anual de las estaciones (en azul) y la línea de tendencia (línea roja) de las estaciones a) Chaitén Ad. b) Futaleufú Ad. y c) Alto Palena Ad. Fuente: Elaboración propia.....	27
Fig. 14. Estaciones con información de caudales en la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia.....	28
Fig. 15. (a) Caudales medios anuales (en azul) con línea de tendencia (línea roja) y (b) variación estacional de caudales de las estaciones pluviométricas en la cuenca. Fuente: Elaboración propia con datos de caudales del explorador climático.....	30
Fig. 16. DAA Superficiales en la cuenca del río Yelcho. Elaboración propia en base a datos de la DGA (2022).	34

Fig. 17. DAA subterráneas en la cuenca del río Yelcho. Elaboración propia en base a datos de la DGA (2022).	37
Fig. 18. Mapa Hidrogeológico de la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia. ..	39
Fig. 19. Perfil Hidrogeológico esquemático del sector de Futaleufú. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos TEM.	41
Fig. 20. Perfil Hidrogeológico esquemático del sector del Lago Espolón. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos TEM.	42
Fig. 21. Perfil Hidrogeológico esquemático del sector de Palena. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos TEM.	43
Fig. 22. Perfil Hidrogeológico esquemático del sector de la confluencia del río Azul y el río Futaleufú. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos TEM.	44
Fig. 23. Perfil Hidrogeológico esquemático del sector de la laguna La Paz. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos TEM.	45
Fig. 24. Perfil Hidrogeológico esquemático del sector norte del lago Yelcho. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos TEM.	46
Fig. 25. Perfil Hidrogeológico esquemático del sector sur del lago Yelcho. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos TEM.	47
Fig. 26. Perfil Hidrogeológico esquemático del sector del río Futaleufú. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos TEM.	48
Fig. 27. Profundidad del basamento de la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia.	49
Fig. 28. Perfil gravimétrico 1 correspondiente al tramo río Amarillo- Lago Yelcho. Fuente: Elaborado por el equipo geofísico del proyecto.	49
Fig. 29. Perfil gravimétrico 3 correspondiente al tramo Santa Lucia – Futaleufú. Fuente: Elaborado por el equipo geofísico del proyecto.	49
Fig. 30. Ubicación de pozos con información de ensayos de bombeo. Fuente: Elaboración propia.	51
Fig. 31. Valores de transmisividad obtenidos acorde a la información de los pozos ND-1005-830, Escuela Las Escalas y Escuela El límite. Fuente: Elaboración propia.	53
Fig. 32. Parámetros fisicoquímicos (pH, temperatura, conductividad eléctrica y potencial redox) para muestras de agua de vertientes, aguas superficiales y aguas subterráneas. Fuente: Elaboración propia.	54
Fig. 33. Distribución de las muestras de agua tomadas en el área de estudio. Fuente: elaboración propia.	57
Fig. 34. Diagrama de Piper para muestras de agua tomadas dentro de la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia.	58
Fig. 35. Diagramas de Stiff de las muestras y su distribución dentro de la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia.	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Subdivisión del área de estudio.	2
Tabla 2. Antecedentes recopilados de la cuenca del río Yelcho y la información utilizada según corresponda.	6
Tabla 3. Lagos presentes en la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia a partir del Catastro de Lagos de la DGA.	8
Tabla 4. Uso de suelos definidos para la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de CONAF (2013).	11
Tabla 5. Información de las estaciones con influencia en la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia.	21
Tabla 6. Precipitación media anual para los periodos entre 1979-2009 y 2010-2020 para cada estación.	22
Tabla 7. Información de las estaciones de temperatura con influencia en la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia.	26
Tabla 8. Información de las estaciones de caudal con influencia en la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos del CR2.	28
Tabla 9. Calculo evapotranspiración sector Chaitén. Fuente: Elaboración propia.	31
Tabla 10. Calculo evapotranspiración sector Futaleufú. Fuente: Elaboración propia.	32
Tabla 11. Calculo evapotranspiración sector Palena. Fuente: Elaboración propia.	32
Tabla 12. Calculo evapotranspiración sobre la cuenca. Fuente: Elaboración propia.	32
Tabla 13. DAA superficiales en la cuenca según el tipo y el ejercicio del DAA.	33
Tabla 14. Expedientes de pozos encontrados para la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DGA.	35
Tabla 15. Pozos construidos por la Municipalidad de Futaleufú. Fuente: Elaboración propia a partir de informes técnicos.	36
Tabla 17. Información de pozos en la cuenca del río Yelcho que cuentan con ensayos de bombeo. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DGA.	50
Tabla 18. Datos de la transmisividad y coeficiente de almacenamiento del pozo ND-1005-830. Fuente: Elaboración propia a partir de la información del expediente del pozo ND-1005-830.	51
Tabla 19. Valores de transmisividad obtenidos. Fuente: Elaboración propia a partir de expedientes y de informes técnicos de pozos.	52
Tabla 20. Clasificación del acuífero según transmisividad. Fuente: Iglesias, 2002 en CENTER 2009.	52
Tabla 21. Ubicación de las muestras de agua tomadas en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.	56
Tabla 22. Comparación de la concentración de elementos mayoritarios entre los valores típicos de aguas dulces y los valores de las muestras.	59
Tabla 23. Comparación de los valores de parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua subterránea con la norma chilena de calidad de agua potable. Fuente: Elaboración propia.	61

Tabla 24. Comparación de los valores de parámetros fisicoquímicos en los expedientes de los pozos de la escuela El Límite y Las Escalas con la norma chilena de calidad de agua potable. Fuente: Elaboración propia.	62
Tabla 25. Valor de parámetros físicos en los expedientes de los pozos de la escuela El Límite y Las Escalas. Fuente: Elaboración propia.	62
Tabla 26. Valor de parámetros microbiológicos en los expedientes de los pozos de la escuela El Límite y Las Escalas. Fuente: Elaboración propia.....	62

1. Introducción

Los recursos hídricos subterráneos desempeñan un papel fundamental para el desarrollo de la vida. Sin embargo, hoy en día se hace uso de estos recursos sin tener una idea clara de la tasa de renovación y de los procesos de recarga de los acuíferos. Es por esto que es necesario conocer cómo funcionan los sistemas y los procesos subterráneos que tienen lugar en una cuenca, para así poder llevar un mejor manejo de los recursos hídricos que permita solventar las necesidades a mediano y largo plazo.

La Dirección General de Aguas (DGA) es una división dentro del Ministerio de Obras Públicas (MOP), cuyas atribuciones son promover la gestión y administración del recurso hídrico y de su asignación eficiente, por medio de la asignación de derechos de aprovechamiento de agua. Si bien el sistema de gestión del agua en Chile ha sido eficaz en el acceso a los recursos hídricos por parte de actividades productivas, satisfaciendo la demanda que ha ido en aumento, el permanente aumento en el uso de los recursos hídricos sumado a las condiciones climáticas presentes en la última década ha conllevado a que se tenga una incertidumbre sobre la real disponibilidad hídrica en el mediano y largo plazo.

En este ámbito, la DGA desde el año 2019 está promoviendo la elaboración de “Planes Estratégicos de Gestión Hídrica-PEGH” en diferentes cuencas de Chile con el objetivo de determinar los acuíferos existentes en la región, caracterizar sus recursos, en cuanto a cantidad y calidad, analizar sus potencialidades de uso y hacer recomendaciones para su protección y gestión. (DGA, 2020).

Este estudio, forma parte del PEGH de la cuenca del río Yelcho, ubicada en la región de Los Lagos, la cual posee una gran cantidad de recursos hídricos, conformados principalmente por cursos de agua de origen nivo, pluvial y níveo – pluvial, los cuales forman vastos sistemas hidrológicos que incluyen ríos, esteros, lagunas y lagos y que son explotados por distintos rubros productivos. Sin embargo, con el creciente desarrollo de la región, se ha tenido un aumento de la demanda hídrica por parte de estos rubros lo que se ha traducido en la disminución de la disponibilidad e incluso en el agotamiento del agua en algunos sectores (DGA, 2017).

En este sentido, con esta memoria se busca aportar con información sobre las características hidrogeológicas e hidrogeoquímicas de la cuenca del río Yelcho y aportar así a la gestión de sus recursos hídricos subterráneos.

1.1 Generalidades

La cuenca del río Yelcho (Fig. 1) es una cuenca binacional ubicada en la Región de Los Lagos, Chile y en la provincia de Chubut, Argentina entre los paralelos 42° 15' y 43° 40' de latitud sur y los meridianos 70° 55' y 72° 50' de longitud Oeste (Centro de Energía, 2016), abarcando una superficie de 11.600 km² aproximadamente, correspondiendo 3.900 km² al

territorio chileno y 7.700 km² a Argentina. Este estudio aborda el sector de la cuenca en territorio chileno.

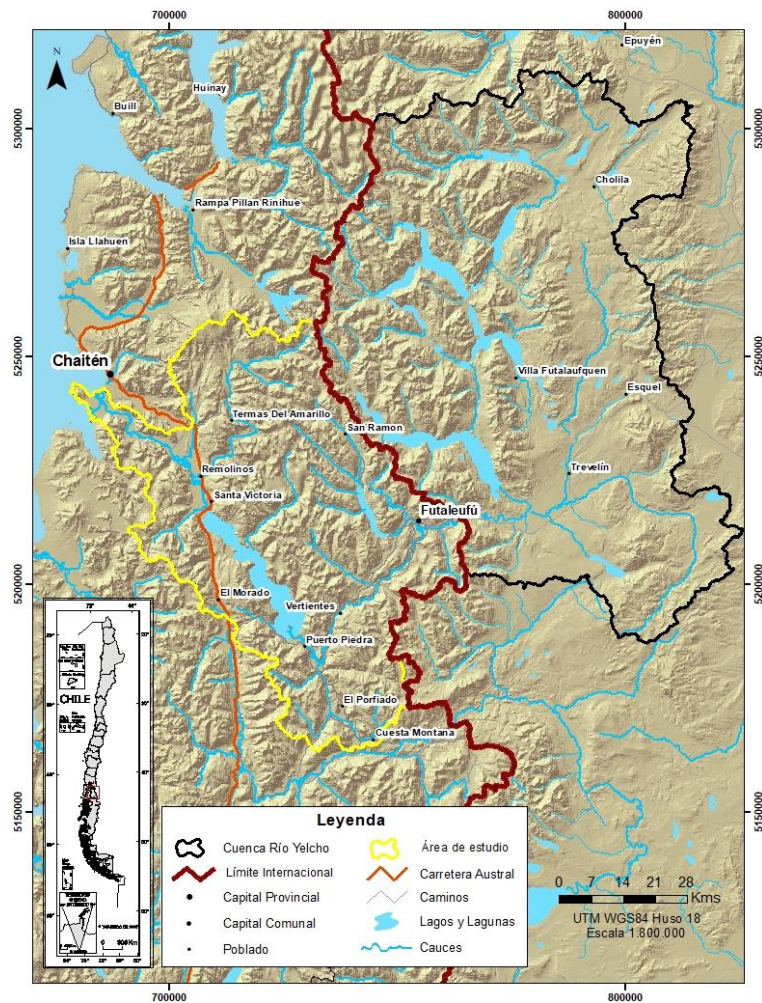


Fig. 1. Cuenca del río Yelcho. El área de estudio corresponde a la parte chilena. Fuente: Elaboración propia.

Según el “Inventario Nacional de Cuencas de la DGA”, en el territorio chileno la cuenca del río Yelcho presenta dos subcuencas hidrológicas, correspondientes a la del río Futaleufú, la cual presenta una superficie de 1922.3 km² y a la subcuenca del río Yelcho, con una superficie de 2162,4 km². En la Tabla 1 se muestran las subdivisiones dentro de la cuenca del río Yelcho.

Tabla 1. Subdivisión del área de estudio.

Subcuenca	Subsubcuenca	Área [km ²]
-----------	--------------	-------------------------

Río Yelcho	Lago Yelcho	844,7
	Río Yelcho Entre Desagüe Lago Yelcho y Río Amarillo	497,6
	Río Amarillo	610,7
	Río Yelcho entre Río Amarillo y desembocadura	209,4
Río Futaleufú	Río Blanco y Río Espolón Hasta Desembocadura Lago Espolón	301,5
	Lago Espolón y Río Espolón en junta Río Futaleufú	301,5
	Río Futaleufú entre frontera y Río Azulado	339,9
	Río Futaleufú arriba Río Azulado y Río Azul	411,5
	Río Futaleufú entre arriba Río Azul y Lago Yelcho	567,7

1.3 Ubicación y acceso

El principal acceso al área de estudio desde la ciudad de Puerto Montt es por la Ruta 7, donde existen tres alternativas de ingreso desde este punto. La primera es tomando los ferries de Naviera Austral que llegan directo a Chaitén, con 9 horas de viaje. Otra opción es entrar por Chiloé para luego tomar un ferry en Quellón hacia Chaitén. Por último, se tiene la opción de llegar por el lado oriente, que combina viajes por tierra y tres ferries. La cuenca se encuentra a unos 345 km aproximadamente de Coyhaique y desde este punto, la vía de acceso corresponde a la Ruta 7, también conocida como Carretera Austral. En la Fig. 2 se observan las cuatro vías de acceso al área de estudio.

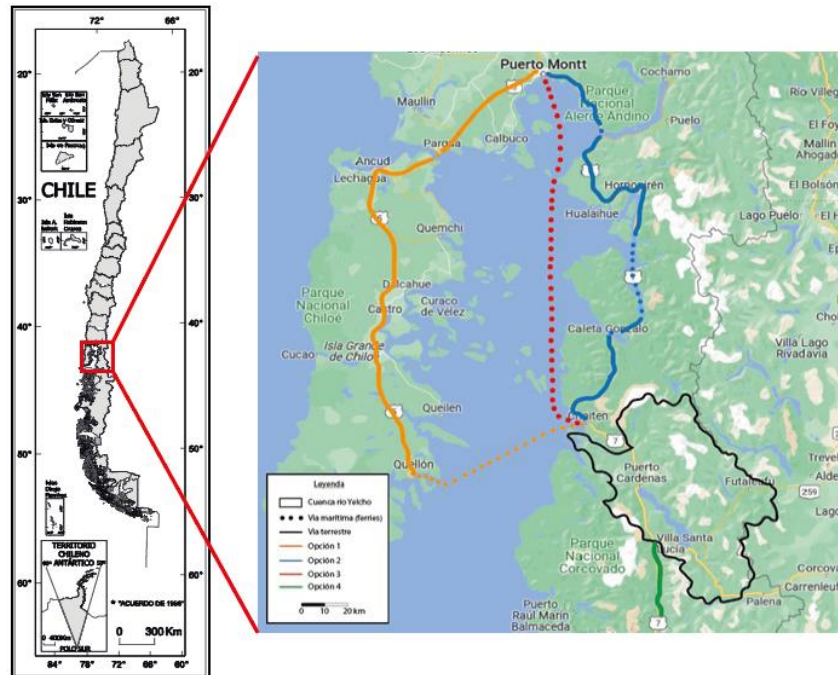


Fig. 2. Ubicación y acceso de la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia ocupando como mapa base Google Maps.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

El objetivo de esta memoria es el de realizar una caracterización hidrogeológica e hidroquímica del agua subterránea de la cuenca del río Yelcho.

1.4.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos necesarios para cumplir el objetivo general son:

- Obtener una base de información existente hasta la fecha de las distintas materias en relación con la hidrogeología de la cuenca del río Yelcho.
- Caracterizar la hidrología de la cuenca del río Yelcho.
- Estimar los parámetros hidráulicos del sistema.
- Definir unidades hidrogeológicas presentes en la cuenca del río Yelcho.
- Analizar los parámetros fisicoquímicos de aguas subterráneas y superficiales.
- Evaluar la calidad de las aguas subterráneas y superficiales.

1.5 Metodología de Trabajo

Con el propósito de cumplir con los objetivos planteados, el trabajo fue estructurado en las siguientes etapas, que se presentan a continuación:

1.5.1 Recopilación de Antecedentes

Se realiza la recopilación y análisis de información existente con respecto a la geología, hidrología e hidrogeología de la cuenca del río Yelcho. Así mismo, se recopila información de pozos construidos dentro de la zona de estudio.

1.5.2 Análisis de prueba de bombeo

Para poder determinar los parámetros hidráulicos del sistema, se ocuparon los expedientes de DAA subterráneos de la DGA con registro de ensayos bombeo de la DGA existentes en la cuenca. Para el análisis de estos datos se utilizó el software AquiferTest.

1.5.3 Determinación de unidades hidrogeológicas

Para este estudio, las unidades hidrogeológicas y su geometría fueron caracterizadas en base a la información geológica a escala 1:1.000.000 del SERNAGEOMIN, mediciones geofísicas (TEM) e información estratigráfica presente en expedientes de la DGA. Los perfiles hidrogeológicos fueron confeccionados a partir de los perfiles resultantes de las mediciones de transiente electromagnéticos (TEM), identificando e interpretando zonas de resistividad con la geología presente en el área de estudio.

1.5.4 Geometría de relleno

La geometría fue definida en base a información geofísica, geología e imágenes satelitales. En base a la gravimetría, se obtiene la profundidad y distribución espacial del basamento dentro de lo considerado como relleno sedimentario.

1.5.5 Caracterización de aguas subterráneas y superficiales

La caracterización de las aguas tanto superficiales como subterráneas, se realizó a partir de la información hidroquímica de muestras obtenidas dentro de la cuenca del río Yelcho. Los datos de muestras entregados para esta memoria fueron obtenidos de dos formas:

- i) Toma de parámetros in-situ: Medición a través de un tester multiparámetro de pH, temperatura, conductividad eléctrica y sólidos disueltos en lagos, lagunas y pozos.
- ii) Toma y análisis de muestras: Toma de muestras de agua en pozos y vertientes de la zona de estudio con la intención de medir cationes y aniones.

Los datos de los análisis químicos fueron analizados por medio de gráficos (diagramas de Piper y Stiff) para su caracterización e identificación de facies, mientras que para la evaluación de calidad se compararon los resultados insertos en las normativas nacionales.

1.6 Antecedentes bibliográficos

En la Tabla 2 se muestran estudios previos relacionados con la geología realizados en la cuenca del río Yelcho junto con la información recopilada de ellos.

Tabla 2. Antecedentes recopilados de la cuenca del río Yelcho y la información utilizada según corresponda.

Antecedentes Bibliográficos	Información Utilizada
Análisis de caudales de reserva de agua superficial en la cuenca del río Yelcho para el abastecimiento de la población, región de Los Lagos. (DGA, 2017)	-
Recursos naturales y proyectos. Región de Los Lagos, Provincia de Palena, comuna de Chaitén. (Cirén, 2017)	Información de la geología y la geomorfología la comuna de Chaitén
Recursos naturales y proyectos. Región de Los Lagos, Provincia de Palena, comuna de Futaleufú. (Cirén, 2017)	Información de la geología y la geomorfología la comuna de Futaleufú
Evaluación de los recursos geotérmicos de la región de Los Lagos	Geología regional
Determinación del potencial hidroeléctrico XI Región y provincia de Palena X Región.	Antecedentes generales de la cuenca

1.7 Clima

Según la clasificación realizada por Köppen (1884) y modificada en Sarricolea P. et al. (2016), dentro de la cuenca del río Yelcho se presentan las siguientes zonas climáticas (Fig. 3):

- **Tundra (ET):** Se caracteriza por temperaturas medias entre los 0°C y 10°C en los meses más cálidos, con escasas precipitaciones.

- Mediterráneo de lluvia invernal (Csb): Clima con inviernos fríos o templados y veranos secos y frescos. Las lluvias se dan mayormente en invierno o en estaciones intermedias. Las temperaturas medias varían entre los -3°C a los 18°C .
- Mediterráneo de lluvia invernal de altura (Csb (h)): Se caracteriza por veranos secos en altura y precipitaciones en invierno. Las temperaturas medias no superan los 22°C .
- Mediterráneo frío de lluvia invernal (Csc): Clima influenciado por la altura, temperaturas medias que no superan los 10°C .
- Templado lluvioso (Cfb): Clima con inviernos fríos templados y veranos frescos con precipitaciones bien distribuidas a lo largo del año.
- Templado lluvioso frío (Cfc): Clima con inviernos fríos y lluvias durante todo el año. Con menos de cuatro meses al año con temperatura media superior a los 10°C .

De la Fig. 3 se puede observar que dentro de la cuenca del río Yelcho predomina el clima templado lluvioso, que se caracteriza por inviernos fríos templados y veranos frescos con precipitaciones durante todo el año que alcanzan a superar los 2.000 mm anuales y con temperaturas anuales entre los 4°C y los 8°C (Ministerio de Obras Públicas, 1987; Errazuriz et. al., 1998 en Centro de Energías, 2016).

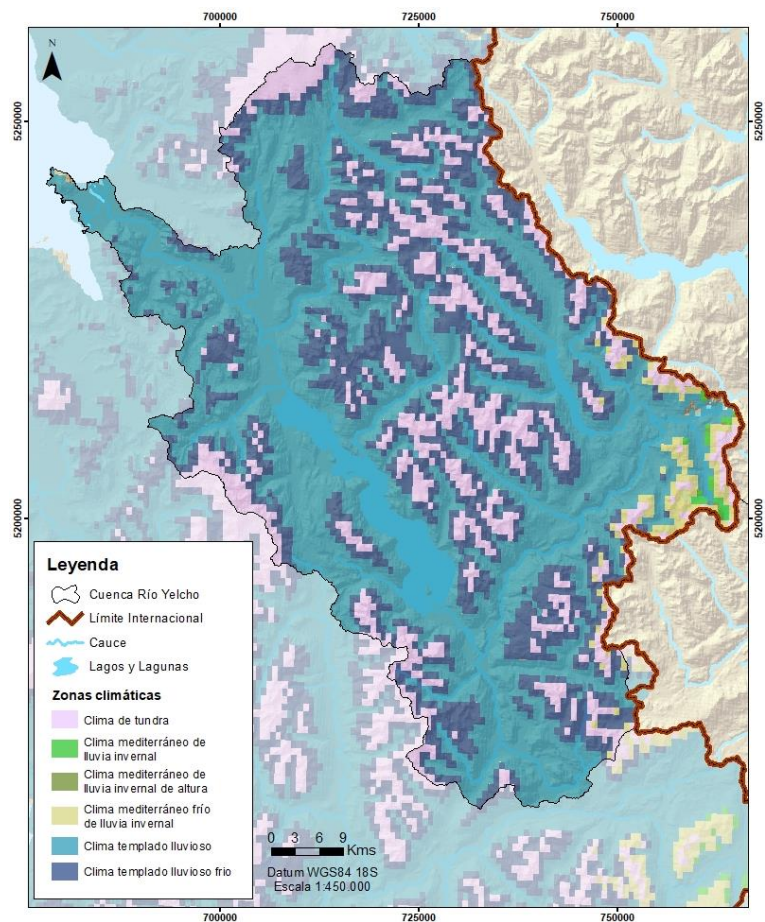


Fig. 3. Tipos de climas presentes en la cuenca del río Yelcho según la clasificación realizada por Köppen (1884) y modificada en Sarricolea P. et al. (2016). Fuente: Sarricolea P. et al., 2016.

Hacia el interior de la cuenca se presenta el efecto de un clima tipo tundra típico del área oriental de la Cordillera de los Andes con un menor régimen de precipitación y temperaturas menores (MOP, 1984).

1.8 Hidrografía

La hidrografía de la cuenca del río Yelcho está caracterizada por una gran cantidad de ríos, esteros y quebradas. Los principales ríos dentro de la cuenca se presentan a continuación:

- **Río Yelcho:** Posee una longitud de 206 km. Nace en el lago Yelcho y desemboca en el mar al sur de la localidad de Chaitén. Recibe sus principales aportes del río Michinmahuida y del río Amarillo, entre otros cauces menores.
- **Río Futaleufú:** De una longitud de unos 173 km aproximados en el sector chileno. Nace en Argentina, entra a Chile cruzando por la Cordillera de los Andes y desemboca en el lago Yelcho. Sus principales afluentes son el río Espolón y el río Malito, pero recibe el aporte de varios cauces menores.
- **Río Michinmahuida:** Posee una longitud de 115 km. Nace en el sector norte de la cuenca, en las laderas sur del volcán homónimo y fluye hasta desembocar en el río Yelcho.

Por otro lado, el lago Yelcho corresponde al mayor cuerpo de agua dentro de la cuenca. En el Inventario Público de Lagos de la DGA se describen otros tres lagos menores junto con un total de 76 lagunas menores al interior de la cuenca (Centro de Energía, 2016). Los detalles de los lagos se presentan a continuación en la Tabla 3:

Tabla 3. Lagos presentes en la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia a partir del Catastro de Lagos de la DGA.

Nombre	Tipo	Área [km²]
Lago Yelcho	Lago Principal	118,2
Lago Espolón	Lagos Menores	14,2
Lago Lonconao	Lagos Menores	2,61
Laguna Del Noroeste	Lagos Menores	1,94

Tanto el lago Yelcho como el río Futaleufú le dan el nombre a las dos subcuencas en las que se divide la cuenca del río Yelcho, las cuales se observan en la Fig. 4.

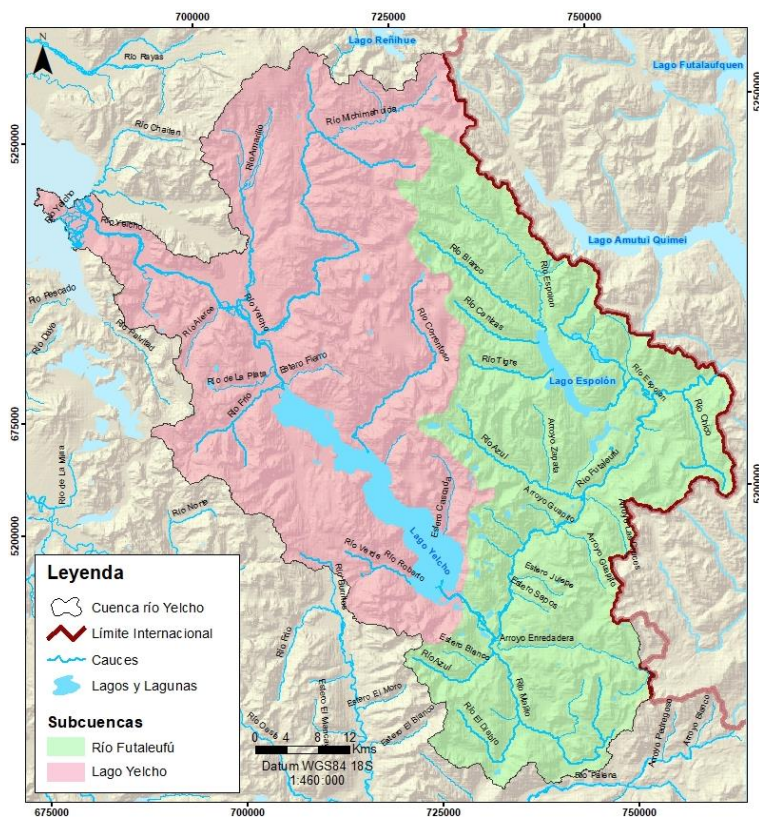


Fig. 4. Hidrografía de la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del BNA.

2. Marco Geográfico

2.1 Geomorfología

Según el mapa de dominios morfoestructurales presente en Sernageomin (2003) el área de estudio se enmarca en el sector sur de la región de Los Lagos, en donde la depresión intermedia se sumerge en el mar, formando islas, fiordos y canales que forman el Archipiélago de Chiloé y el territorio pasa a estar conformado por la Cordillera de Los Andes.

En Tassara y Yañez (2003), se muestra que la zona de estudio se encuentra en el segmento conocido como Cordillera Patagónica (39-47°S). La cual posee una orientación mayormente norte-sur y se caracteriza por una menor altura con respecto a los tramos centrales, con presencia de geoformas producto de la acción glaciaria como lagos, circos glaciares, morrenas y extensos campos de hielo (Guerrero et al., 2011)

Hacia el oriente se tiene la comuna de Futaleufú, cuyo paisaje se caracteriza por estar modelado por procesos de erosión de origen glaciario y aportes de fragmentos piroclásticos.

Se presentan grandes formaciones rocosas, las cuales no presentan vegetación alguna en sus cumbres, farellones profundamente labrados por acción de los hielos y material inestable sujeto a deslizamientos y derrumbes. Los valles intermedios se caracterizan por sus formas de tipo artesa los cuales han sido en su mayoría rellenos por materiales glaciares lo que deriva en un paisaje monticulado. Se tienen formaciones locales de origen fluvial y de residuos sólidos de origen mineral y orgánico (detritus) de falta, que forman abanicos pronunciados en las pendientes escarpadas (45-60% de pendiente) (Ciren, 2017a).

En el sector de montañas de la comuna de Futaleufú se tienen pendientes abruptas y escarpadas con grandes farellones rocosos, labrados por la acción del hielo. Se presenta una morfología de fondos planos o acolinados y lados con gran pendiente, con alturas que varían entre los 300 y los 400 m.s.n.m. y los macizos que la rodean van entre los 1.650 y los 2.090 m.s.n.m. (Cirén, 2017a).

En el sector poniente, en la comuna de Chaitén, el terreno se presenta con un relieve andino positivo, al este de la zona insular y de los grandes canales australes. Corresponde a la continuación de la Cordillera de los Andes, la cual desciende abruptamente hacia el mar en forma de valles y fiordos, presentando montes de baja y mediana altura, los cuales tienen altura máxima de 2.500 msnm (Cirén, 2017b).

En la zona se encuentran los volcanes Michimahuida (2.404 msnm), el Corcovado (2.300 msnm) y el Chaitén (962 msnm).

2.2 Uso de Suelos

En la comuna de Futaleufú se tiene un predominio de bosque nativo, con presencia de Matorral, Matorral-pradera, Nieve y glaciares. Sin embargo, estos presentan una escasa evolución, evidenciado en la gran acumulación de materia orgánica en los horizontes superiores en contraste con el cambio de color en profundidad a causa del movimiento del hierro, mostrándose como suelos estratificados. En algunos sectores, se puede observar horizontes enterrados a causa de deslizamientos y/o derrumbes, los cuales son recurrentes en el sector y que depositan grandes cantidades de sedimentos en áreas bajas. (Ciren, 2017a).

Cerca de la frontera se observan suelos de tipo franco-arenosos mientras que en el resto del valle se tiene un predominio de suelos franco-limosos (texturas medias), cuyo material de origen son cenizas volcánicas y depósitos aluviales en algunos casos (Ciren, 2017a).

En la Tabla 4 y en la Fig. 5 se presenta el uso de suelos en la cuenca del río Yelcho acorde a los datos obtenidos en el Catastro uso de Suelos y Vegetación de la CONAF (2013).

Tabla 4. Uso de suelos definidos para la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de CONAF (2013).

Uso de suelo	Superficie (km ²)	% Superficie de la cuenca
Bosques	2436,4	59,32
Nieves y Glaciares	617,8	15,04
Áreas Sin Vegetación	466,2	11,35
Praderas y Matorrales	354,3	8,63
Cuerpos de Agua	182,9	4,45
Humedales	43,2	1,05
Áreas Urbanas-Industriales	1,2	0,03

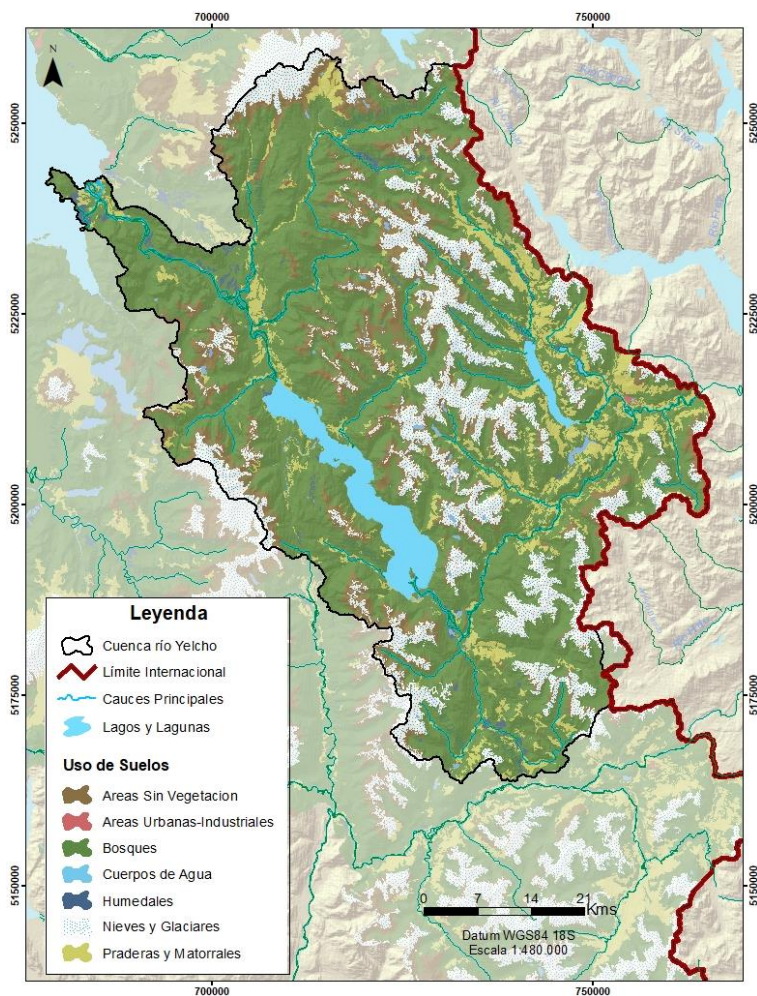


Fig. 5. Uso de suelos en la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia a partir del Catastro uso de suelos y vegetación de la CONAF (2013).

Por otro lado, según la base de datos de la FAO se identifican los siguientes tipos de suelos en la cuenca del río Yelcho:

- Andosoles: Suelo predominante en el sector chileno de la cuenca del río Yelcho, con una ocupación del 53,4% de la superficie total (2194,5 km²). Se caracterizan por su alto contenido de materia orgánica, su capacidad para retener nutrientes y agua, y su desarrollo a partir de materiales volcánicos. Se presentan en áreas con actividad volcánica reciente o antigua en donde cenizas, depósitos piroclásticos y rocas volcánicas se han acumulado y descompuestos formando suelo.

- Litosoles: Es el segundo suelo con mayor predominio en la cuenca, donde ocupa un 40,9% de la superficie total (1678,6 km²). Corresponden a suelos muy poco profundos y se caracterizan por poseer una capa superficial poco desarrollada, muy delgada y compuesta por fragmentos de roca, grava y arena, mientras que la capa inferior contiene una acumulación limitada de materia orgánica y nutrientes. Se presentan en sectores donde la roca madre se encuentra cerca de la superficie del suelo, como en laderas de montañas, crestas y lomas rocosas. Estos suelos se pueden desarrollar a partir de diferentes tipos de roca, como granito, cuarcita, basalto y calcáreo.

- Cambisoles: Ese grupo se caracteriza por tener una capa superficial del suelo es de un color oscuro y con un alto contenido de materia orgánica, mientras que la capa inferior es más clara y contiene materiales con mayor saturación de bases. Se presentan generalmente en zonas de montañas jóvenes y en laderas de colinas, donde la erosión y lixiviación son intensas, como también pueden encontrarse en áreas donde la formación de suelos ha sido interrumpida por acciones humanas.

En la Fig. 6 se muestra la distribución de estos grupos según el Harmonized World Soil Database, 2012.

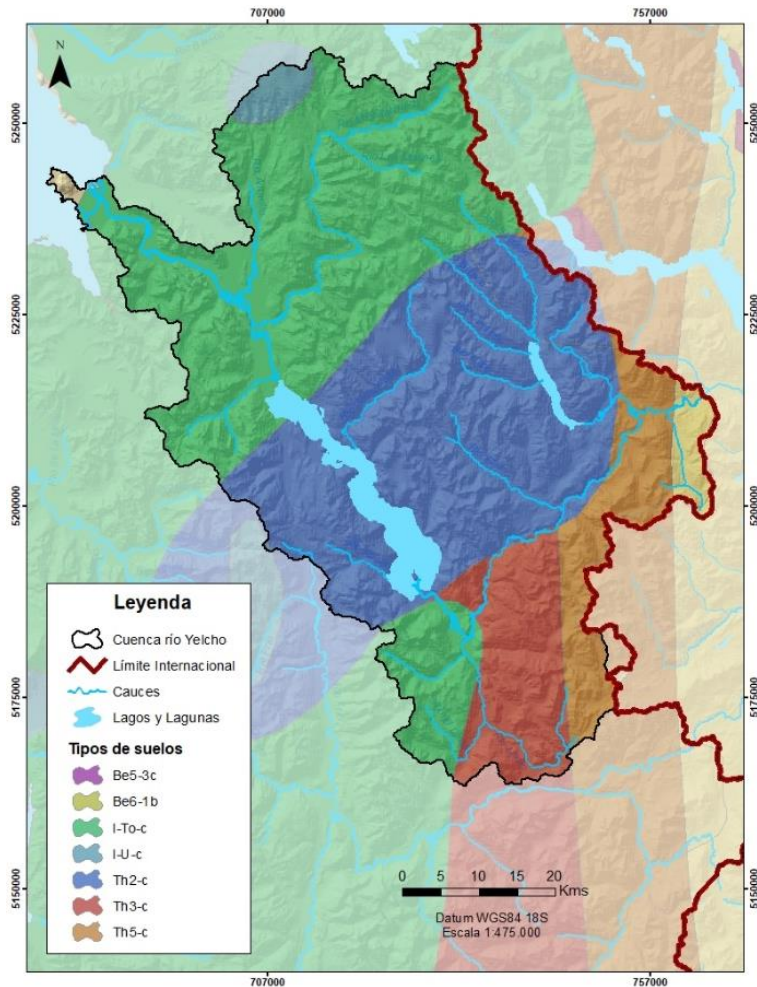


Fig. 6. Tipos de suelos presentes en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir del Harmonized World Soil Database, 2012.

3. Marco Geológico

3.1 Geología regional

La Región de Los Lagos se ubica entre los paralelos 40,5° y 44°S. Se presentan 3 tipos de geomorfologías en la región, las cuales se encuentran distribuidas en dirección N-S y paralelas entre sí: Cordillera de la Costa, Depresión Central y Cordillera Principal. Por otro lado, los grupos de las principales unidades litológicas se distribuyen de forma similar, con orientación aproximadamente N-S y de forma paralela a las zonas de falla y a los centros volcánicos (Fig. 7) (Ruiz Velásquez, 2015).

Dentro de la tesis “Caracterización hidrogeoquímica de manifestaciones termales de la región de Los Lagos, Chile.” se describen las principales unidades litológicas presentes, las cuales se agrupan en tres grupos según los grupos morfoestructurales mencionados anteriormente:

1) Rocas metamórficas paleozoicas asociadas al Complejo Metamórfico Bahía Mansa que afloran principalmente en la Cordillera de la Costa.

Particularmente corresponden a unidades metapelíticas (PzTrbma) y en menor proporción de metavolcanitas (PzTrbmb) expuestas principalmente en la latitud del lago Llanquihue. También se presenta en menor proporción unidades volcanosedimentaria paleógenas y neógenas, las cuales se distribuyen en la costa.

Las rocas que pertenecen al Complejo Metamórfico Bahía Mansa (CMBM) corresponden principalmente a esquistos pelíticos a semi-pelíticos, meta-grauvacas, metabasitas e intrusivos máficos a ultramáficos. Se caracterizan por presentar un metamorfismo pervasivo de facie esquistos verdes, relacionado a la foliación regional con sentido NW-SE (Ruiz Velásquez, 2015).

Las asociaciones minerales presentes en los esquistos máficos están compuestas por anfíboles, epidota, esfero, clorita, albita, cuarzo y estilpnomelano. Por otro lado, las rocas sedimentarias corresponden a cuarzo, albita, mica blanca, clorita, grafito, esfero, y con pequeñas presencias de granate y biotita, lo que indican un metamorfismo de alta temperatura (facie de esquistos verdes en el grado de biotita). Este metamorfismo prógrado fue seguido por un metamorfismo retrógrado parcial. Por lo cual, las condiciones de presión y temperatura del clímax metamórfico, estimadas por Kato & Godoy (1995) son de 300-400°C y 3-4 kbar. (Ruiz Velásquez, 2015).

2) Rocas asociadas al Batolito Norpatagónico.

Descrita como rocas intrusivas asociadas al Batolito NorPatagónico (BNP), las cuales pasan a ser el basamento para el resto de las unidades en la Cordillera Principal. De esta forma, las rocas de edad anterior al cretácico estarían en relación de contacto por intrusión como techos colgantes de mayor o menor extensión, mientras que las unidades posteriores al cretácico estarían en relación de contacto discordante dependiendo si sobreyacen la franja cretácica o miocena del BNP (Aguilera et al., 2014).

El Batolito Norpatagónico se extiende entre las latitudes 40° y 47°S con una orientación N-S aproximadamente y con un ancho de hasta 200 km desde la Cordillera Principal hasta la Cordillera de la Costa, cuyo emplazamiento está controlado por el SFLO (Ruiz Velásquez, 2015).

3) Depósitos sedimentarios consolidados a no consolidados paleógenos-neógenos y cuaternarios en la Depresión Central

Corresponden a unidades o secuencias estratigráficas asociadas a las cuencas terciarias de Osorno-Llanquihue (COL) y Golfo de Ancud-Chiloé, las que se encuentran

parcialmente bajo depósitos cuaternarios provenientes de glaciaciones pleistocenas principalmente y de depósitos fluvio-aluviales holocenos (Aguilera et al., 2014).

Este grupo litológico se compone principalmente por depósitos fluviales y suelos arcillosos de gran espesor provenientes de la alteración de depósitos de lavas antiguos, del tipo trumao. (Ruiz Velásquez, 2015).

En el estudio realizado por Ruiz Velásquez en 2015, se definen subunidades dentro de esta unidad, las cuales se describen brevemente a continuación:

- Secuencias volcano-sedimentarias depositadas en cuencas sobre rocas metamórficas y miembros del Batolito Norpatagónico: Estas secuencias están compuestas principalmente por conglomerados y areniscas volcánicas silíceas en su base y en su techo por dacitas y fangolitas, se presentan estructuras syd-sedimentarias y microfósiles que indican un ambiente batial.
- Depósitos fluviales: Corresponden a depósitos no consolidados, estratificados (de modo planar, cruzado y grano decreciente) con buena selección, redondeamiento e imbricación. Forman terrazas antiguas que bordean los cursos actuales de los ríos. Estos sedimentos son subyacidos por un suelo de muy bajo espesor que se correlaciona estratigráficamente con depósitos glaciales y glaciofluviales de la Glaciación Llanquihue (Pérez et al., 2003 en Ruiz Velásquez, 2015).
- Depósitos morrénicos, glaciofluviales y glaciolacustres: La intensa erosión glacial dentro de la depresión intermedia generó profundas cuencas que fueron rellenadas por aguas del Océano Pacífico formándose así el actual interior de Chiloé. El material removido a causa de la erosión glacial se fue depositando en toda la Depresión Intermedia, aflorando en territorio del borde occidental de la franja continental de la región. Estos depósitos corresponden a sedimentos morrénicos, glaciofluviales y glaciolacustres asociados a las glaciaciones que afectaron a toda la Región de Los Lagos entre el Pleistoceno Medio al Pleistoceno Superior: Rio Llico (Plgf3); Santa María (Plgl2, Plgf2) y Llanquihue (Plgl1, Plgf1).
- Depósitos fluviales actuales: Conformados principalmente de gravas y arenas holocenas asociadas a erosión fluvial con variaciones en algunos sectores. Estos depósitos se encuentran en laderas y terrazas actuales de los principales ríos de la Región (Pérez et al., 2003 en Ruiz Velásquez, 2015) y se caracterizan por ser clasto soportados, de selección moderada y con clastos polimícticos (rocas piroclásticas e intrusivas, asociadas al Batolito Norpatagónico), a veces imbricados, de buen redondeamiento cuya matriz arenosa se encuentra ausente localmente.

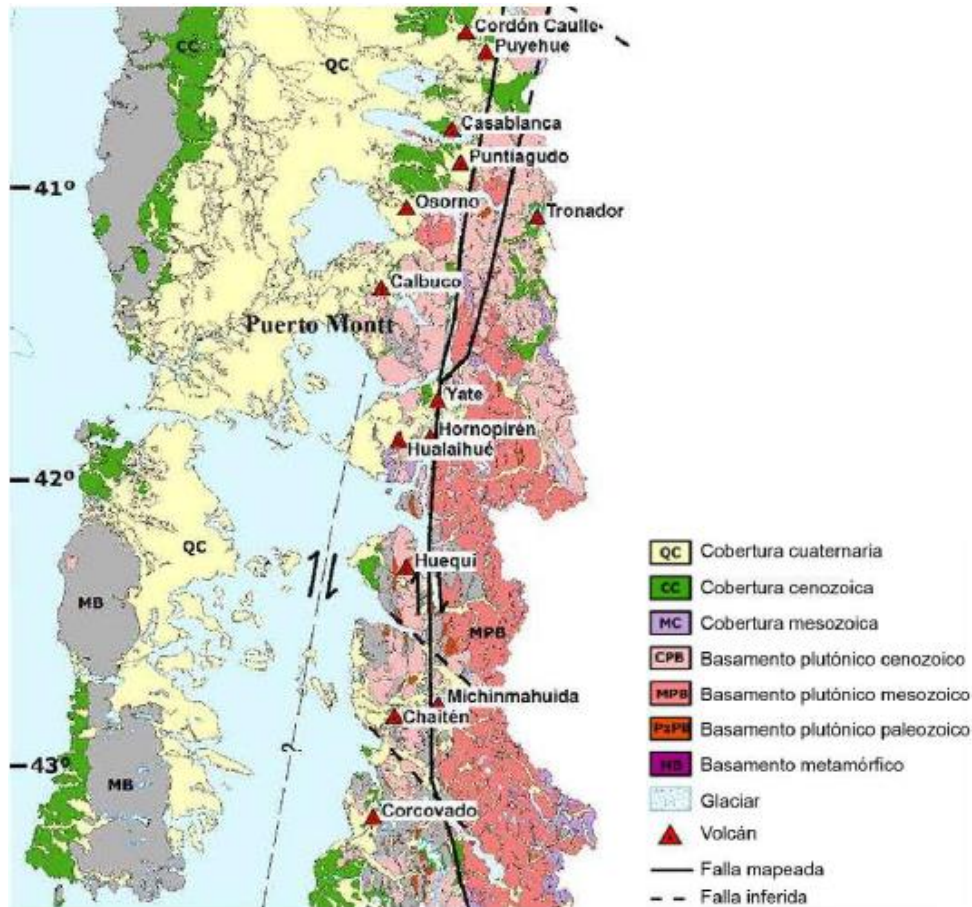


Fig. 7. Distribución de las unidades litológicas, zonas de fallas principales y volcanes dentro de la X Región. Fuente: Extraído de Cembrano & Lara (2009).

3.1.1 Geología estructural

La región de Los Lagos se enmarca en un contexto de subducción oblicua dextral desde al menos los 49 Ma. Como resultado de esta configuración se tienen dos sistemas estructurales regionales principales: La zona de Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO) de orientación principal NS y secundaria ~NE, con una componente de movimiento transcurrente dextral y las fallas Andinas Transversales, de orientación NW.

La ZFLO corresponde a una estructura cortical de larga data (100 Ma aprox) con cinemática transpresional dextral desde al menos el Mioceno Medio. La componente de cizalle pura paralela a la convergencia absorbida por la ZFLO permitió el alzamiento de la vertiente occidental de la cordillera Patagónica (Arancibia et al, 1999; Cembrano et al, 2000).

3.2 Geología local

El marco geológico dominante en la cuenca del río Yelcho según SERNAGEOMIN (2003) corresponde a rocas volcánicas e intrusivas, sedimentarias del Mesozoico Superior hasta el Cuaternario y en menor medida por rocas metamórficas del Paleozoico-Triásico.

Los valles de origen glacial presentes en la cuenca han sido rellenados por depósitos provenientes de morrenas, aluviones, coluviones, fluvios, out-wash glacial (derretimiento de hielos), que por condiciones climáticas y el tipo de basamentos, permitieron la formación de diferentes estados de substratum. (Cirén, 2017a).

Estos rellenos fueron cubiertos por depósitos de materiales piroclásticos provenientes de los volcanes Michinmahuida, Apagado, Hornopirén y Chaitén, los cuales pasaron a ser parte en la formación de los suelos del sector. De esta forma, se considera que la gran mayoría de los suelos de esta zona derivan de materiales volcánicos de diferentes edades y eventos (Cirén, 2017a).

A continuación, se describen las unidades geológicas presentes en la cuenca del río Yelcho según el Mapa Geológico de Chile 1:1.000.000 (Sernageomin, 2003). En la Fig. 8 se presenta la distribución de estas unidades.

3.2.1 Rocas estratificadas

En relación con las rocas estratificadas, se puede distinguir secuencias sedimentarias, secuencias volcánicas y secuencias volcano-sedimentarias con edades que van desde el Cuaternario al Jurásico, las cuales se reseñan a continuación:

- **Q3i (Cuaternario):** Secuencias volcánicas compuestas por lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesítico-basálticos a dacíticos, principalmente calcoalcalinos.
- **Qm (Pleistoceno - Holoceno):** Secuencias sedimentarias compuestas por depósitos litorales descritas como arenas y gravas de playas actuales.
- **Q1g1 (Pleistoceno - Holoceno):** Secuencias sedimentarias compuestas por depósitos morrénicos, fluvioglaciares y glaciolacustres, compuestos por diamictos de bloques y matriz de limo/arcilla, gravas, arenas y limos. Presente en la Depresión Central.
- **PI3 (Pleistoceno):** Secuencias volcánicas correspondientes a secuencias lávicas y centros volcánicos básicos e intermedios; depósitos piroclásticos andesítico-basálticos. Presente en la Cordillera Principal.
- **PPI3 (Plioceno - Pleistoceno):** Secuencias volcánicas correspondientes a secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados: lavas principalmente basálticas con intercalaciones de tobas y conglomerados. Presente en la Cordillera Principal.

- **M1m (Mioceno):** Secuencias sedimentarias marinas de carácter transgresivo plataformales, compuestas por areniscas finas, arcillolitas y limolitas.
- **OM1m (Oligoceno-Mioceno):** Secuencias sedimentarias marinas, compuestas por areniscas y coquinas.
- **Kia3 (Cretácico Inferior):** Secuencias y complejos volcánicos de tipo continental. compuestas por lavas y brechas basálticas a andesíticas, rocas piroclásticas andesíticas a riolíticas, y en menor medida por intercalaciones sedimentarias.
- **JK1m (Jurásico Superior-Cretácico Inferior):** Secuencias sedimentarias marinas de tipo litoral o de plataforma, compuestas por calizas, lutitas, areniscas calcáreas, areniscas y coquinas.
- **J3a (Jurásico):** Secuencias volcánicas compuestas por rocas piroclásticas dacíticas a riolíticas, lavas andesíticas e intercalaciones sedimentarias.
- **J3i (Jurásico):** Secuencias volcánicas continentales y marinas compuestas por lavas y aglomerados basálticos a andesíticos, presencia de tobas riolíticas con intercalaciones de areniscas, calizas marinas y conglomerados continentales.

3.2.2 Rocas intrusivas

Las rocas intrusivas presentan edades que varían desde el Mioceno (18-6 Ma) al Carbonífero- Pérmico (328-235 Ma), las cuales se reseñan a continuación:

- **Mg (18-6 Ma):** Intrusivos del Mioceno compuestos por granodioritas, dioritas y tonalitas.
- **Ksg (90-65 Ma):** Intrusivos del Cretácico Superior compuestos por monzodioritas, granodioritas, gabros y dioritas de piroxeno, biotita y hornblenda y en menor proporción pórfidos andesíticos y dioríticos.
- **Kig (144-90 Ma):** Intrusivos del Cretácico Inferior descritos como granitos, granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita.
- **CPg (328-235 Ma):** Intrusivos del Carbonífero-Pérmico descritos como Granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, de hornblenda y biotita, y en menor cantidad de muscovita.

3.2.3 Rocas metamórficas

Las rocas metamórficas, presentan edades que varían desde el Paleozoico-Triásico, las que se presentan a continuación:

- **PzTr4(a) (Paleozoico - Triásico):** Unidad metamórfica compuesta por metapelitas, metacherts, metabasitas y, en menor proporción, gneises y rocas ultramáficas, además contiene en menor proporción esquistos pelíticos.

- **PzTr4(b) (Paleozoico - Triásico):** Unidad metamórfica compuesta por metapelitas, metacherts, metabasitas, esquistos y anfibolitas y en menor proporción, gneises y rocas ultramáficas.

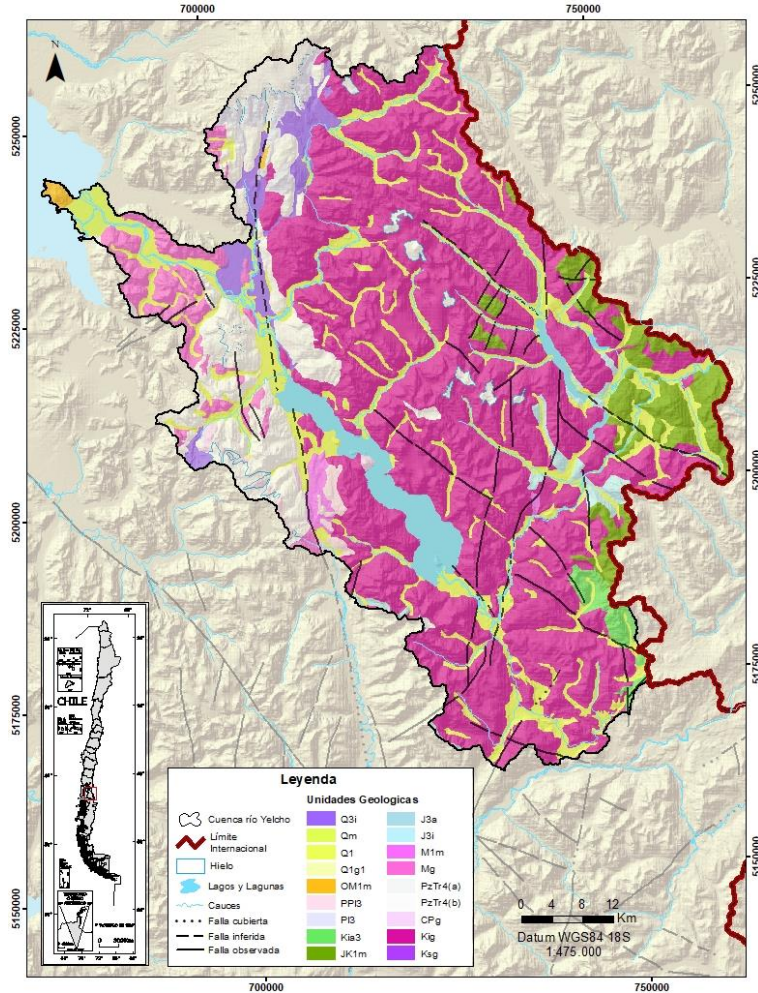


Fig. 8. Mapa que muestra las unidades geológicas presentes en la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia a partir del mapa de Chile 1:1.000.000 del SERNAGEOMÍN.

4. Caracterización Hidrológica

En esta sección se presenta la información de la precipitación, temperatura y caudales existentes en la cuenca del río Yelcho. La información hidro climática considerada en este estudio incluye:

- Datos de precipitación de estaciones de la Dirección General de Aguas y la Dirección Meteorológica de Chile descargados desde la plataforma Mawün: Explorador de precipitaciones para los periodos de 1979 a 2020.
- Datos de temperaturas de estaciones de la Dirección General de Aguas y la Dirección Meteorológica de Chile.

- Datos de caudales de estaciones de la Dirección General de Aguas descargados desde la plataforma CAMELS-CL explorer del CR2.

Para el análisis espacial de estos datos se hace uso del método de los Polígonos de Thiessen, el cual consiste en asignar una ponderación diferencial a cada estación en base a la ubicación geográfica de las estaciones, generando una distribución espacial no uniforme, pero si asumiendo una variación lineal entre estaciones (Iñiguez et al, 2011).

4.1 Precipitación

Haciendo uso de la metodología de polígonos de Thiessen se determina que las estaciones de precipitación con influencia en la cuenca del río Yelcho son seis y corresponden a:

- i) Chaitén Ad.
- ii) Puerto Cárdenas
- iii) Lago Espolón
- iv) Futaleufú Ad.
- v) Valle Río Frío
- vi) Alto Palena Ad.

La distribución de estas se puede observar en la Figura 10. Mediante el programa ArcMap 10.8 se trazan los polígonos de Thiessen, los cuales marcan el área de influencia de las estaciones, como se muestra en la Fig. 9.

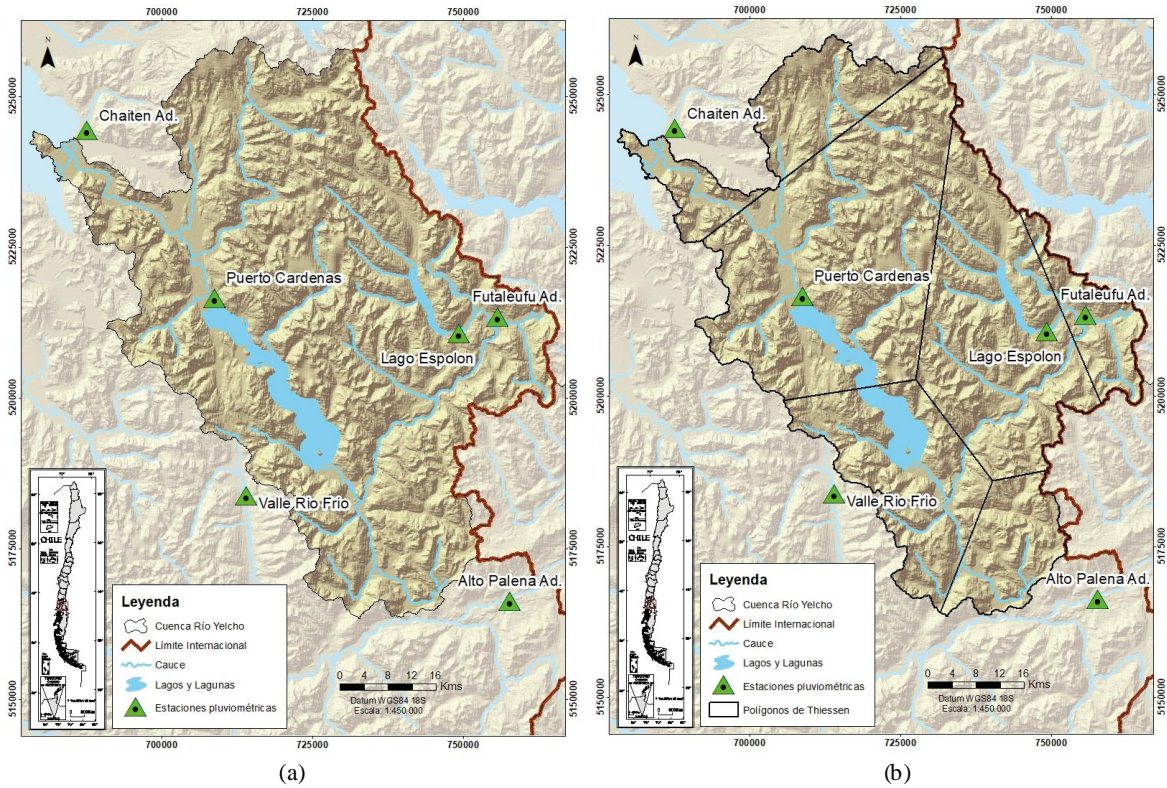


Fig. 9. Estaciones pluviométricas con influencia en la cuenca del río Yelcho. Al lado derecho se muestra los polígonos de Thiessen que muestra las áreas de influencia de cada estación pluviométrica. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 5 se presenta la información de las coordenadas y cota de las estaciones, el área de influencia de cada estación sobre la cuenca (A_{af}), porcentaje de área de influencia ($\% A_{af}$), donde $\% A_{af} = A_{af} / A_c$ y A_c es el área de la cuenca del río Yelcho en el sector chileno.

Tabla 5. Información de las estaciones con influencia en la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia.

Estación	Fuente	Coordenada	Cota m.s.n.m	A_{af} Km ²	$\% A_{af}$	Periodo registro
Chaitén Ad. [420004]	DMC	N: 5244360,5 E: 687619,4	10	508,2	12,4	1979-2007
Puerto Cárdenas [10710001]	DGA	N: 5216546,8 E: 708820,5	55	1717,3	35,5	2001-2015
Lago Espolón [10701001]	DGA	N: 5210645,5 E: 749312,0	350	1648,6	24,1	2001-2018

Futaleufú Ad. [430002]	DMC	N: 5213397,2 E: 755768,5	347	232,8	5,7	1979-2020
Valle Río Frío [11023001]	DGA	N: 5183776,9 E: 714062,5	215	618,9	15,1	2001-2018
Alto Palena Ad. [430004]	DMC	N: 5166293,0 E: 757803,4	281	300,8	7,3	1979-2010 2012-2018

Se estima la precipitación media anual sobre la cuenca mediante la ponderación entre la precipitación anual y el área de influencia de cada estación sobre la cuenca. Debido a la escasez de datos en las distintas estaciones se utilizó las series de precipitación del producto grillado de precipitaciones del CR2Met para la estimación media anual sobre la cuenca del río Yelcho, obteniéndose una precipitación media anual de 2.981 mm.

Para el análisis de las precipitaciones medias se consideraron dos periodos de tiempo, antes y después del 2010, año desde el cual Chile ha enfrentado una sequía que se ha expandido a distintas regiones del país. Con esto se obtiene que la precipitación media anual antes del 2010 es de 3.006 mm, mientras que la precipitación media anual desde el 2010 hasta el 2020 es de 2.911 mm, es decir, se tiene una disminución de un 3%. Los resultados del análisis se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Precipitación media anual para los periodos entre 1979-2009 y 2010-2020 para cada estación.

Estación	Periodo	Precipitación media anual [mm]	
		Estaciones	CR2Met
Chaitén Ad. [420004]	1979-2009	3589	3320
	2010-2020	-	3232
Puerto Cárdenas [10710001]	1979-2009	4159	3609
	2010-2020	3534	3491
Lago Espolón [10701001]	1979-2009	2835	2236
	2010-2020	2426	2155
Futaleufú Ad. [430002]	1979-2009	2006	2182
	2010-2020	1854	2088
Valle Río Frío [11023001]	1979-2009	3959	3422
	2010-2020	3250	3335

Alto Palena Ad. [430004]	1979-2009	1671	1877
	2010-2020	1250	1808
Total Cuenca	1979-2009	3435	3006
	2010-2020	-	2911

La Fig. 10 muestra la comparación de los datos de precipitación medidos por la DGA y las series modeladas por el CR2Met. A partir de ambos datos se observa una tendencia decreciente de la precipitación en el tiempo, con una disminución entre un 2% y un 5% en las precipitaciones.



Fig. 10. Comparación de las series de precipitación anual medidos por la DGA (azul) y las modeladas por el CR2MET (rojo). Fuente: Elaboración propia con datos de precipitación de la DGA y del CR2Met.

Por otra parte, en la Fig. 11 se presentan los datos de las estaciones y del producto grillado de las precipitaciones medias mensuales de cada estación.

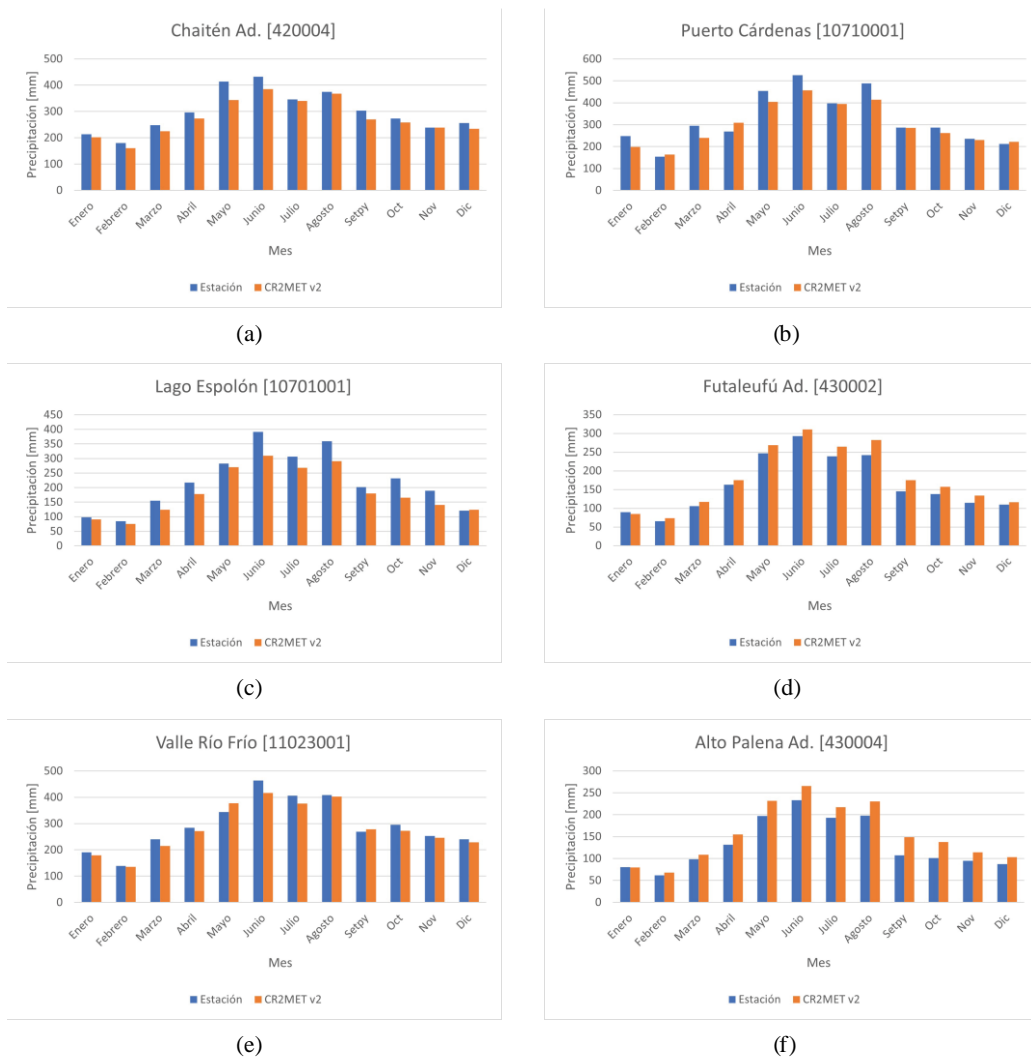


Fig. 11. Media mensual de la precipitación obtenida de cada estación presente en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la plataforma Mawün basados en datos de la DGA y CR2MET.

A partir de los gráficos se observa que se tiene un régimen de precipitación unimodal dentro de la cuenca, es decir, se presenta un periodo de lluvias intensa entre los meses de mayo y agosto, seguido de un periodo de baja precipitación entre los meses de diciembre y marzo.

4.2 Temperatura

Los datos de temperatura se obtuvieron de la Dirección Meteorológica de Chile. Se tienen tres estaciones dentro y cercanas a la cuenca del río Yelcho, las cuales son:

- i) Chaitén Ad.
- ii) Futaleufú Ad.
- iii) Alto Palena Ad.

Esta última estación cuenta solo con 16 años de registro por lo que no es estadísticamente representativa. Sin embargo, se hará uso de sus datos para poder tener una estimación de las temperaturas dentro de la cuenca.

De la misma forma que las precipitaciones, se hace uso del método de Thiessen para conocer la distribución espacial de las temperaturas. La distribución de las estaciones y los polígonos de Thiessen obtenidos se muestran en la Fig. 12.

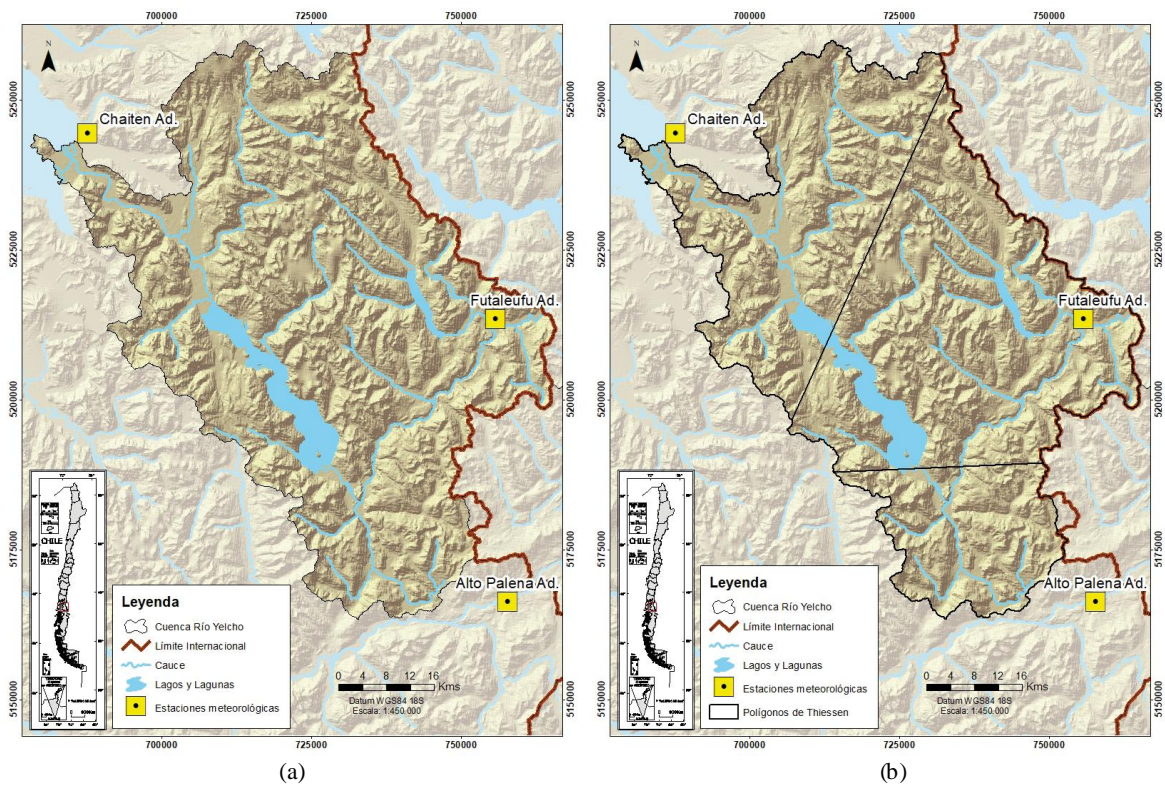


Fig. 12. Estaciones meteorológicas con influencia en la cuenca del río Yelcho. Al lado derecho se observa los polígonos de Thiessen que muestra las áreas de influencia de cada estación. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 7 se presenta la información de las coordenadas y cota de las estaciones, el área de influencia de cada estación sobre la cuenca (A_{af}), porcentaje de área de influencia ($\%A_{af}$), donde $\%A_{af} = A_{af} / A_c$ y A_c es el área de la cuenca del río Yelcho en el sector chileno.

Tabla 7. Información de las estaciones de temperatura con influencia en la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia.

Estación	Fuente	Coordenada	Cota m.s.n.m.	A_{af} Km ²	$\%A_{af}$	Años de registros	Temperatura Media anual [°C]
Chaitén Ad. [420004]	DGA	N: 5244360,5 E: 687619,4	10	1447,1	0,352	26	10,2
Futaleufú Ad. [430002]	DMC	N: 5213397,2 E: 755768,5	34	2014,7	0,491	31	9,7
Alto Palena Ad. [430004]	DGA	N: 5166293,1 E: 757803,4	256	645,2	0,157	16	9,8

Acorde a esto, se obtiene que la temperatura media anual sobre la cuenca es de 9,9°C. Por su parte en la Fig. 13 se muestra la serie en el tiempo de la temperatura en las tres estaciones con el fin de evaluar la tendencia de esta. Se aprecia que tanto la estación Futaleufú Ad. y Alto Palena Ad. presenta una tendencia creciente entre los años 1979 y 2022 de unos 0,003 y 0,02 respectivamente. En cambio, la estación Chaitén presenta una tendencia decreciente entre los años 1979 y 2008 de -0,006, que son los años en donde se tiene registros.

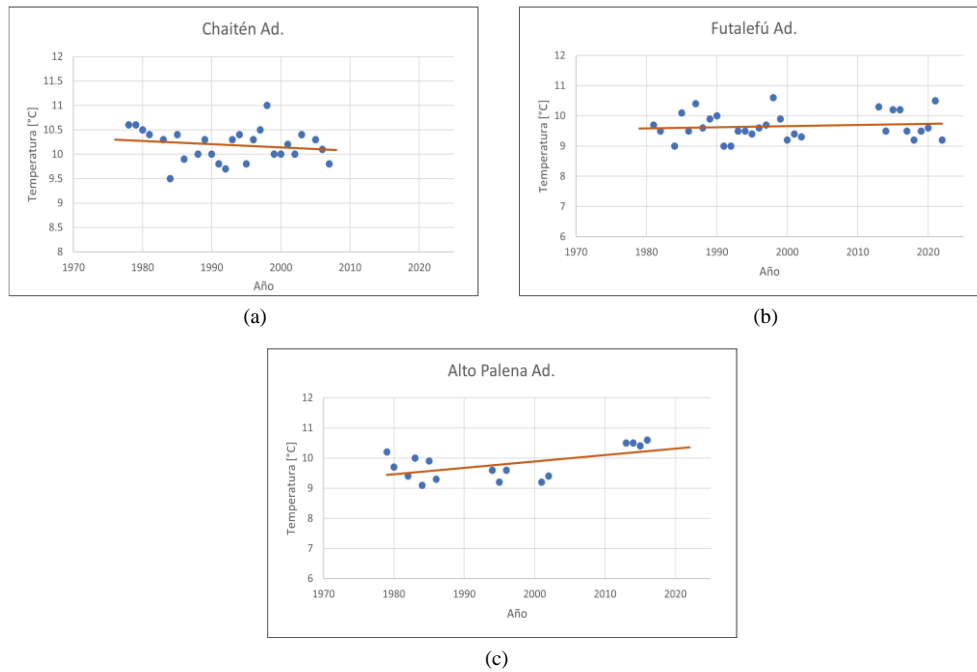


Fig. 13. Temperatura media anual de las estaciones (en azul) y la línea de tendencia (línea roja) de las estaciones a) Chaitén Ad. b) Futalefú Ad. y c) Alto Palena Ad. Fuente: Elaboración propia.

4.3 Caudales

Se realiza el análisis del ciclo anual de caudales en la zona de estudio mediante los datos fluviométricos de las estaciones: i) Río Futalefú en la Frontera [10702002], ii) Río Espolón en Desagüe Lago Espolón [10701002] y iii) Río Futalefú ante junta Río Malito [10704002]. En la Fig. 14 se muestra la distribución de las estaciones.

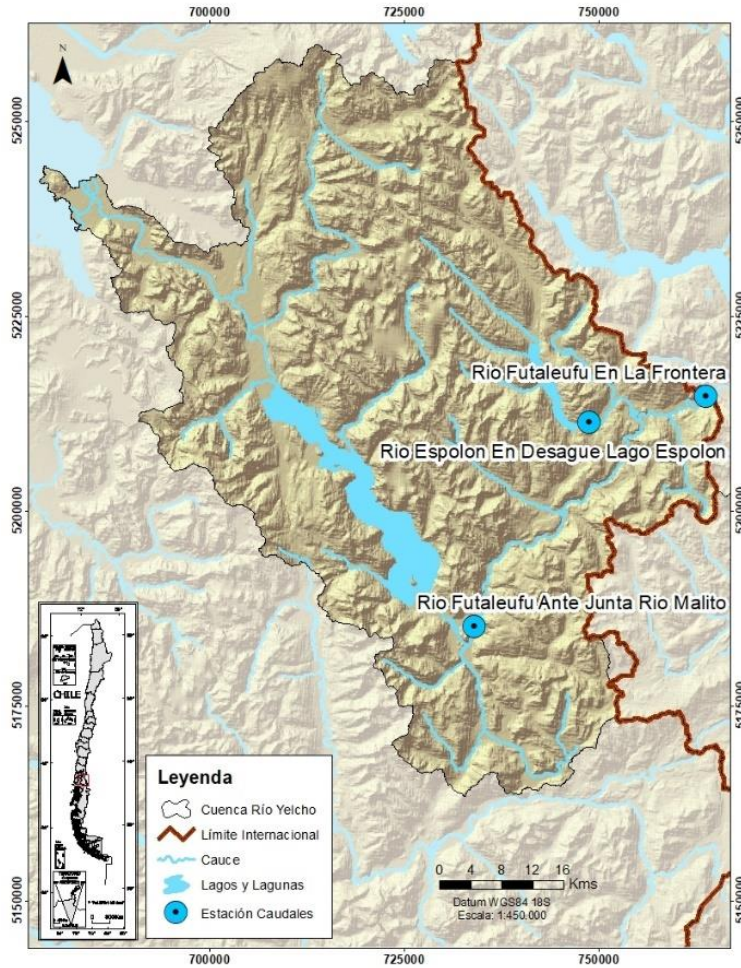


Fig. 14. Estaciones con información de caudales en la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 8 se presenta información de ubicación, longitud del registro y caudales medios anuales.

Tabla 8. Información de las estaciones de caudal con influencia en la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos del CR2.

Estación	Coordenada	Años con información válida	Caudal medio anual [m ³ /s]
Río Futaleufú ante junta Río Malito [10704002]	N: 734043,7 E: 5185235,7	2003-2010, 2013.	448
Río Futaleufú en la Frontera [10702002]	N: 763804,1 E: 5214725,1	2001-2018	324

Río Espolón en Desagüe Lago Espolón [10701002]	N: 748826,3 E: 5211375,1	2003-2005, 2007-2008, 2010-2013, 2015-2016.	55
--	-----------------------------	---	----

En la Fig. 15 (a) se presentan las series de caudal medio anual con su línea de tendencia, las cuales muestran una disminución de caudal en el tiempo con valores de pendientes de -1,5, -8,5 y -1,2 para las estaciones de Río Futaleufú ante junta Río Malito, Río Futaleufú en la Frontera, Río Espolón en Desagüe Lago, respectivamente.

Por otra parte, la Fig. 15 (b) muestra la variación estacional de los caudales, que muestran un régimen nivo-pluvial. Los caudales medios máximos se alcanzan durante los meses de junio y julio (invierno), relacionada a las precipitaciones, pero también se observa un aumento de los caudales durante los meses de noviembre y diciembre, a causa de los deshielos cordilleranos (DARH, 2007). Mientras que los caudales medios mínimos se presentan durante el mes de marzo (verano-otoño)

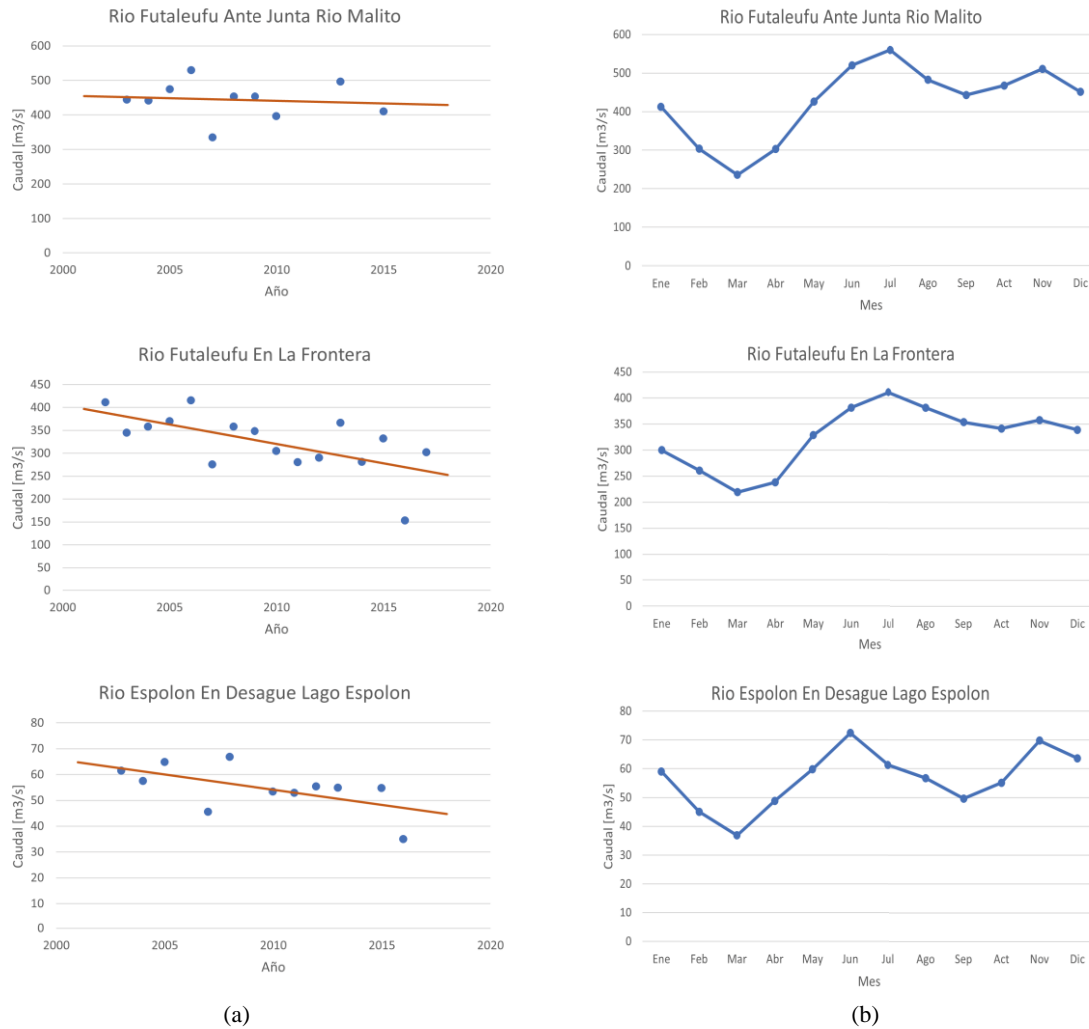


Fig. 15. (a) Caudales medios anuales (en azul) con línea de tendencia (línea roja) y (b) variación estacional de caudales de las estaciones fluviométricas en la cuenca. Fuente: Elaboración propia con datos de caudales del explorador climático.

4.4 Evapotranspiración

La evapotranspiración se calcula mediante el método de Thornthwaite, sectorizando a partir de las áreas de influencia de las estaciones con datos de temperatura.

El método de Thornthwaite está basado en el cálculo de la evapotranspiración en función de la temperatura media, con una correlación en función de la duración de las horas de luz y el número de días del mes (Montaner, 1988).

Thornthwaite propone la siguiente fórmula:

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde i es el Índice de calor mensual y t es la temperatura media diarias del aire

Si la temperatura es <0, los valores de i y de ETP deben ser 0.

$$ETP_{\text{sin corr}} = 16 \left(\frac{10 \cdot t}{I} \right)^a \quad \text{Ec. 2}$$

Con

$$a = 675 \cdot 10^{-9} \cdot I^3 - 177 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 + 1791 \cdot 10^{-5} \cdot I + 0.49239 \quad \text{Ec. 3}$$

$$ETP_{\text{CORR}} = ETP_{\text{SIN CORR}} \cdot \left(\frac{N}{12} \right) \cdot \left(\frac{d}{30} \right) \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

ETP_{CORR} : Evapotranspiración potencial corregida.

I: Índice de calor anual.

i: Índice de calor mensual.

N: Número máximo de horas de sol.

d: Número de días del mes.

Las tablas 9, 10 y 11 mostradas a continuación muestran el cálculo realizado con la información de las estaciones de Chaitén Ad, Futaleufú Ad. y Alto Palena Ad.

Tabla 9. Cálculo evapotranspiración sector Chaitén. Fuente: Elaboración propia.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
T	13,8	13,5	12,4	10,6	9,1	7,4	6,8	7,4	8,4	9,6	11,0	12,8	122,8
i	4,6	4,5	4,0	3,1	2,5	1,8	1,6	1,8	2,2	2,7	3,3	4,1	
I	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	
a	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	
ETP sin corr	67,0	65,7	60,0	50,8	43,0	34,3	31,2	34,6	39,5	45,3	52,7	61,6	
n° días mes	30	31	30	31	31	28,3	31	30	31	30	31	31	
n° horas luz	12,1	12	11,9	11,9	11,9	12	12,1	12,2	12,3	12,4	12,3	12,3	
ETP corr	67,5	67,9	59,5	52,0	44,1	32,4	32,5	35,1	41,8	46,8	55,8	65,3	600,8

Tabla 10. Calculo evapotranspiración sector Futaleufú. Fuente: Elaboración propia.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
T	15,6	15,6	13,2	9,7	6,5	4,0	3,4	5,1	7,4	9,6	11,9	14,3	116,2
i	5,6	5,6	4,3	2,7	1,5	0,7	0,5	1,0	1,8	2,7	3,7	4,9	
I	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	
a	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	
ETP sin corr	77,3	77,0	64,5	46,7	30,7	18,5	15,2	23,7	34,9	46,3	58,2	70,2	
n° días mes	30	31	30	31	31	28,3	31	30	31	30	31	31	
n° horas luz	12,1	12	11,9	11,9	11,9	12	12,1	12,2	12,3	12,4	12,3	12,3	
ETP corr	77,9	79,5	64,0	47,9	31,5	17,4	15,9	24,1	37,0	47,8	61,6	74,3	579,0

Tabla 11. Calculo evapotranspiración sector Palena. Fuente: Elaboración propia.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
T	15,4	15,2	13,1	9,7	6,9	4,5	3,9	5,5	7,6	9,8	11,9	14,2	117,6
i	5,5	5,4	4,3	2,7	1,6	0,8	0,7	1,2	1,9	2,7	3,7	4,8	
I	35,4	29,9	24,5	20,2	17,5	15,9	15,0	14,4	13,2	11,3	8,6	4,8	
a	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	
ETP sin corr	76,2	89,7	94,2	84,3	68,8	47,8	43,5	66,4	102,7	157,0	260,7	573,9	
n° días mes	31	28,3	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	
n° horas luz	11,9	12	12,1	12,2	12,3	12,4	12,3	12,3	12,1	12	11,9	11,9	
ETP corr	78,1	84,6	98,2	85,7	72,8	49,4	46,1	70,3	103,5	162,3	258,6	588,1	1697,7

Tabla 12. Calculo evapotranspiración sobre la cuenca. Fuente: Elaboración propia.

Estación	ETP	Área polígono Thiessen	Área cuenca	Coef. Thiessen	ETP
Chaitén Ad	600,8	1447,1	4106,9	0,352	211,7
Futaleufú Ad	579,0	2014,7	4106,9	0,491	284,0
Alto Palena	1697,7	645,2	4106,9	0,157	266,7
				ETP cuenca	762,4

En la Tabla 12 se muestra la estimación de la evapotranspiración sobre la cuenca mediante la ponderación entre la ETP obtenida en cada estación y el área de influencia de cada una de estas. Con lo cual se obtiene que la evapotranspiración tiene un valor de 762,4 [mm].

En el Atlas Agroclimático tomo 5, se reportan valores de evapotranspiración para los sectores de Futaleufú, Volcán Chaitén y Palena. Tomando el promedio de estos valores, se obtiene una evapotranspiración de 839 [mm].

4.5 Extracciones

4.5.1 Superficiales

En base a la información de la DGA disponible, existen 235 derechos de aprovechamiento de aguas (DAA) superficiales en la cuenca del río Yelcho. En la Tabla 13 se entrega el resumen de los caudales de los derechos existentes de los DAA superficiales otorgados según tipo de DAA y el ejercicio del derecho.

Tabla 13. DAA superficiales en la cuenca según el tipo y el ejercicio del DAA.

Tipo de DAA	Ejercicio del DAA	Derechos constituidos		Caudal	
		N°	%	l/s	%
Consuntivo		154	66	1481,6	0,37
	Eventual y Continuo	8	5,67	41,3	2,97
	Eventual y Discontinuo	26	16,31	384,98	25,98
	Permanente y Continuo	116	75,89	865,65	58,43
	Permanente y Discontinuo	4	2,13	189,67	12,8
No consuntivo		81	34	403296,5	99,63
	Eventual y Continuo	32	39,73	242435,53	58,43
	Eventual y Discontinuo	6	6,85	14331,25	3,54
	Permanente y Continuo	43	53,43	128937,43	38,08
Total		235	100	404778,1	100

Los DAA son mayormente de carácter consuntivo, permanente y continuo, los que representan un 49,3% del total de los DAA superficiales, con un caudal de 865,65 [l/s]. Mientras que el mayor caudal otorgado es 242435,53 [mm] corresponde a los DAA no consuntivos, de ejercicio eventual y continuo. En la Fig. 16 se muestra la distribución espacial de los DAA en la cuenca del río Yelcho.

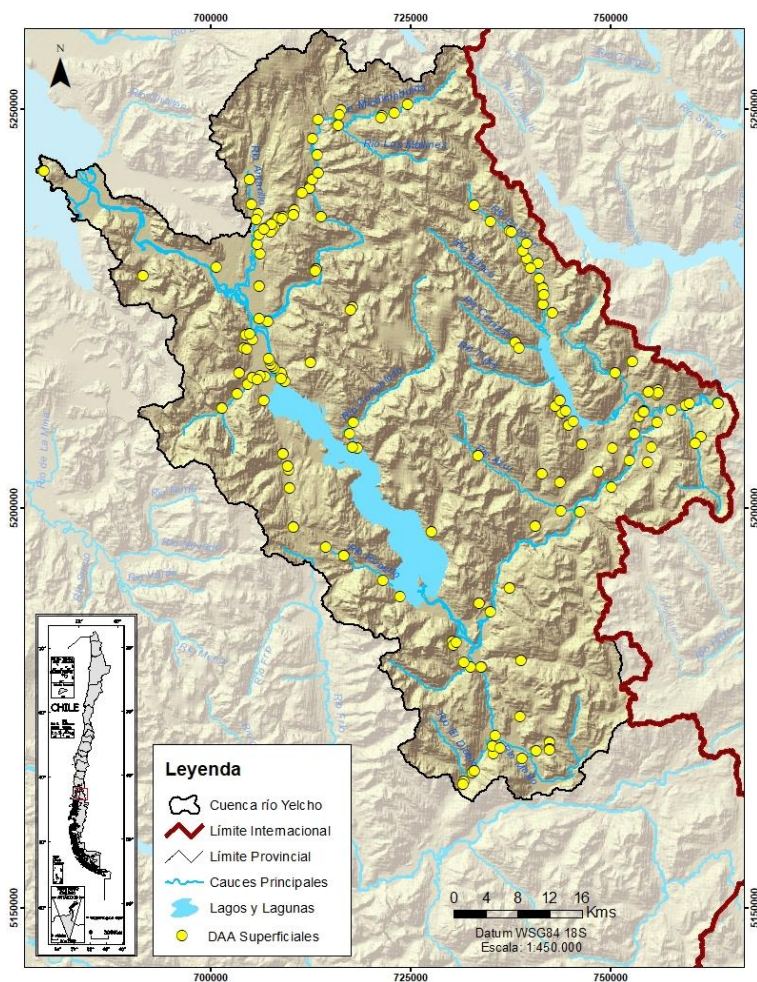


Fig. 16. DAA Superficiales en la cuenca del río Yelcho. Elaboración propia en base a datos de la DGA (2022).

4.5.2 Subterráneas

Según los datos de la DGA, existen 16 derechos subterráneos. Todos corresponden a DAA consuntivos y de ejercicio permanente y continuo. En la Tabla 14 se presentan los datos de los expedientes encontrados:

Tabla 14. Expedientes de pozos encontrados para la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DGA.

Expediente	Solicitante	Caudal	
		l/s	%
ND-1005-2155	Elías Desiderio Alarcón Roa	7,8	20
ND-1005-1693	Compañía de Petróleos de Chile Copec S.A.	1,05	2,7
ND-1005-634	Viviano Apablaza Vidal	0,1	0,3
ND-1005-635	Hermógenes Apablaza Vidal	0,2	0,5
ND-1005-596	José Toledo San Martín	0,2	0,5
ND-1005-830	ESSAL S.A.	21	53,8
ND-1005-633	Fernando Coronado asenjo	0,5	1,3
ND-1005-636	Edermo Joaquín Almarza zapata	0,2	0,5
ND-1005-619	Octavio Vega Agurto	0,2	0,5
ND-1005-623	Pedro Walter Pinilla Navarro	0,2	0,5
ND-1005-627	Jorge Ricardo Hinostraza Troncoso	0,4	1,0
ND-1005-629	Jorge Lorenzo Gallardo Sáez	0,1	0,3
ND-1005-875	I. Municipalidad de Futaleufú	0,6	1,5
ND-1005-2329	Mauricio Efrén Aparicio Mercado	1	2,6
ND-1005-377	Agrícola Futaleufú LTDA.	5,5	14,1
	Total	39,05	100

Todos los DAA presentes en la Tabla 15 son para consumo humano, a excepción del pozo de COPEC S.A el cual tiene un uso industrial. Además de estos, se tienen antecedentes de pozos mandados y construidos por la Municipalidad de Futaleufú, los que son incluidos en la Tabla 15.

Tabla 15. Pozos construidos por la Municipalidad de Futaleufú. Fuente: Elaboración propia a partir de informes técnicos.

Sector	Caudales [l/s]
Posta El Azul	5,0
Escuela El Azul	0,6
Escuela Lonconao	0,06
Escuela El Límite	1,0
Escuela Las Escalas	2,0
Total	8,66

Para determinar el valor total se suman todos los caudales que se tienen, obteniéndose una extracción total en la cuenca del río Yelcho de 47,71 [l/s]. En la Fig. 17 se muestra la distribución espacial de los DAA en la cuenca de estudio.

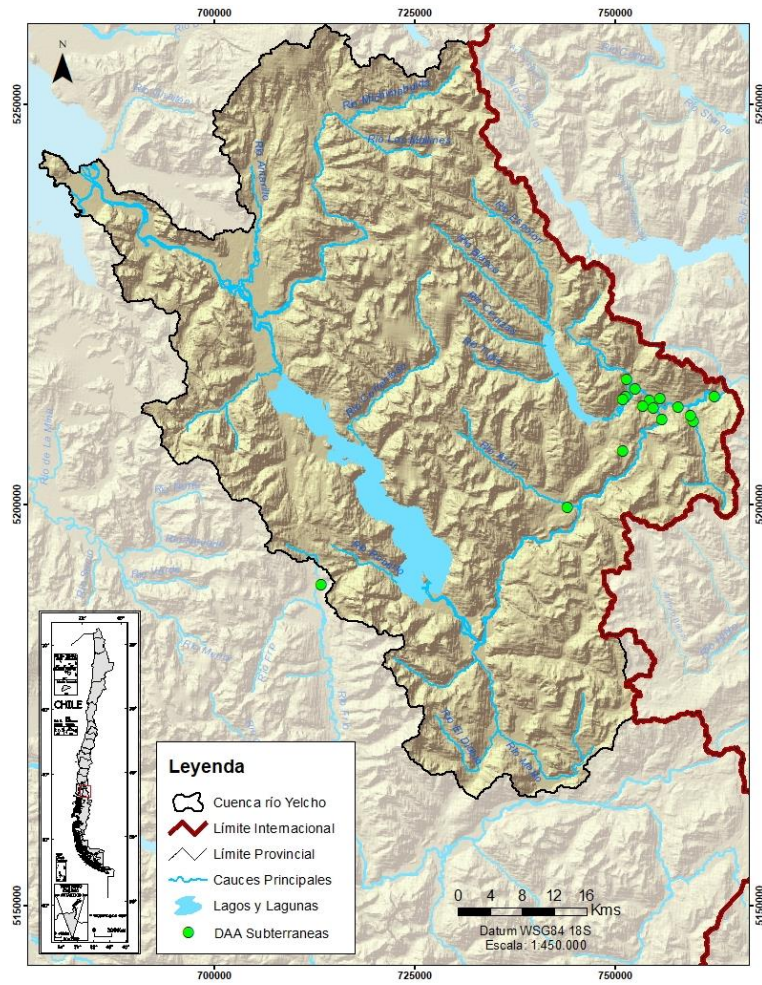


Fig. 17. DAA subterráneas en la cuenca del río Yelcho. Elaboración propia en base a datos de la DGA (2022).

5. Caracterización Hidrogeológica

Este estudio tenía contemplado realizar una caracterización hidrogeológica que incluyera identificación de unidades hidrogeológicas, cálculo de flujos subterráneos, piezometría y volumen. Sin embargo, debido a la falta de datos dentro de la cuenca, este análisis se centrará en la caracterización de unidades hidrogeológicas, cálculo de parámetros hidráulicos y delimitación de la geometría acuífera.

5.1 Unidades hidrogeológica

5.1.1 Unidades hidrogeológicas

Una unidad hidrogeológica se define como un conjunto de rocas o depósitos no consolidados cuyo funcionamiento hidrogeológico es similar por lo que conviene estudiarlas conjuntamente.

Para este estudio, las unidades hidrogeológicas y su geometría fueron determinadas en base a la información del Mapa geológico a escala de 1:1.000.000 y al Mapa Hidrogeológico del Sernageomin de 1986, integrando además la siguiente información.

- Información de estudio geofísico tipo Transiente Electromagnético (TEM) realizado por o para GEOSAFE.
- Estratigrafía de los pozos inventariados.

Sin embargo, debido a la escala a la cual están realizados los mapas, la información dentro del área de estudio no es detallada. Junto con esto, la información de estratigrafías dentro de la cuenca es muy escasa y los pozos que si presentan información estratigráfica no son profundos por lo que no aportan al momento de relacionar la información de los TEM con la estratigrafía para poder definir unidades.

Para describir las unidades hidrogeológicas se utilizó la metodología de Struckmeier, W.: Margat, J. del año 1995, la cual clasifica de acuerdo al tipo de permeabilidad, que puede ser granular o fisurado y asigna la importancia hidrogeológica según la capacidad de almacenar y transmitir agua.

La Fig. 18 muestra las unidades hidrogeológicas según la clasificación de Struckmeier & Margat (1995) en base a la información de la Geología a escala 1:1.000.000 del SERNAGEOMÍN.

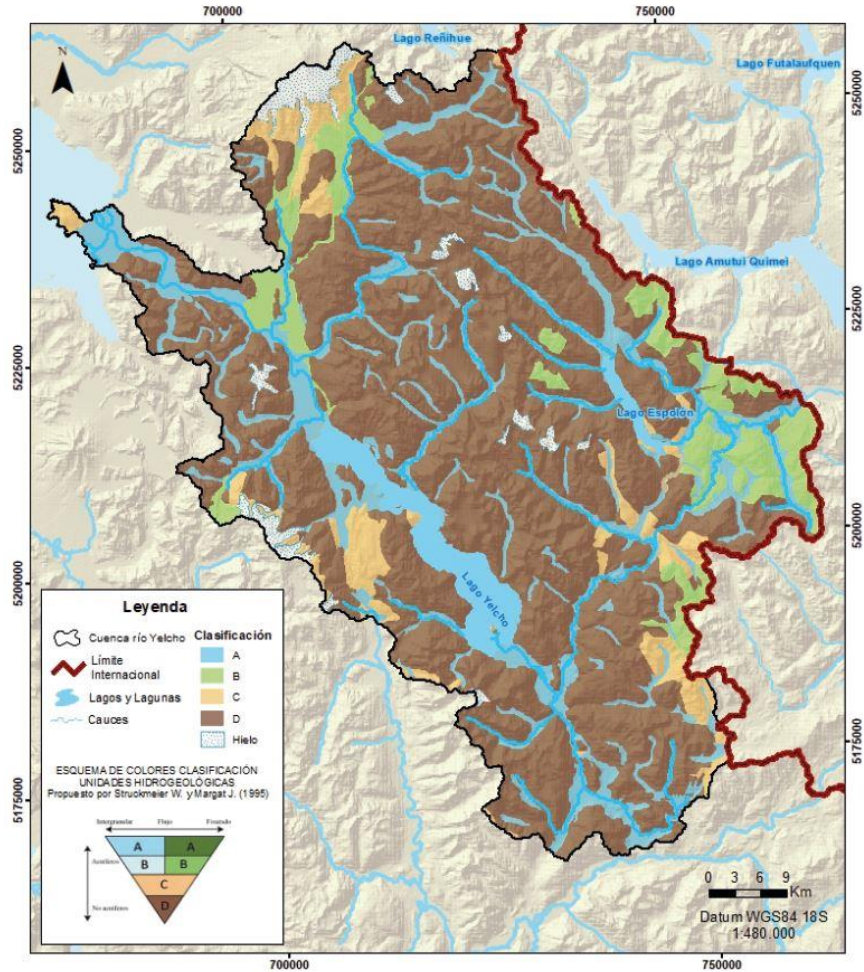


Fig. 18. Mapa Hidrogeológico de la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan las cuatro categorías definidas para la clasificación de las unidades presentes dentro de la cuenca del río Yelcho.

- Unidad A: Esta unidad corresponde a depósitos no consolidados, correspondiente a sedimentarios de origen fluvial, glaciofluviales y aluviales con granulometrías gruesas, correspondientes a gravas, gravas arenosas y arenas. Esta unidad posee un alto potencial hidrogeológico y representa un acuífero producto intergranular.
- Unidad B: Esta unidad se compone de depósitos no consolidados de origen aluvial y fluvial con granulometrías medias a finas. Representa un acuífero con un menor potencial que la unidad A.

- Unidad C: Esta unidad corresponde a rocas sedimentarias y volcánicas y tiene un bajo potencial hidrogeológico. Pueden presentar una permeabilidad secundaria ligada a estructuras de fallas presente en estas unidades.
- Unidad D: Unidad correspondiente a rocas intrusivas y metamórficas que representan al basamento. Poseen un muy bajo a nulo potencial hidrogeológico.

5.1.2 Distribución de unidades

A continuación, se describen las unidades hidrogeológicas identificadas en el subsuelo:

UHG-1: Unidad constituida por depósitos de gravas, gravas arenosas y arenas de origen fluvial y glaciofluvial los cuales presentan una alta permeabilidad. Según Sanders (1998) su porosidad eficaz varía entre los 13% y los 35 %, mientras que su conductividad hidráulica va desde 1 y 100 m/día por lo que esta unidad posee un alto potencial hidrogeológico.

UHG-2: Unidad constituida por sedimentos no consolidados de origen fluvial de diferentes tipos de granulometrías correspondientes a gravas, arenas, limos y arcillas con una permeabilidad media. Según Sanders (1998) su porosidad eficaz varía entre el 10% y 35%, mientras que la conductividad hidráulica varía entre 0,01 y 100 m/día por lo que se infiere que posee un potencial hidrogeológico medio.

UHG 3: Unidad compuesta de depósitos de origen glacial correspondiente a sedimentos morrénicos, cuyos tamaños de clastos varían desde bloques a arenas con una matriz de material fino de arcilla y limo. Según Sanders (1998), unidades con alto porcentaje de material fino poseen una conductividad hidráulica baja ($< 10^{-2}$ m/día) por lo que no conforman buenos acuíferos. Esta unidad posee un bajo potencial hidrogeológico.

UHG 4: Unidad formada por rocas ígneas intrusivas pertenecientes al Batolito Norpatagónico, el cual cubre aproximadamente el 60% del área de estudio. Los valores de conductividad hidráulica según Sanders (1998) para rocas intrusivas no fracturadas varían de 10^{-9} a 10^{-5} m/día, por lo que podría ser considerada como una unidad de bajo a nulo potencial hidráulico. Sin embargo, una permeabilidad secundaria podría existir dentro de esta unidad teniendo en cuenta las fallas presentes en el área de estudio y las vertientes que afloran en distintos puntos. Se requiere de un estudio más detallado para conocer la permeabilidad secundaria asociada a la meteorización y al fracturamiento..

UHG 5: Unidad constituida por arcillas saturadas que se encuentran en forma de lentes dentro de la unidad UGH 1. Presenta un potencial hidrogeológico bajo.

Las Fig. 19 a la 27 muestran los perfiles hidrogeológicos esquemáticos elaborados que muestra la distribución de las unidades dentro del subsuelo.

a) Línea 1: Sector Futaleufú

Este perfil está integrado por 10 sondeos TEM, realizado en el sector de la comuna de Futaleufú. Tiene un largo de 9 km con una dirección preferencial de oeste-este.

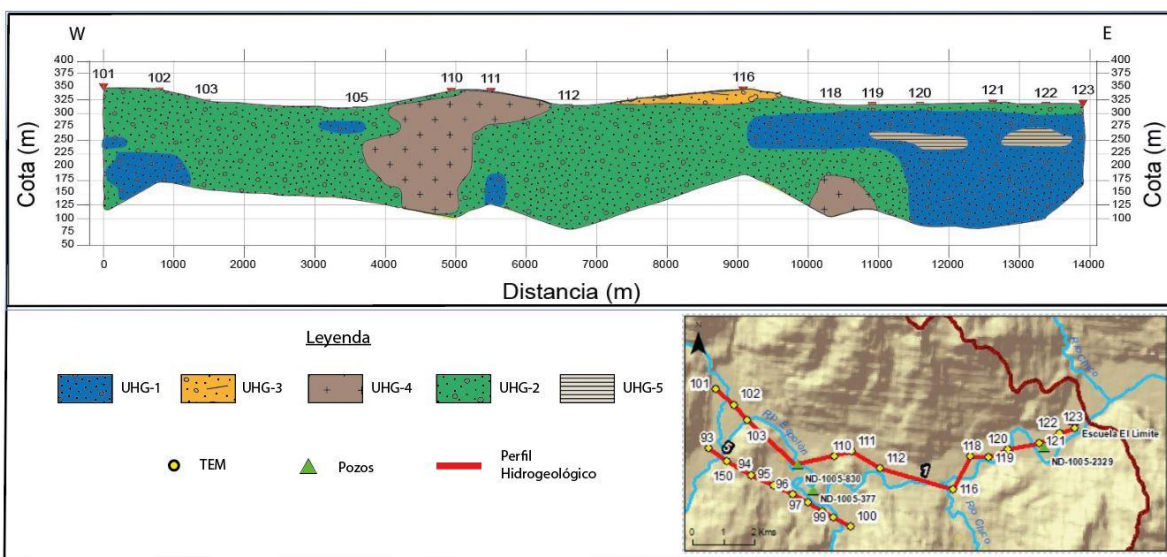


Fig. 19. Perfil Hidrogeológico esquemático del sector de Futaleufú. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos TEM.

En este perfil, la unidad UHG1 se distribuye hacia el sector de la frontera hacia Argentina, en donde se presentan los mayores espesores de esta unidad con unos 150 m aprox. Hacia el oeste se presentan espesores de 75 m. La unidad UGH2 se distribuye de Este a Oeste de forma casi homogénea siendo instruida por una unidad (UHG4) de carácter intrusiva en el sector cercano a la localidad de Futaleufú, al oeste del perfil. Posee una potencia de 175 m aproximadamente. Por otro, la unidad UHG5 se presenta en forma de lentes en el sector cercano a la frontera de forma localizada y presenta espesores de 20 m aproximadamente. Por último, se presenta la unidad UHG4 que instruye en el sector oeste, cercano a Futaleufú

b) Línea 2: Sector Espolón

Este perfil se compone de 3 sondeos TEM, realizado en el sector de El Espolón, al sureste del Lago Espolón y al norte del Lago Lonconao. Tiene un largo de un kilómetro y con dirección N-S.

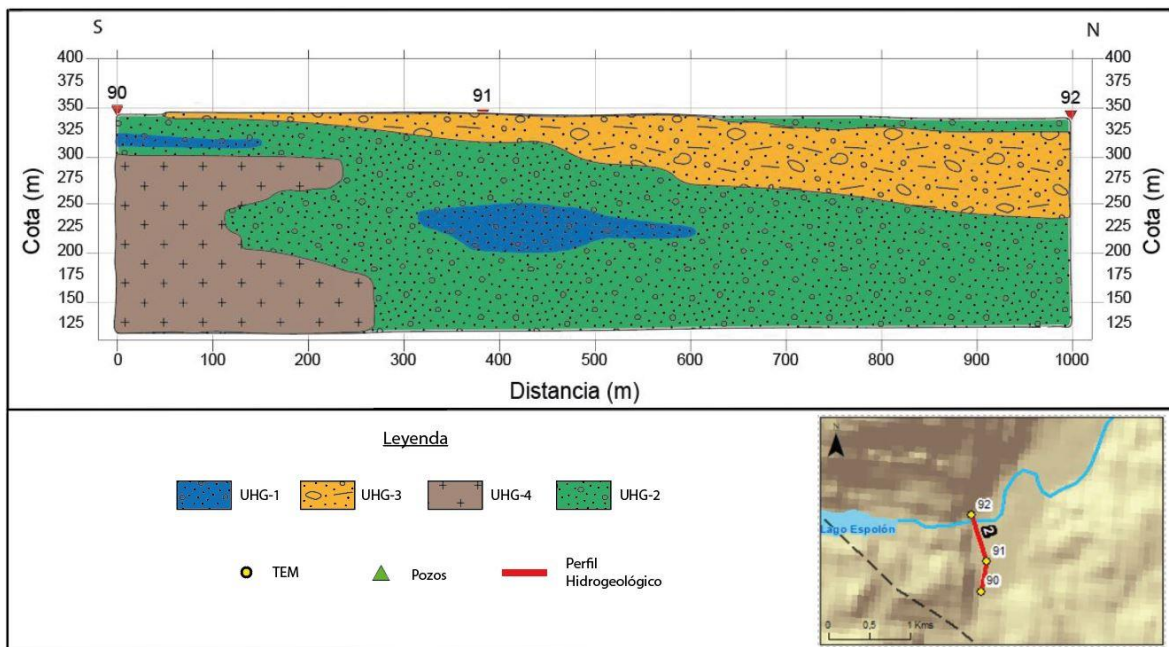


Fig. 20. Perfil Hidrogeológico esquemático del sector del Lago Espolón. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos TEM.

La Unidad UHG1 aparece en forma de lentes a 25 m de profundidad en el TEM 90 y a 100 m aproximados de profundidad en el TEM 91, donde alcanza su mayor espesor, de unos 20 metros aprox. La unidad UHG2 en este sector pueden corresponder a depósitos fluvio-glaciares con permeabilidad variable. Se encuentra distribuida a lo largo del perfil y está depositado sobre la unidad UHG4. Esta última unidad corresponde a secuencias volcánicas presentes en el sector, compuestas por lavas y aglomerados basálticos a andesíticos.

c) Línea 3: Sector Palena

Este perfil se compone de 13 sondeos TEM, realizado en el sector sur de la cuenca, camino hacia Palena. Tiene un largo de 15,6 kilómetros con orientación W-E.

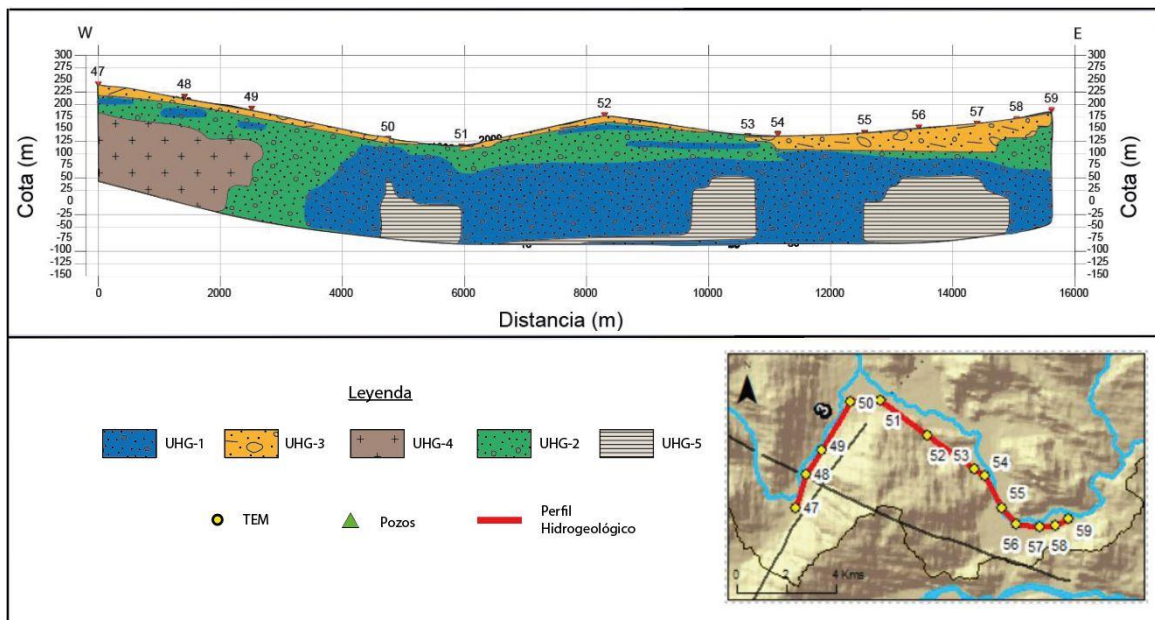


Fig. 21. Perfil Hidrogeológico esquemático del sector de Palena. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos TEM.

En este perfil la unidad UHG1 se distribuye a una profundidad variable entre los 25 y 100 metros entre los TEM 50 y 59. Se presentan espesores entre 100 y 150 metros aproximadamente, donde el mayor espesor se presenta en los TEM 50 y 51 los cuales se encuentran ubicados en una zona de bifurcación del río el Diablo. Luego el lado este del perfil sigue por un sector con mayores depósitos sedimentarios, siguiendo el curso de un cause menor. En este mismo sector, se observa la unidad UHG5 en algunos TEM a una profundidad de unos 75 metros como en forma de pulsos con potencia de 100 metros, en donde presenta una mayor saturación y granulometría fina. Por otro lado, el sector oeste del perfil se orienta hacia un valle formado por la erosión glacial, se observa la presencia de una unidad UHG4 de una potencia de 150 metros de altas resistividades, correspondiente al Batolito Norpatagónico, que corresponde al basamento del sector.

Por último, se encuentra una unidad superficial que se distribuye de forma casi homogénea en todo el perfil, con una potencia que varía de oeste a este entre los 20 y 50 m aprox. Esta unidad se define como la unidad UHG3, correspondiente a depósitos morrénicos y fluvio-glaciares con saturación baja.

d) Línea 4: Sector del río Azul

Este perfil se compone de 12 sondeos TEM, realizado en el sector de la confluencia sur de la cuenca, camino hacia Palena. Tiene un largo de 7 kilómetros con orientación SW-NE.

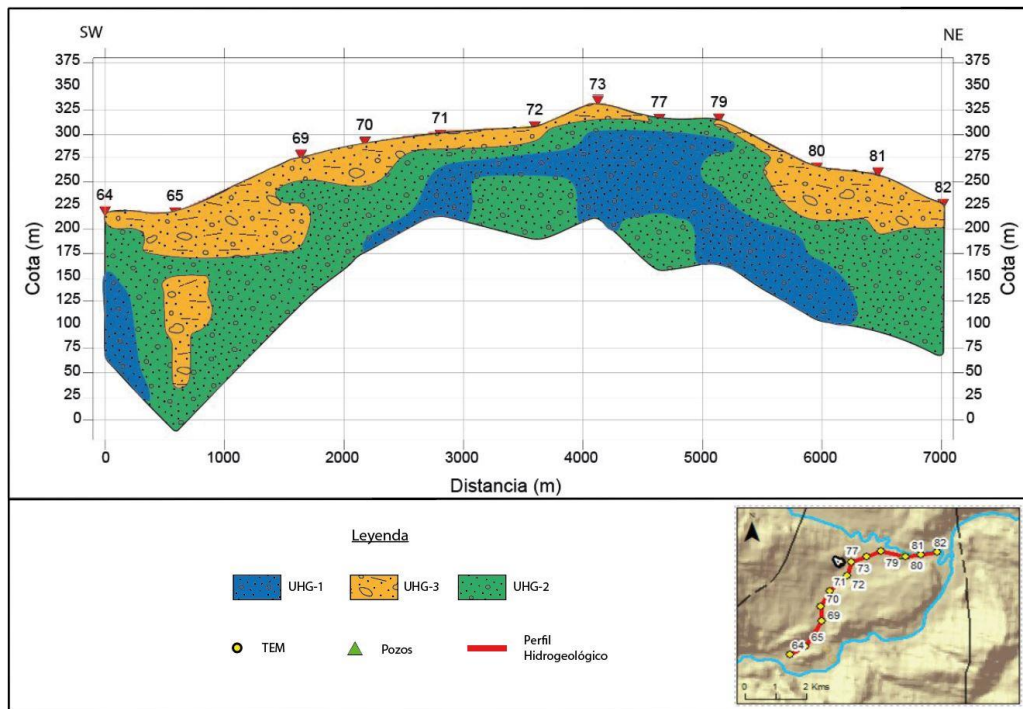


Fig. 22. Perfil Hidrogeológico esquemático del sector de la confluencia del río Azul y el río Futaleufú. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos TEM.

En este perfil se presenta la unidad UHG1 como una unidad superficial que se distribuye a lo largo de todo el perfil con potencias variable que van desde los 10 a los 50 metros. Bajo esta unidad, se encuentra la unidad UHG2 la cual se distribuye a lo largo del perfil con espesores de hasta 100 metros. Por último, se presenta la unidad UHG1 que se distribuye a una profundidad de entre 25 y 50 metros entre los TEM 71 y 79 para luego ubicarse a mayor profundidad. Además, se tiene la presencia localizada de esta unidad en el extremo SW a unos 100 m de profundidad. Los TEM en donde se encuentra la unidad UHG1 se ubican cercanos al curso de los ríos.

e) Línea 5: Sector laguna la Paz

Este perfil se compone de 9 sondeos TEM, realizado en el sector de la confluencia sur de la cuenca, camino hacia Palena. Tiene un largo de 5,3 kilómetros con orientación NW-SE.

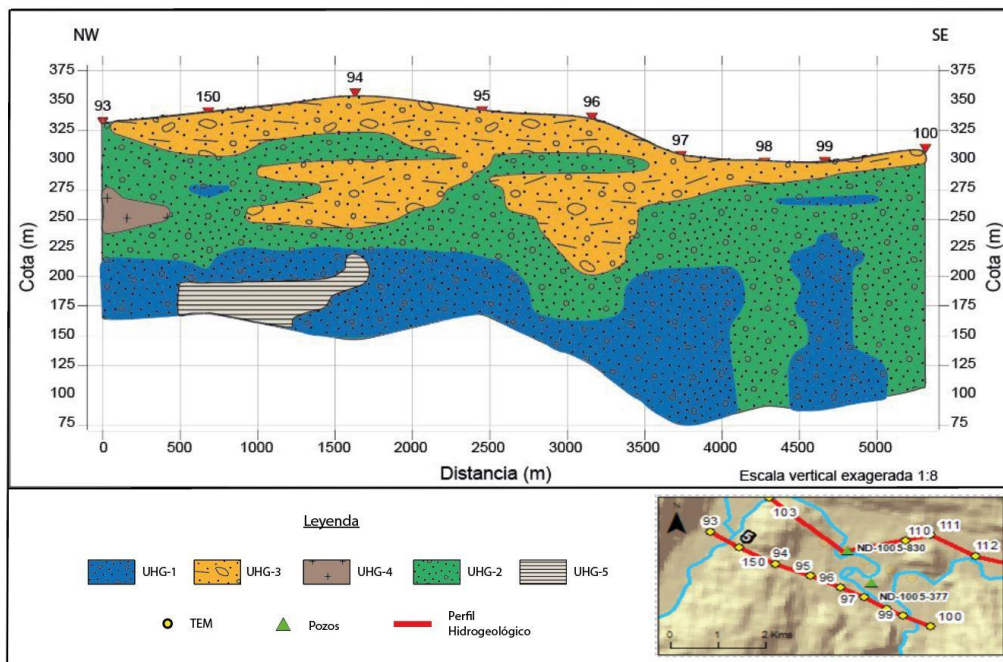


Fig. 23. Perfil Hidrogeológico esquemático del sector de la laguna La Paz. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos TEM.

Se observa la unidad UHG3 correspondiente en este sector a depósitos morrénicos con granulometrías que varían entre bolones y gravas medias en una matriz arcillosa con baja saturación. Esta presenta un potencial que disminuye de noroeste a sureste. Como unidad intermedia se tiene la unidad UHG2 que se distribuye en todo el largo del perfil, con potencias que van desde los 150 metros y que disminuye en el sector medio del perfil a causa de la interacción con los depósitos morrénicos pertenecientes a la unidad UHG3. A profundidades cercanas a los 100 metros se encuentra la unidad UHG1 la cual se distribuye de forma homogénea por todo el perfil a excepción del lado extremo SE, donde esta unidad desaparece en los TEM 98 y 100. Por último, se observa la unidad UHG5 que pareciera estar instruyendo desde abajo a la unidad UHG2.

f) Línea 6: Sector Norte del lago Yelcho

Este perfil se compone de 7 sondeos TEM, realizado en el sector de la desembocadura del río Yelcho. Tiene un largo de 7,3 kilómetros con orientación norte-sur.

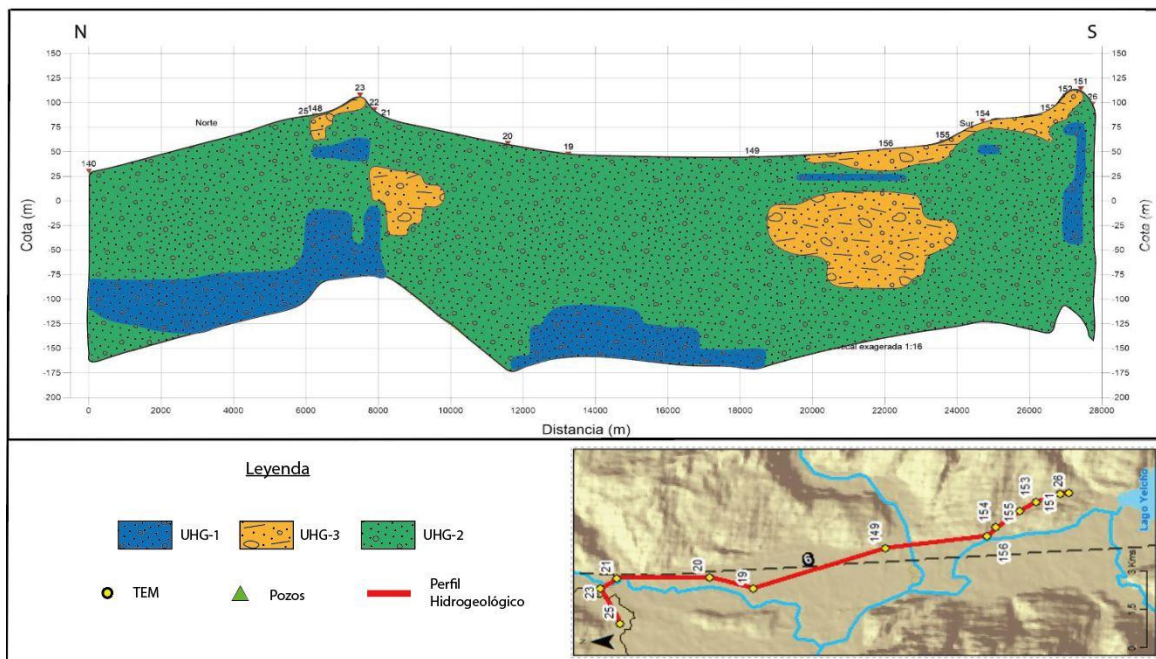


Fig. 24. Perfil Hidrogeológico esquemático del sector norte del lago Yelcho. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos TEM.

En el perfil se observa la unidad UHG2 distribuida a lo largo de todo el perfil, presentando espesores de hasta 150 metros. Se encuentra en superficie solo en el sector medio del perfil, mientras que en el sector sur se tiene en superficie la unidad UHG3. Por su lado, la UHG1 se ubica en el sector inferior del perfil, a una profundidad de 100 a 150 metros aproximadamente.

g) Línea 7: Sector Sur del lago Yelcho

Este perfil se compone de 4 sondeos TEM, realizado en el sector de la desembocadura del río Yelcho. Tiene un largo de 1 km con orientación noroeste-sureste.

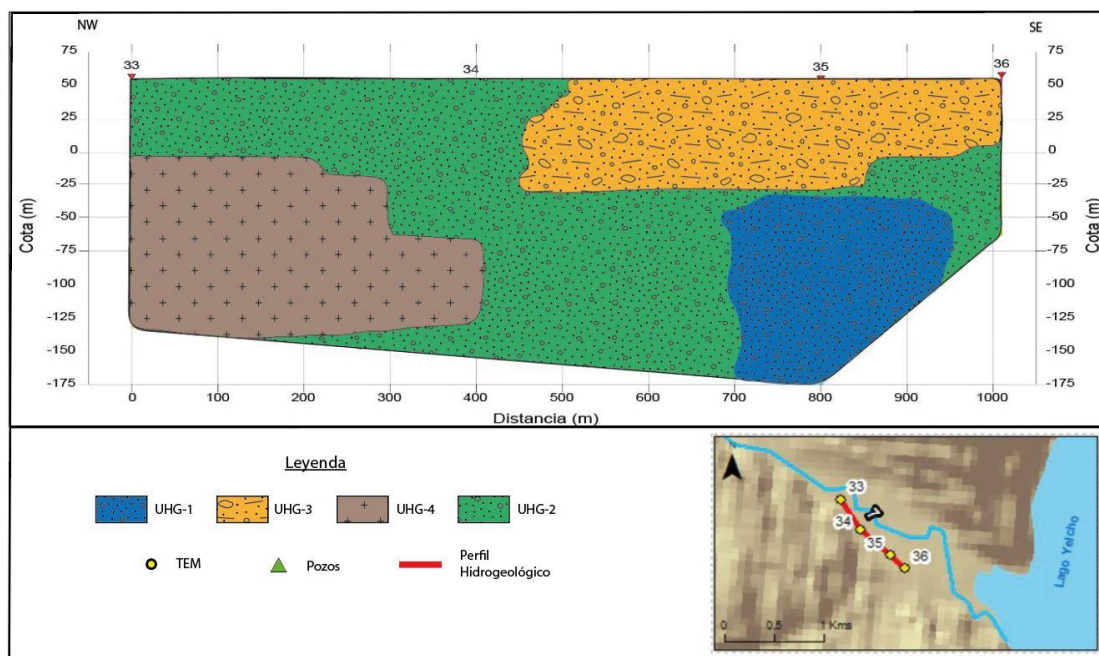


Fig. 25. Perfil Hidrogeológico esquemático del sector sur del lago Yelcho. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos TEM.

La unidad UHG2 se distribuye a lo largo del perfil, pero solo se encuentra en superficie en la parte NW del perfil pues en el lado SE se encuentra sobre ella la unidad UHG1, la cual presenta una potencia de 60 metros aproximadamente y se emplaza en el lado cercado al lago Yelcho. Bajo esta unidad y a unos 75 metros de profundidad se encuentra la unidad UHG1 con una potencia de 130 metros aprox. Por último, en el lado NW y a una profundidad de 50 metros se encuentra la unidad UHG4 que corresponde al basamento en este sector y que presenta una potencia cercana a los 150 metros.

h) Línea 8: Sector río Futaleufú

Este perfil se compone de 5 sondeos TEM, realizado en el sector de la desembocadura del río Yelcho. Tiene un largo de 1,4 km con orientación suroeste-noreste.

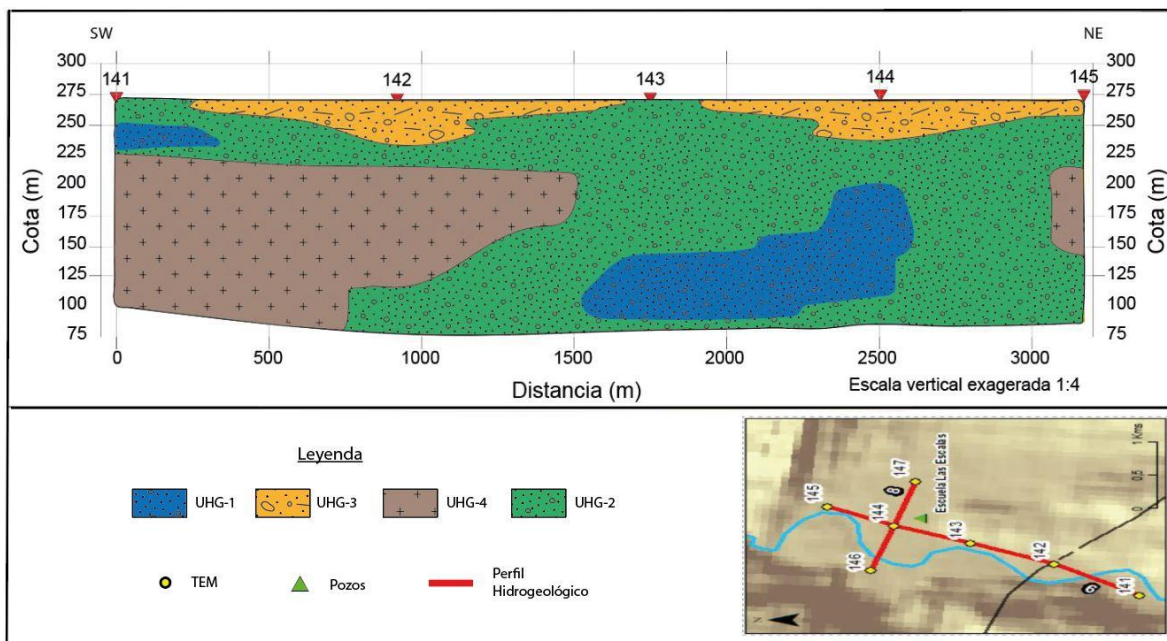


Fig. 26. Perfil Hidrogeológico esquemático del sector del río Futaleufú. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos TEM.

En este perfil se presente la unidad UHG2 a lo largo de todo el perfil, siendo instruido por la unidad UHG4 desde el sur y el norte, el cual representa el basamento en este sector. La unidad UHG3 se presenta como gravas y arenas depositadas a los bordes del río. Por último, la unidad UHG1 se encuentra de forma somera en este sector, presentandose a 25 metros de profundidad al suroeste.

5.2 Geometría de relleno

En base a la interpolación de los datos de gravimetría se obtiene la profundidad del basamento y así, se delimita la geometría acuífera. En la Fig. 22 se muestra la profundidad del basamento en la cuenca del río Yelcho.

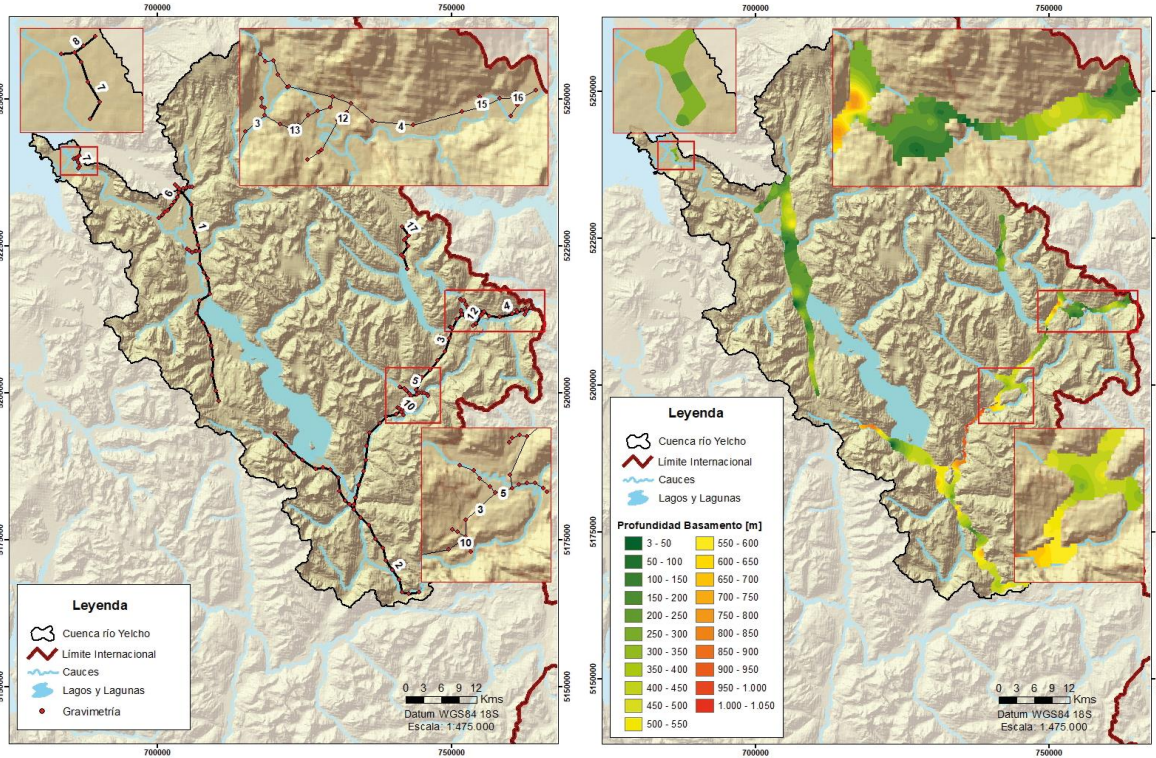


Fig. 27. Profundidad del basamento de la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia.

De la misma forma, a partir de las mediciones de gravimetría se crearon perfiles gravimétricos. La Fig. 28 y 29 muestran los perfiles 1 y 3 respectivamente.

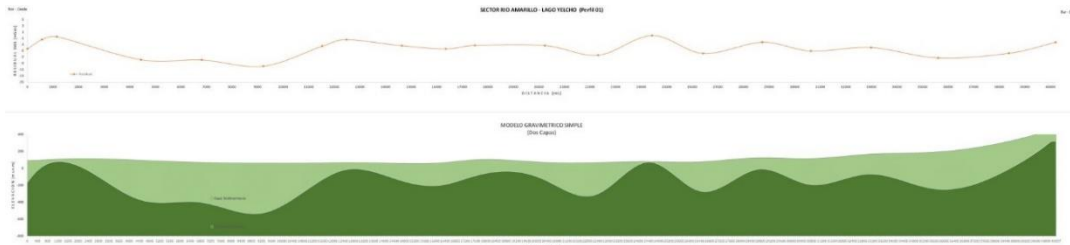


Fig. 28. Perfil gravimétrico 1 correspondiente al tramo río Amarillo- Lago Yelcho. Fuente: Elaborado por el equipo geofísico del proyecto.

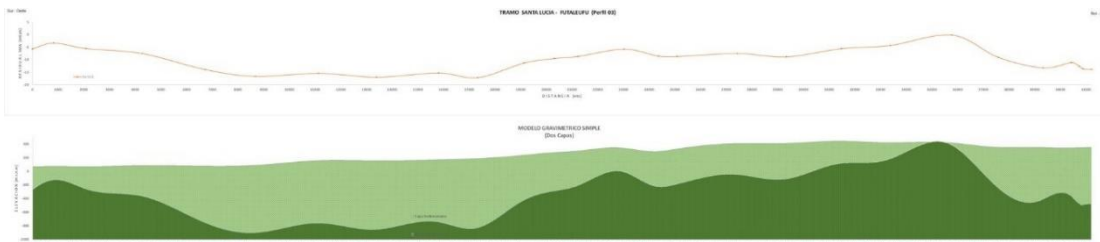


Fig. 29. Perfil gravimétrico 3 correspondiente al tramo Santa Lucia – Futaleufú. Fuente: Elaborado por el equipo geofísico del proyecto.

5.3 Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos se establecen, fundamentalmente, en función de pruebas de bombeo. Un ensayo de bombeo consiste en la extracción de agua desde un pozo bajo cierto caudal controlado, al mismo tiempo que se observa la evolución en el tiempo del nivel saturado en la propia captación y en otras cercanas, llamados pozos de observación. Se tienen dos tipos de pruebas, la “prueba de gasto constante” que es cuando se tiene un valor de caudal fijo y la “prueba de gasto variable” que es cuando el valor del caudal varía durante la extracción.

En el área de estudio, sólo se encontraron tres antecedentes técnicos -uno publicado por la DGA y los otros dos entregados por la Municipalidad de Futaleufú- con información completa de pruebas de bombeo a caudal constante y variable, donde el periodo en que se registra el nivel dinámico varía entre un ensayo y otro.

Cabe destacar que, existe solo información de los descensos del nivel de agua del pozo de bombeo, no así en los piezómetros o pozos de observación. De la misma forma, se desconoce el espesor del acuífero, por lo que solo es posible realizar el cálculo de la transmisividad y no del coeficiente de almacenamiento, que requiere de información de niveles de pozos de observación. La distribución geográfica de los pozos con información de ensayo de bombeo se muestra en la Tabla 17 y en la Fig. 30.

Tabla 16. Información de pozos en la cuenca del río Yelcho que cuentan con ensayos de bombeo. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DGA.

Pozo	E	N	Propietario
ND-1005-830	266947	5214083	ESSAL
Las Escalas	266548	5208635	Municipalidad de Futaleufú
El Límite	275647	5215911	Municipalidad de Futaleufú

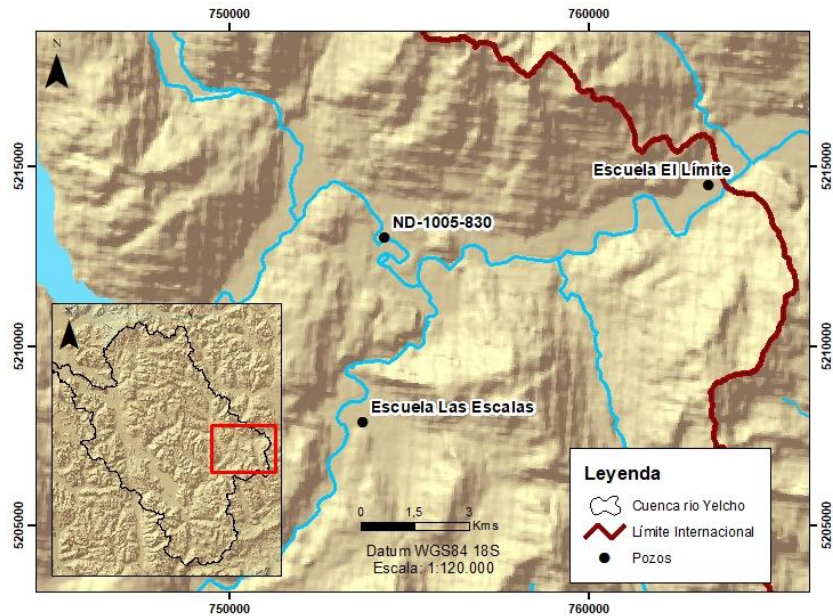


Fig. 30. Ubicación de pozos con información de ensayos de bombeo. Fuente: Elaboración propia.

5.3.1 Transmisividades

La transmisividad (T) se define como el caudal que atraviesa una franja vertical de terreno, de ancho unitario y de altura igual a la del manto permeable saturado bajo un gradiente unitario a una temperatura fija determinada (Custodio & Llamas, 1983). Esto representa la capacidad que tiene el acuífero para ceder agua, y se define en función de su permeabilidad por el espesor y se mide en $m^2/día$.

Solo en el informe técnico del pozo ND-1005-830 se encuentran resultados de transmisividad y coeficiente de almacenamiento, mientras que para los otros fue necesario emplear el software AquiferTest para obtener la transmisividad. Los valores encontrados en el expediente del pozo ND-1005-830 se muestran en la tabla a continuación.

Tabla 17. Datos de la transmisividad y coeficiente de almacenamiento del pozo ND-1005-830. Fuente: Elaboración propia a partir de la información del expediente del pozo ND-1005-830.

Parámetro	Valor
Transmisividad (T)	467,66 [$m^2/día$]
Coeficiente de almacenamiento (s)	0,2

En la Tabla 18 se muestran los resultados de transmisividades obtenidos utilizando el programa AquiferTest.

Tabla 18. Valores de transmisividad obtenidos. Fuente: Elaboración propia a partir de expedientes y de informes técnicos de pozos.

Pozo	Transmisividad [m ² /día]
Las Escalas	20
El Límite	17

En el Anexo A se muestran los gráficos obtenidos mediante el programa AquiferTest para estos pozos. Transmisividades con valores entre 10 y 100 m²/día indican una baja capacidad para transmitir agua, mientras que transmisividades entre 100 y 500 m²/día indican acuíferos con productividad media a alta. Sin embargo, estas apreciaciones son muy relativas y solo sirven para hacer una comparación de valores (Tabla 19).

Tabla 19. Clasificación del acuífero según transmisividad. Fuente: Iglesias, 2002 en CENTER 2009.

Transmisividad [m ² /día]	Clasificación estimativa
$T < 10,368$	Muy baja
$10,368 < T < 103,68$	Baja
$103,68 < T < 501,12$	Media a Alta
$501,12 < T < 1036,8$	Alta
$T > 1036,8$	Muy Alta

En la Fig. 31 se muestra la distribución de los valores obtenidos de transmisividad.

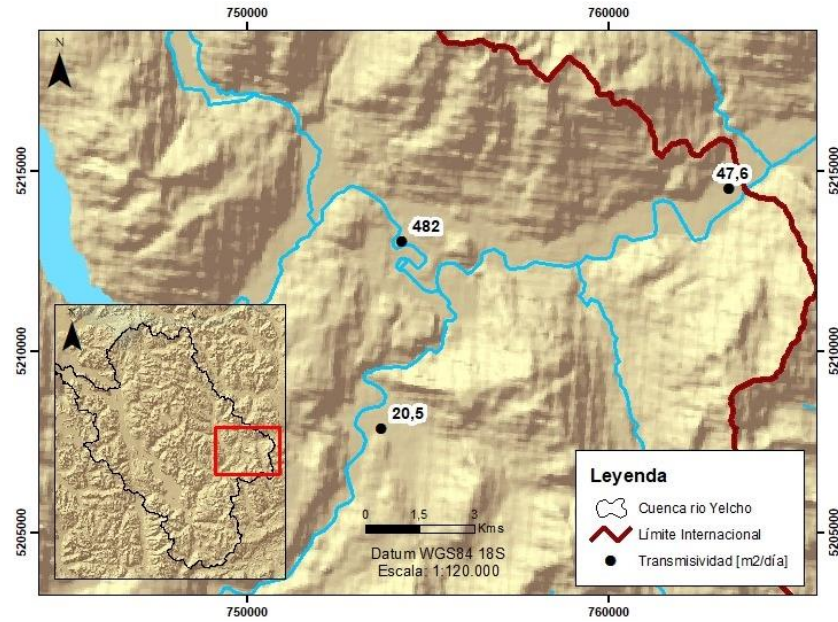


Fig. 31. Valores de transmisividad obtenidos acorde a la información de los pozos ND-1005-830, Escuela Las Escalas y Escuela El límite. Fuente: Elaboración propia.

5.3.2 Coeficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento es el volumen de agua que una unidad de superficie del acuífero libera o absorbe de su almacenamiento cuando el nivel piezométrico varía en una unidad (Custodio & Llamas, 1983).

En este estudio no es posible el cálculo del coeficiente de almacenamiento debido a que los ensayos de bombeo fueron realizados sin un pozo de observación. Solo se tiene el valor del expediente ND-1005-830 que presenta un coeficiente de almacenamiento de 0,2.

6. Caracterización geoquímica

En este capítulo se describen las características fisicoquímicas del agua subterránea, tales como pH, temperatura, sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica, como también la composición química. Este último ítem incluye la concentración de cationes y aniones, no considerando alcalinidad ni sustancias orgánicas disueltas en ella. Para ello, se realizaron mediciones in situ y se extrajeron 45 muestras en distintos cuerpos de agua presentes en la cuenca del río Yelcho.

6.1 Parámetros fisicoquímicos

Se realizaron mediciones in situ con la intención de comprender los factores y procesos del ciclo hídrico. El agua subterránea natural posee una serie de características fisicoquímicas que varían en el espacio y tiempo como consecuencia de la composición química del agua y de las acciones naturales externas y antrópicas. En el Anexo B se encuentra la tabla con las muestras obtenidas, su distribución y los parámetros medidos para cada una. La variación de los parámetros medidos se muestra en la Fig. 32.

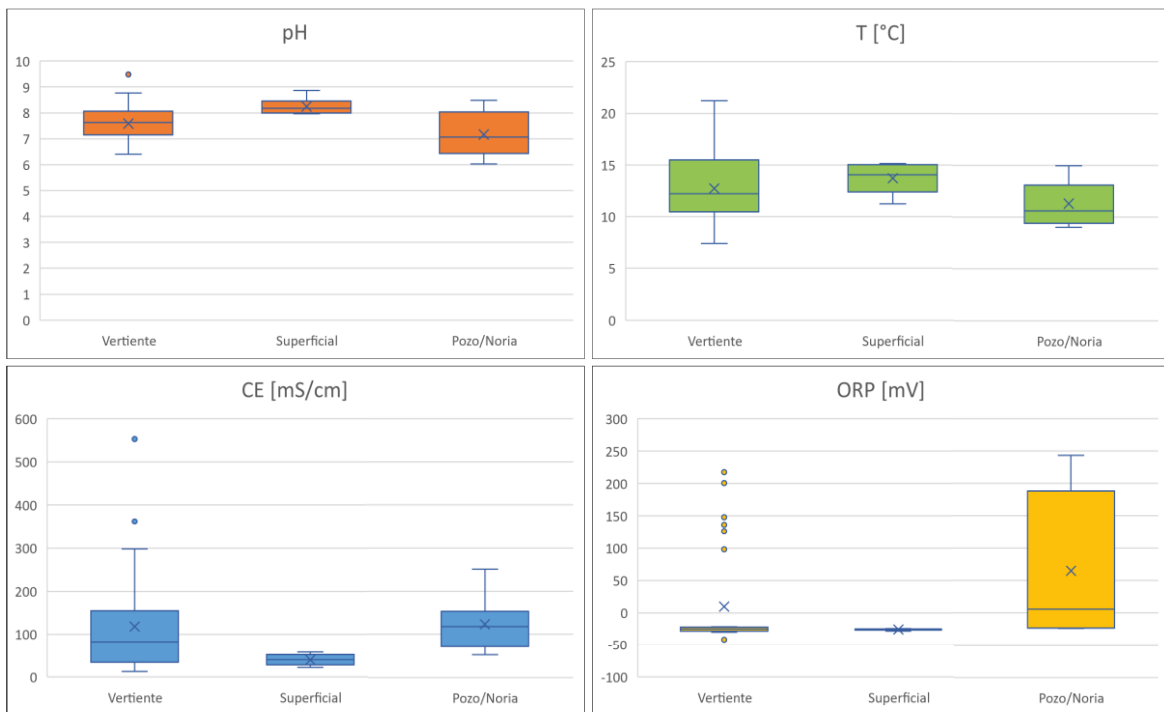


Fig. 32. Parámetros fisicoquímicos (pH, temperatura, conductividad eléctrica y potencial redox) para muestras de agua de vertientes, aguas superficiales y aguas subterráneas. Fuente: Elaboración propia.

6.1.1 pH

El pH indica el grado de acidez o basicidad de la solución. En las muestras de Pozo/Noria se presentan pH entre los 6,02 y 8,48 con un promedio de 7,2., mientras que en las mediciones de agua superficial se tienen pH entre los 7,97 y 8,86 con un promedio de 8,3. Por último, en las mediciones de agua de vertiente se tienen pH entre los 6,4 y 9,48 con un promedio de 7,6.

6.1.2 Temperatura

El rango de temperatura de muestras de agua provenientes de pozos o norias varían entre los 9 y los 14,9°C con un promedio de 11,3°C. En el caso de las vertientes las temperaturas van desde los 7,4°C a los 21°C con un promedio de 12,7°C, mientras que las muestras superficiales presentan temperaturas entre los 11,2°C a 15,2°C con un promedio de 13,7°C.

6.1.3 Conductividad eléctrica

Se entiende como conductividad eléctrica, la capacidad del agua de conducir electricidad. En este estudio, los valores obtenidos de electro-conductividad para las muestras de pozos y norias van desde los 53 a los 251 [mS/c], con un promedio de 123,5 [mS/c]. Para las muestras de vertientes se tienen valores entre los 12 y los 553 [mS/c], con un promedio de 118,1 [mS/c]. Por último. Para las muestras de aguas superficiales se tienen conductividades eléctricas desde los 22 a los 57 [mS/c], con un promedio de 39,2 [mS/c].

6.1.4 Potencial Redox (ORP)

La Organización Mundial de la Salud en 1971 establece que el potencial REDOX es la medida más confiable para medir la calidad sanitaria del agua potable. La OMS afirma en una publicación que: “Hay una relación exponencial entre la velocidad de inactivación de los virus y el ORP. Un ORP de 650 mV (medido con un electrodo platino/calomel) provocará la casi instantánea desactivación de los virus incluso en altas concentraciones” (OMS, 1971). Es decir, un valor de 650 mV será considerado como valor apropiado para el agua potable con lo que se considera que el agua está desinfectada si es que se mantienen los valores entre los 650 mV y 700mV durante 30 minutos.

El potencial redox para las muestras de pozos y norias van desde los -24.1 a los 243.6 [mV], con un promedio de 64.7 [mV]. Para las muestras superficiales se tienen valores entre los -28.1 y los 24.3 [mV]. Por último, para las muestras de vertientes el potencial redox va desde los -41.9 y 217.3 [mV] con un promedio de 9.8 [mV].

6.2 Análisis Químicos

Se realizaron 15 muestras de iones mayoritarios en distintas fuentes de agua dentro de la cuenca del río Yelcho. Se recolectaron muestras de agua subterráneas, superficiales y de vertientes. La ubicación de estas muestras se puede observar en la Fig. 33 y en la Tabla 21 presentada a continuación:

Tabla 20. Ubicación de las muestras de agua tomadas en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Muestra	Fuente	UTM Este	UTM Norte
YE-007	Pozo/Noria	763446	5214521
YE-009	Pozo/Noria	755548	5213359
YE-010	Pozo/Noria	750736	5212706
YE-041	Pozo/Noria	763446	5214521
YE-031	Superficiales	685748	5239922
YE-030	Superficiales	708184	5211639
YE-029	Superficiales	730562	5186016
YE-028	Superficiales	756788	5212853
YE-026	Superficiales	741628	5165891
YE-001	Vertientes	751404	5215683
YE-005	Vertientes	733889	5182796
YE-006	Vertientes	759992	5209078
YE-008	Vertientes	716816	5191606
YE-027	Vertientes	740787	5168595
YE-042	Vertientes	716816	5191606

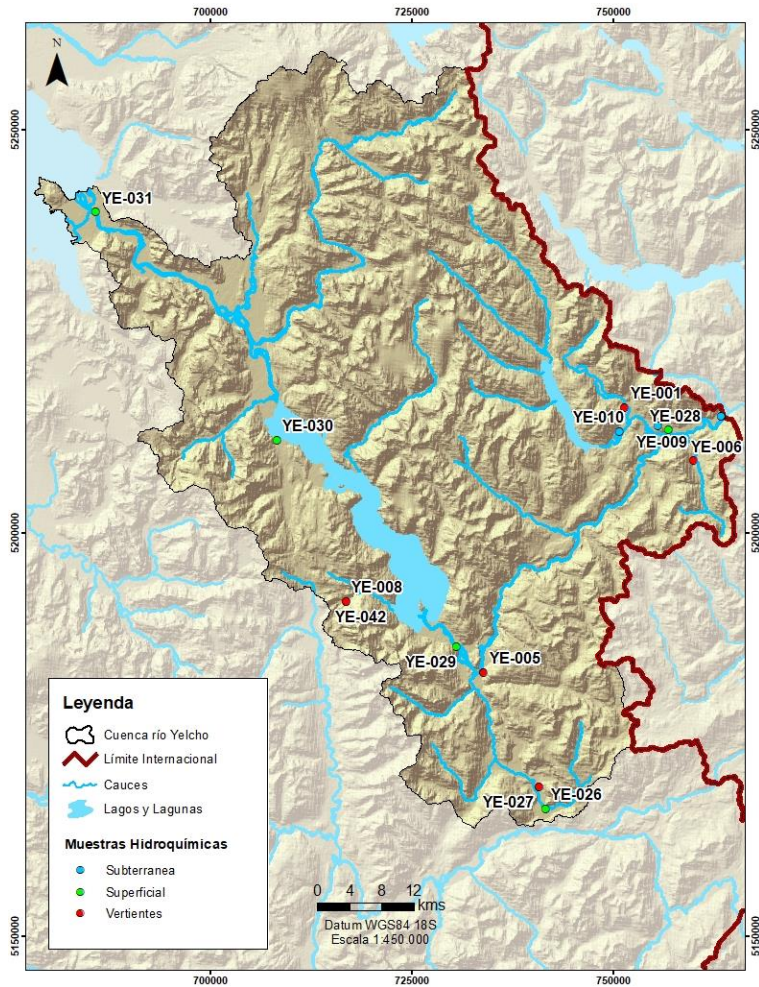


Fig. 33. Distribución de las muestras de agua tomadas en el área de estudio. Fuente: elaboración propia.

6.2.1 Diagrama de Piper

Con el fin de realizar una comparación entre las tomas de muestras realizadas y determinar el tipo de agua presente en la cuenca, se graficaron las proporciones de los macroelementos presentes en el agua (Ca, Cl, SO₄, CO₃, HCO₃, Ca, Mg, Na, K) en diagramas de Piper. Los resultados se observan en la Fig. 29, donde las muestras dentro del recuadro celeste corresponden a muestras provenientes de pozos o norias, las muestras dentro del recuadro verde corresponden a muestras de aguas de superficie y las muestras dentro del rectángulo rojo corresponden a aguas de vertientes.

Muestras (08-03-2022)

PIPER DIAGRAM

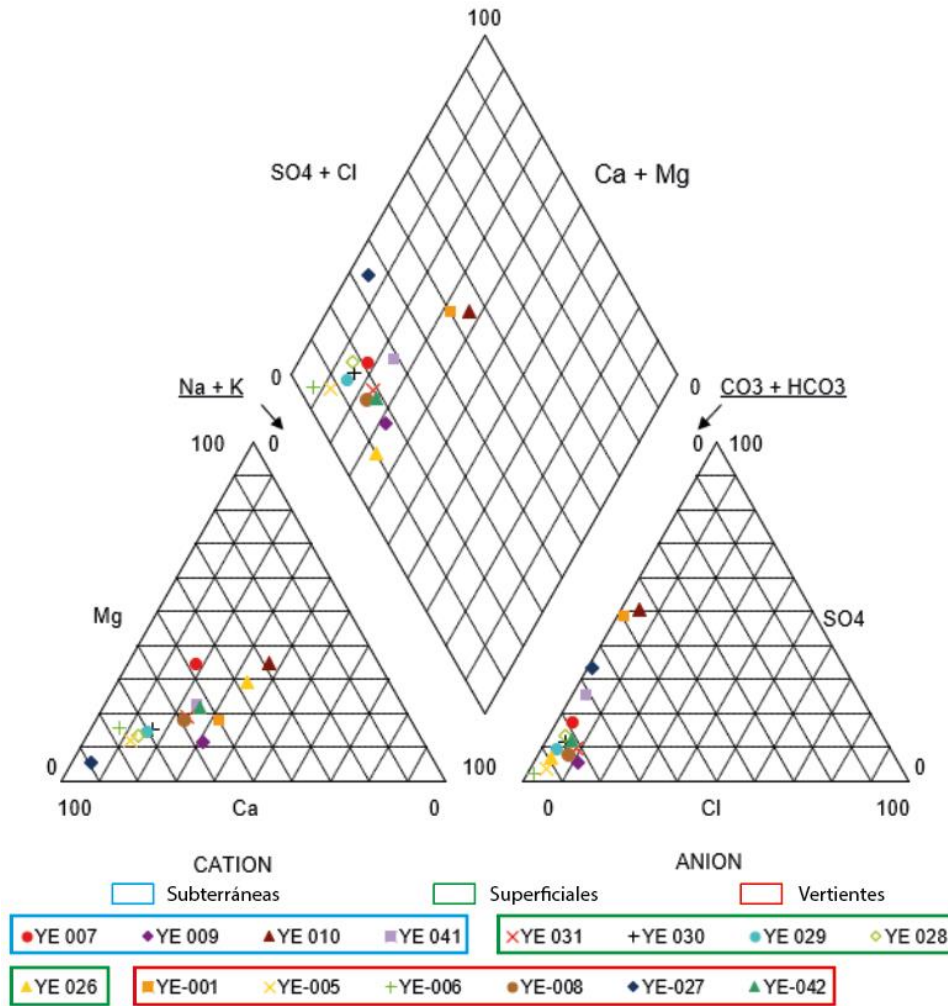


Fig. 34. Diagrama de Piper para muestras de agua tomadas dentro de la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia.

En el diagrama anterior, se observa que las muestras se ubican en la categoría de aguas “Bicarbonatadas cálcicas”. Con excepción de las muestras YE-010, YE-001 e YE-027, las cuales presenta un mayor contenido de cationes de sulfato.

De forma general, del diagrama de Piper es posible interpretar que el agua del acuífero del río Yelcho es de la facie bicarbonatada cálcica, el cual es un grupo típico de aguas relativamente jóvenes y con un escaso tiempo de residencia. Se observa que estas aguas tienen como catión predominante al calcio y como anión predominante al bicarbonato. En la Tabla 22 se muestran los valores para las muestras de agua, junto con los rangos típicos de aguas dulces.

Tabla 21. Comparación de la concentración de elementos mayoritarios entre los valores típicos de aguas dulces y los valores de las muestras.

Ión	Concentración en aguas subterráneas (mg/l)	Concentración en aguas superficiales (mg/l)	Concentración en aguas de vertientes (mg/l)	Concentración en aguas dulces (mg/l), según Custodio & Llamas (1996)
Mg	1 – 2 / 1.4	0.66 – 0.86 / 0.73	0.54 – 5.55 / 1,9	1 – 100
Na	2 – 4 / 3,0	1.37 – 1.68 / 1.5	1.4 – 18.55 / 4.8	1 – 150
Ca	2 – 6 / 4.5	1.51 – 7.82 / 4.7	2.9 – 56.69 / 18,9	10 – 250, incluso 600
HCO ₃	11 – 37 / 27	15.2 – 26 / 21.5	17.8 – 115.8 / 57.6	50 – 350, incluso 800

A partir de la concentración de iones se puede inferir que las aguas presentan muy poca evolución, lo que puede deberse a la poca distancia que estas recorren desde la cordillera presentando así bajos contenidos de sales en solución.

6.2.2 Diagrama de Stiff

Se realizan diagramas de Stiff para obtener información cualitativa del tipo y grado de mineralización relativa de las aguas, la distribución de las muestras se presenta en la Fig. 35. De los diagramas de Stiff elaborados, se observa que las aguas de la cuenca del río Yelcho tienen una configuración similar en la proporción de los iones, teniendo como anión predominante al calcio y como catión predominante al bicarbonato. Todas las muestras, a excepción de YE-010, presentan una configuración con forma de “punta de flecha” la cual es característica de aguas subterráneas (Paris de Ferrer, 2001). La muestra YE-010 presenta una configuración más característica a aguas con intercambio iónico.

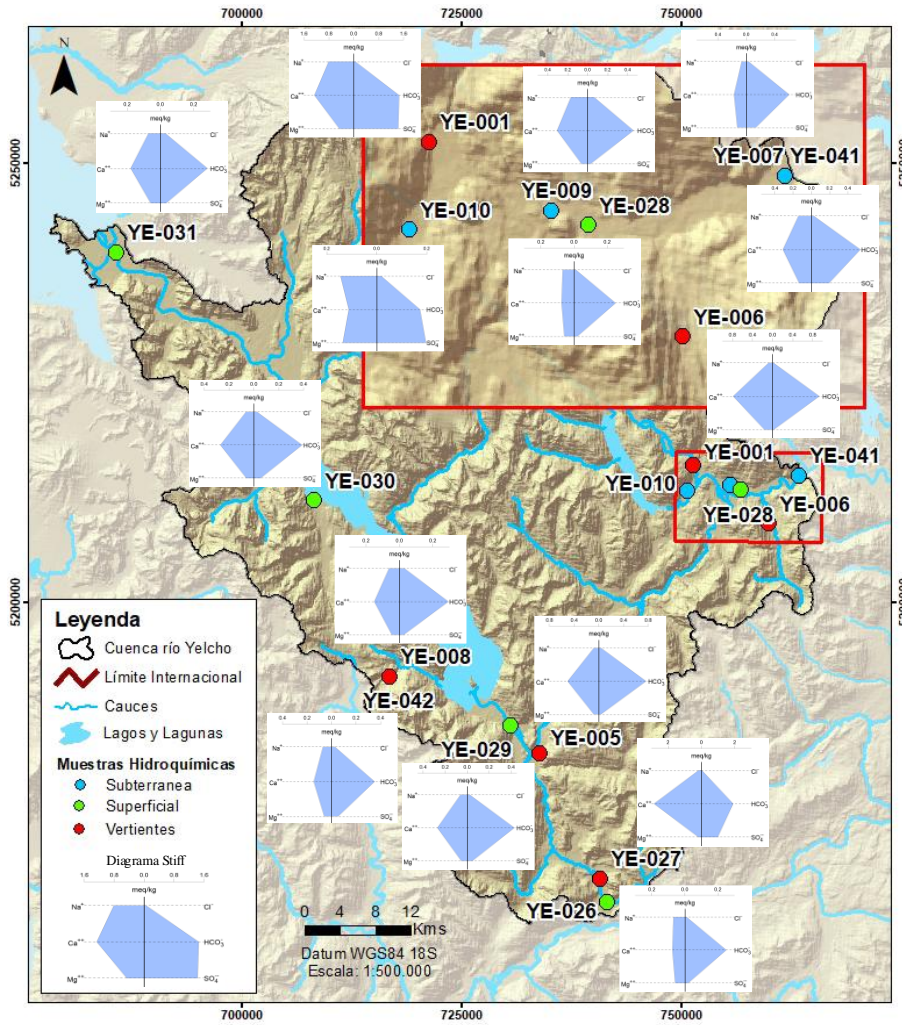


Fig. 35. Diagramas de Stiff de las muestras y su distribución dentro de la cuenca del río Yelcho. Fuente: Elaboración propia.

6.3 Calidad de agua

En base a los parámetros fisicoquímicos obtenidos para aguas subterráneas, se realiza una comparación de estos con los estándares de la norma chilena de calidad de agua potable (NCh409/2005) (Tabla 23). Sin embargo, este es un análisis preliminar ya que no considera parámetros que son considerados en la norma y que no fueron analizados en este estudio, como los parámetros microbiológicos, turbiedad, elementos radiactivos, sustancias orgánicas entre otros.

Tabla 22. Comparación de los valores de parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua subterránea con la norma chilena de calidad de agua potable. Fuente: Elaboración propia.

	Parámetros fisicoquímicos	Nch409/2005 Potable	YE-007	YE-009	YE-010	YE-041
Elementos esenciales	Cu (mg/l)	2	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	Cr (mg/l)	0,05	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	Fe (mg/l)	0,3	5.93	<0.01	<0.01	0.20
	Mn (mg/l)	0,1	0.23	<0.01	<0.01	0.21
	Mg (mg/l)	125	1.52	0.74	1.64	1.63
	Se (mg/l)	0,01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	F (mg/l)	1.5	0.05	0.02	<0.02	0.04
	Zn (mg/l)	3	0.13	<0.01	0.13	<0.01
Elementos no esenciales	As (mg/l)	0,01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	Cd (mg/l)	0,01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	Hg (mg/l)	0,001	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
	Pb (mg/l)	0,05	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	Cl (mg/l)	400	1.17	2.29	0.63	0.90
	NO3 (mg/l)	50	0.13	9.34	0.07	0.13
	NO2 (mg/l)	3	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
Características organolépticas	pH	6.5 – 8.5	6,79	6,02	6,37	6,79
	SO4 (mg/l)	500	6.3	1.4	9.4	9.2
	SDT (mg/l)	1500	56	68	32	64

De la misma forma, se realiza una comparación de los datos obtenidos de los expedientes de pozos con la norma chilena de calidad de agua potable (NCh409/2005). En este caso, se tienen también los parámetros relativos a características organolépticas (Olor, pH y Color verdadero), parámetros microbiológicos y turbiedad.

Tabla 23. Comparación de los valores de parámetros fisicoquímicos en los expedientes de los pozos de la escuela El Límite y Las Escalas con la norma chilena de calidad de agua potable. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro físico químico	Nch409/2005 Potable	Pozo Las Escalas	Pozo El Limite
Cd (mg/l)	0,01	<0,001	<0,001
Fe (mg/l)	0,3	0,043	<0,002
Mg (mg/l)	125	2,06	1,88
NO3 (mg/l)	50	<0,10	<0,10
NO2 (mg/l)	3	<0,5	<0,1
Pb (mg/l)	0,05	<0,02	<0,02
Se (mg/l)	0,01	<0,005	<0,005
Zn (mg/l)	3	0,012	0,014

Tabla 24. Valor de parámetros físicos en los expedientes de los pozos de la escuela El Límite y Las Escalas. Fuente: Elaboración propia.

Parámetros físicos	Nch409/2005 Potable	Pozo Las Escalas	Pozo El Limite
Olor	-	Inodoro	Inodoro
pH	-	6,35 a 22°C	7,08 a 18,8°C
Color Verdadero (u Pt-Co)	-	<10 a ph 6,4	<10 a ph 7,08

En este caso, si se tienen parámetros microbiológicos, los que se presentan en la Tabla 26 a continuación:

Tabla 25. Valor de parámetros microbiológicos en los expedientes de los pozos de la escuela El Límite y Las Escalas. Fuente: Elaboración propia.

Resultados microbiológicos	Pozo Las Escalas	Pozo El Limite
Coliformes Totales (NMP/100 ml)	<1,8	<1,8*
Escherichia coli	Ausencia	Ausencia
Turbiedad (NTU) (mg/l)	1,1	0,5

Cloro Libre Residual (mg/l)	<0,10	<0,10
Coliformes Fecales (NMP/100 ml)	<1,8	No se mide

De la Tabla 23 y 24 se observa que todos los valores obtenidos están dentro de la norma, a excepción de la muestra YE-007 que posee valores fuera de la norma para el Hierro (Fe) y el Manganeso (Mn). El valor elevado de este último puede deberse a factores geológicos o a factores antrópicos.

Los microorganismos del grupo coliforme son un buen indicador microbiano de la calidad de agua. Según la norma, se acepta la presencia de coliformes totales en una muestra cuando se hayan realizado menos de cuatro muestras en el sector, que corresponde a este caso.

En la Tabla 26 se observa que, en cuanto a la turbiedad, ninguna muestra puede exceder el valor de 20 UNT y que la media mensual debe ser menor o igual a 2 UNT, valor obtenido como promedio aritmético de todas las muestras analizadas en el mes.

7. Discusiones

En relación con la hidrogeología, es preciso señalar que la información hidrogeológica existente hasta la fecha dentro de la zona de estudio considera que éste es un sector que a pesar de ser una de las zonas más lluviosas del país, es pobre en cuanto a acuíferos, puesto que afloran rocas metamórficas y plutónicas del Paleozoico y Mesozoico, los cuales serían impermeables y carentes de permeabilidad secundaria. Debido a esto solo existen localmente algunos pozos construidos en lugares con pequeñas acumulaciones de depósitos glacio-fluviales cuaternarios no consolidados, que presentan aguas de buena calidad. (DGA, 2015).

A causa de esto es que dentro de la cuenca del río Yelcho son escasos los pozos que cuentan con información estratigráfica y la mayoría de estos son pozos someros, por lo que no fue posible realizar una correcta calibración con los datos de los TEM, para poder relacionar rangos de resistividades con litologías o granulometrías presentes en la cuenca y así poder llevar a cabo un análisis más acabado a la hora de identificar las unidades hidrogeológicas dentro de la cuenca.

Junto con esto, se considera que la metodología de Struckmeier y Margat (1995) no es la más apropiada para la clasificación de unidades hidrogeológicas ya que considera unidades compuestas por rocas como unidades de bajo a nulo potencial hidrogeológica y ya en la actualidad, nuevos estudios y avances en las técnicas de sondaje de roca dura están mostrando que los medios fracturados en rocas cumplen un rol en la circulación del agua subterránea (Taucare et al., 2020 y Daniele et al., 2020). Por lo tanto, el real potencial hidrogeológico de la unidad D correspondiente al Batolito Norpatagónico entra en discusión teniendo en cuenta que en el área de estudio se presenta el sistema de falla de Liquiñe-Ofqui, el cual le conferiría una permeabilidad secundaria.

Ya en Negri et al. (2018) se habla de aguas termales presentes en zonas cercanas a fracturas a lo largo del Batolito Norpatagónico lo que indica que las fuentes termales son controladas por estructuras y que la capacidad de almacenamiento del acuífero debe estar controlado mediante la circulación de fluidos a través de zonas fracturadas. Es por esto que se plantea que la unidad D posee un mayor potencial hidrogeológico.

En este mismo marco, las aguas termales son aquellas que emanan a la superficie terrestre con una temperatura al menos 4°C más alta que la temperatura media anual del sector donde se encuentran. Diez de las treinta muestras de vertientes cumplen con esto, lo que podría indicar que corresponden a aguas termales, las que fueron calentadas por formaciones geológicas subterráneas que se encuentran a mayor temperatura que la ambiental y luego ascendieron hasta la superficie, a través de fisuras y fracturas en las rocas.

Relacionado a la hidrogeoquímica, las muestras de agua presentan altas concentraciones del ion bicarbonato y calcio, los que suelen ser indicadores de interacciones recientes con rocas carbonatadas (calizas y dolomitas). Esto puede traducirse en que son aguas relativamente jóvenes pues los procesos de disolución en las que se forman ocurren a una escala de tiempo geológica relativamente corta en comparación con otras formas de agua subterránea. Sin embargo, un estudio más detallado que incluya análisis de isótopos y modelado de trazadores proveerían mayor información sobre el origen y edad de las aguas dentro de la cuenca del río Yelcho.

Con respecto a los diagramas de Stiff, a pesar de que de forma general las muestras presentan la forma de flecha, se observan diferencias en el contenido de parámetros lo que se puede deber a varios factores, entre estos se tiene el tiempo de permanencia en el medio, el tamaño de grano predominante, interacción con aguas superficiales como la lluvia y el efecto de la evapotranspiración de las aguas subterráneas cuyo nivel freático está cercano a la superficie (Meneses, 2019).

Por último, de acuerdo con el análisis de la calidad del agua, la muestra YE007 es la única que no cumple con la norma de agua potable chilena debido a que posee valores de concentración de hierro (Fe) y manganeso (Mn) fuera de la norma. Se considera importante estudiar las causas de estos valores debido a que varios autores muestran una relación entre las altas concentraciones de Manganeso en el agua potable con problemas neurológicos en infantes (Bjørklund et al., 2017; Bouchard et al., 2011).

8. Conclusiones

La cuenca del río Yelcho está conformada por valles de origen glacial, los cuales van desde la zona de la cordillera de los Andes hasta desembocar en el océano. Esta morfología resulta en una variabilidad climática dentro de la cuenca, presentándose precipitaciones y temperaturas que disminuyen hacia el oriente. Junto con esto, el análisis del registro pluviométrico evidencia el comportamiento pluvio-nival de la cuenca, presentándose un alza en los meses de invierno y luego en primavera-verano.

Con respecto a la hidrogeología, se definieron cinco unidades hidrogeológicas dentro del área de estudio según su importancia hidrogeológica: (i) unidad de sedimentos saturados con agua con resistividades menores a 100 Ωm , interpretados como depósitos fluvio-glaciares compuestos principalmente por gravas, gravas arenosas y arenas. Se define como una unidad con un alto potencial hidrogeológico. En algunos sectores esta unidad presenta resistividades menores a 10 Ωm , lo que se interpreta como arcillas saturadas, las cuales poseen un bajo potencial hidrogeológico; (ii) unidad presente mayormente en superficie con resistividades entre los 1.000 Ωm y los 6.000 Ωm , interpretada como depósitos morrénicos y glaciofluviales no saturados, compuestas por bloques, gravas y arenas. Se define como una unidad con un bajo potencial hidrogeológico; (iii) unidad con resistividades entre los 100 Ωm y 1.000 Ωm , correspondiente a sedimentos no consolidados, sin saturación y con granulometrías variables. Se define que presentan un potencial hidrogeológico medio a bajo; (iv) unidad con un rango de resistividad entre los 1.000 y los 10.000 Ωm , correspondiente a rocas graníticas y rocas volcánico-sedimentarias interpretadas como el basamento de la cuenca. Esta unidad presenta una permeabilidad secundaria debido a fallas presentes en el área de estudio, por lo que se infiere que puede poseer un medio a alto potencial hidrogeológico.

Dentro de estas se encuentra la unidad correspondiente a depósitos fluviales y fluvio-glaciares compuestos principalmente por gravas, gravas arenosas y arenas, las que poseen una alta importancia hidrogeológica debido a su permeabilidad primaria intergranular. Esta unidad correspondería al acuífero principal. Una segunda unidad constituida por sedimentos no consolidados de origen fluvial de diferentes tipos de granulometrías correspondientes a gravas, arenas, limos y arcillas, con un potencial hidrogeológico medio a alto. La unidad UHG3 compuesta de depósitos de origen glacial correspondiente a sedimentos morrénicos, cuyos tamaños de clastos varían desde bloques a arenas con una matriz de material fino de arcilla y limo. Se define que esta unidad posee un bajo potencial hidrogeológico. Por último, se tiene la unidad UHG4 que representa al basamento del área de estudio y que se constituye de rocas intrusivas. Esta unidad posee un bajo a nulo potencial hidrogeológico según la clasificación de Struckmeier & Margat (1995). Sin embargo, la presencia de fracturas dentro de la unidad le conferirían una permeabilidad importante ligada a medios fracturados, por lo que se propone que puede presentar un mayor potencial hidrogeológico.

La limitada información existente con respecto a niveles piezométricos y de pruebas de bombeo no permite realizar un análisis más acabado para entender el funcionamiento hidrogeológico de la cuenca del río Yelcho. Sin embargo, partir de la existencia de pozos de baja profundidad instalados en depósitos no consolidados se propone la presencia de flujos someros de agua subterránea.

La geometría acuífera delimitada a partir de las mediciones gravimétricas muestra profundidades del basamento entre los 200 y 800 metros en promedio, presentándose profundidades máximas de 1.000 metros aproximadamente en el sector sur del río Futaleufú.

Con respecto a la hidrogeoquímica, las aguas se clasifican como bicarbonatadas cálcicas, lo que indica que son aguas relativamente jóvenes y poco evolucionadas ya sea porque han recorrido tramos cortos o se ha tenido una renovación constante de estas a partir de la recarga.

Los resultados de los perfiles y de la hidrogeoquímica sugieren que la circulación del agua dentro de la cuenca del río Yelcho se puede dar de dos formas, la primera a través de unidades con alto potencial hidrogeológico dentro del relleno sedimentario y la segunda a través de zonas fracturadas en el basamento.

Finalmente, a pesar de que no se logra realizar un análisis completo y acabado del funcionamiento hidrogeológico de la cuenca del río Yelcho, este estudio entrega una primera visión y con el análisis de los resultados obtenidos se sugiere la idea de que las rocas fracturadas podrían tener un rol dentro del ciclo subterráneo del agua dentro de la cuenca.

Teniendo esto en cuenta y en relación con estudios posteriores: Se recomienda realizar nuevos estudios con campañas de terreno que obtengan datos que permitan caracterizar de mejor manera la hidrogeología y la hidroquímica, tales como la realización de pozos (estratigrafía y ensayos de bombeo), medición de niveles estáticos, mayor cantidad de muestras de aguas subterráneas y realización de estudios de isotopía que permitiría conocer el origen de las aguas dentro de la cuenca.

Lo anterior permitiría obtener una base de datos más completa de parámetros hidrogeológicos e hidrogeoquímicos que permitirían entender los procesos del agua subterránea dentro de la cuenca del río Yelcho, lo que es vital importancia para la toma de decisiones en cuanto al manejo de los recursos hídricos.

Como ya se señaló anteriormente, durante la realización de este estudio, se presentó una serie de limitantes a causa de la falta de información dentro del área de estudio, brecha que dificultó la obtención de resultados como también el análisis e interpretación de estos. Dentro de estas se destacan:

- Falta de datos de precipitación y temperatura en estaciones meteorológicas: A excepción de la estación Futaleufú Ad., ninguna estación cuenta con 30 años de información válida de precipitaciones, presentando 16 años de registro solamente,

como es el caso de la estación Puerto Cárdenas. Es por esto que el análisis de precipitaciones se hace en base al producto grillado de precipitaciones del CR2.

- La única información de la geología del área de estudio a la que se tuvo acceso fue el Mapa de la Geología de Chile a escala 1:1.000.000, por lo que la información de la geología dentro de la cuenca del río Yelcho no es detallada.
- Limitada información estratigráfica: Solo siete expedientes de pozos poseían la estratigrafía. Junto con esto, la profundidad de estos pozos es entre los 20 y los 100m. Por esta razón no fue posible realizar una correcta calibración con los datos de los TEM para poder relacionar rangos de resistividades con litologías o granulometrías presentes en la cuenca.
- Se encuentran solo tres expedientes de pozos con pruebas de bombeo por lo que los resultados obtenidos no pueden ser generalizados para toda la cuenca.
- Tamaño de muestras de agua pozos: La mayoría de las captaciones estaban en desuso y en las otras existentes, no se contó con autorización de sus dueños, por lo cual el análisis realizado para estas no alcanza a ser representativo para la cuenca del río Yelcho.

9. Bibliografía

Aguilera, F., Honores, C., Lemus, M., Neria, H., Pérez, Y., Rojas, J. (2014). Evaluación del recurso geotérmico de la Región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería. (Informe Registrado IR-14-57). 253 p. 2 mapas escala 1:500.000. Santiago.

Arancibia, G.; Cembrano, J.; Lavenu, A. 1999. Transpresión dextral y partición de la deformación en la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui, Aisén, Chile (44-45°S). *Revista Geológica de Chile*, Vol. 26, No. 1, p. 3-22.

Banco Mundial. (2021). El Agua en Chile: Elemento de Desarrollo y Resiliencia. Banco Mundial, Washington, DC. <https://www.bancomundial.org/es/country/chile/publication/el-agua-en-chile-elemento-de-desarrollo-y-resiliencia>.

Bjørklund G, Chartrand MS, Aaseth J. (2017). Manganese exposure and neurotoxic effects in children. *Environ Res.* 155:380-384. doi: 10.1016/j.envres.2017.03.003. Epub 2017 Mar 10. PMID: 28282629.

Börgel, J. (1983). Geomorfología y Geografía de Chile. Tomo II, Geomorfología. Instituto Geográfico Militar: 182 pp. Santiago.

Bouchard MF, Sauvé S, Barbeau B, Legrand M, Brodeur M, Bouffard T, et al. (2011). Intellectual impairment in school-age children exposed to manganese from drinking water. *Environ Health Perspect.* 119. 138–143.

Cembrano, J.; Schermer, E.; Lavenu, A.; Sanhueza, A. 2000. Contrasting nature of deformation along an intra-arc shear zone, the Liquiñe-Ofqui fault zone, southern Chilean Andes. *Tectonophysics*, Vol. 319, p. 129-149.

Centro de Energías, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. (2016). Informe final: Análisis de las condicionantes para el desarrollo hidroeléctrico en las cuencas del Maule, Biobío, Toltén, Valdivia, Bueno, Puelo y Yelcho, desde el potencial de generación a las dinámicas socio-ambientales. Grupo de cuencas Número 2: Valdivia, Bueno, Yelcho, Puelo. Chile. <https://biblioteca.digital.gob.cl/handle/20.500.13082/634>.

Centro Nacional de Tecnología de Regadíos, CENTER (2009) Tema: Tipos de acuíferos y parámetros hidrogeológicos Jornadas técnicas sobre aprovechamiento de aguas subterráneas para riego. Ed. Villarroya, F. <http://chilorg.chil.me/download-doc/86199>.

Cirén, (2017a). Recursos Naturales y proyectos: Comuna de Futaleufú. <https://www.sitrural.cl/>.

Cirén, (2017b). Recursos Naturales y proyectos: Comuna de Chaitén. <https://www.sitrural.cl/>.

Comité Chileno para el Programa Hidrológico Internacional (CONAPHI) (1986). Mapa Hidrogeológico de Chile. Escala 1:2.500.000. Texto explicativo. Dirección General de Aguas (DGA). <https://biblioteca.sernageomin.cl/opac/DataFiles/DGA054.pdf>.

Corporación Nacional Forestal. (2013). Catastro de Uso de Suelos y Vegetación. http://www.ide.cl/descargas/capas/conaf/Catastro_uso_suelo_y_vegetacion.rar.

Custodio, E. y M. R. Llamas. (1983). *Hidrología Subterránea*. (2da ed., Tomo I). Ed. Omega.

Daniele, L., Taucare, M., Viguiet, B., Arancibia, G., Aravena, D., Roquer, T., et al., 2020. Exploring the shallow geothermal resources in the Chilean Southern Volcanic Zone: insight from the Liquiñe thermal springs. *J Geochem Explor*. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106611>.

Departamento de administración de recursos hídricos (DARH), 2007. Informe preliminar: Determinación del potencial hidroeléctrico XI Región y provincia de Palena X Región. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Chile. 117p <https://snia.mop.gob.cl/repositoriodga/handle/20.500.13000/5166>.

Dirección General de Aguas. (2015). Análisis y modelación hidrogeológica cuenca del río Palena. SIT N°388. <https://snia.mop.gob.cl/repositoriodga/handle/20.500.13000/6853>.

Dirección General de Aguas. (2017). Análisis de caudales de reserva de agua superficial en la cuenca del río Yelcho para el abastecimiento de la población, Región de Los Lagos. SDT N° 406. <https://snia.mop.gob.cl/sad/REH5749.pdf>.

Dirección General de Aguas. (2020). 7 DGA Noticias: Planes Estratégicos de Gestión Hídrica. <https://dga.mop.gob.cl/noticias/Paginas/DetalledeNoticias.aspx?item=714>.

Dirección General de Aguas. Inventario Público de Cuencas Hidrográficas, y Lagos. División de Hidrología y Unidad SIG del División de Estudios y Planificación. https://dga.mop.gob.cl/administracionrecursoshidricos/inventario_cuencas_lagos/Paginas/default.aspx.

Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Institute for Applied Systems Analysis, International Soil Reference and Information Centre, Institute of Soil Science of the Chinese Academy of Sciences & Joint Research Centre of the European Commission (FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC) (2012). Harmonized World Soil Database (version 1.2). <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>.

Guerrero, A., Gallucci, S., Michalijos, P., Visciarelli, Stella. (2011). Países Andinos: aportes teóricos para un abordaje integrado desde las perspectivas geográfica y turística. Huellas, vol 15. 121-138. <https://web.archive.org/web/20190829132706/http://www.biblioteca.unlpam.edu.ar/pubpdf/huellas/v15a09guerrero.pdf>

Hofste, R. W., Reig, P. y Schleifer, L. (2019). 17 Countries, Home to One-Quarter of the World's Population, Face Extremely High Water Stress. World Resources Institute. <https://www.wri.org/insights/17-countries-home-one-quarter-worlds-population-face-extremely-high-water-stress>.

Hunt. (2005). Geotechnical Engineering Investigation Handbook, (2nd Edi). (C. Press, Ed.), Boca Raton, FL, USA.

Íñiguez, M., Ojeda, W., Díaz, C., Mamadou, K. & Mercado, R. (2011). Análisis metodológico de la distribución espacial de la precipitación y la estimación media diaria. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 2(1), 57-69.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S200709342011000100005&lng=es&tlng=es.

Mazor, E. (2004). Chemical and Isotopic Groundwater hydrology: the applied approach. (3ra ed.). Marcel Dekker, Inc. 470pp.

Maddocks, A., Young R. S. y Reig, P. (2015). Ranking the World's Most Water-Stressed Countries in 2040. World Resources Institute. <https://www.wri.org/insights/ranking-worlds-most-water-stressed-countries-2040>.

Meneses, B. (2019). Modelamiento hidrogeológico conceptual y caracterización hidroquímica de la cuenca del río Biobío, comprendida en la comuna de Chiguayante, Región del Biobío, Chile. [Memoria para optar al Título de Geóloga, Universidad de Concepción]. Repositorio Dspace. <http://repositorio.udec.cl/xmlui/handle/11594/295>.

Ministerio de obras públicas (MOP). (1984). Informe final: Balance hidrológico nacional X Región. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. <https://snia.mop.gob.cl/repositoriodga/handle/20.500.13000/4635>.

Montaner, M., & Sánchez-Almohalla, E. (1988). Aproximación, por el Método de Thornthwaite, al cálculo de infiltración de lluvia útil. Papeles de Geografía, (14), p. 223–235. Recuperado a partir de <https://revistas.um.es/geografia/article/view/42801>.

Negri, A., Daniele, L., Aravena, D., Muñoz, M., Delgado Huertas, A., Morata, D. (2018). Decoding fjord water contribution and geochemical processes in the Aysen thermal springs (Southern Patagonia, Chile). J. Geochem. Explor 185, p. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.026>.

Organización Mundial de la Salud (1971). International Standards for Drinking Water. (3ra ed.).

Paris de Ferrer, M. (2001). Inyección de Agua y Gas en Yacimientos Petrolíferos. (2da ed.). 423pp.

Pérez-Estay, N., Molina-Piernas, E., Roquer, T., Aravena, D., Araya Vargas, J., Morata, D., Arancibia, G., Valdenegro, P., García, K., Elizalde, D. (2022). Shallow anatomy of hydrothermal systems controlled by the Liquiñe-Ofqui Fault System and the Andean Transverse Faults: Geophysical imaging of fluid pathways and practical implications for geothermal exploration. *Geothermics* 104, 102435. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102435>.

Pérez, Y., Troncoso, R., Milovic, J., Helms, F., Toloczyki, M. (2003). Geología Ambiental del área de Osorno, X región, Chile. Uso Actual del Territorio. Escala 1:100000. Informe registrado IR-00-19. Servicio Nacional de Geología y Minería. 9 mapas. 48 p.

Ruiz Velásquez, B. (2015). Caracterización Hidrogeoquímica de manifestaciones termales de la Región de Los Lagos, Chile. [Memoria para optar al título de geóloga, Departamento de Geología, Universidad de Chile]. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/132984>.

Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., A, B., & Richard, G. (2005). Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage Research*, 83, p. 173–193. [10.1016/j.still.2004.10.004](https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004).

Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M. j., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2016). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, p. 66-73. <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592>

Servicio Nacional de Geología y Minería. (2003). Mapa Geológico de Chile: Versión Digital. SERNAGEOMIN, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión 1.0, 2003). Santiago, Chile.

Singhal, B., & Gupta, R. (2010). Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. Applied Hydrogeology of Fractured Rocks By B.B.S. Singhal and R.P. Gupta. Netherlands: Springer, 2010. ISBN: 978-90-481-8798-0. [10.1007/978-94-015-9208-6](https://doi.org/10.1007/978-94-015-9208-6).

Taucare, M., Daniele, L., Viguiet, B., Vallejos, A., Arancibia, G. (2020). Groundwater resources and recharge processes in the Western Andean Front of Central Chile. *Sci. Total Environ.* 722, 137824. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137824>.

Tassara, A., Yañez, G. (2003). Relación entre el espesor elástico de la litosfera y la segmentación tectónica del margen andino (15-47°S). *Revista Geológica de Chile*, Vol. 30. p. 159-186. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-02082003000200002->

Anexos

Anexo A: Ensayos de Bombeo

1. Pozo ND-1005-830

Nombre	ND-1005-830	Ubicación	Comuna de Futaleufú
Solicitante	ESSAL S.A.	Caracter	Consuntivo
Profundidad	70 [m]	Ejercicio	Permanente y continuo
Nivel estático	5,06 [m]	Este	266947
Caudal	21 [l/s]	Norte	5214083
Cribas	Acero inoxidable de 10", tramo 24-30m y 50-68m		

Estratigrafía

Desde	Hasta	Descripción
0	10	Bolones, ripio, arena, poca arcilla
10	30	Grava, ripio, bolones y arena
30	48	Arena gruesa y arena fina
48	50	Material Volcánico
50	65	Grava, arena, ripio, bolones, poca grava
65	70	Arena, ripio, bolones, poca grava

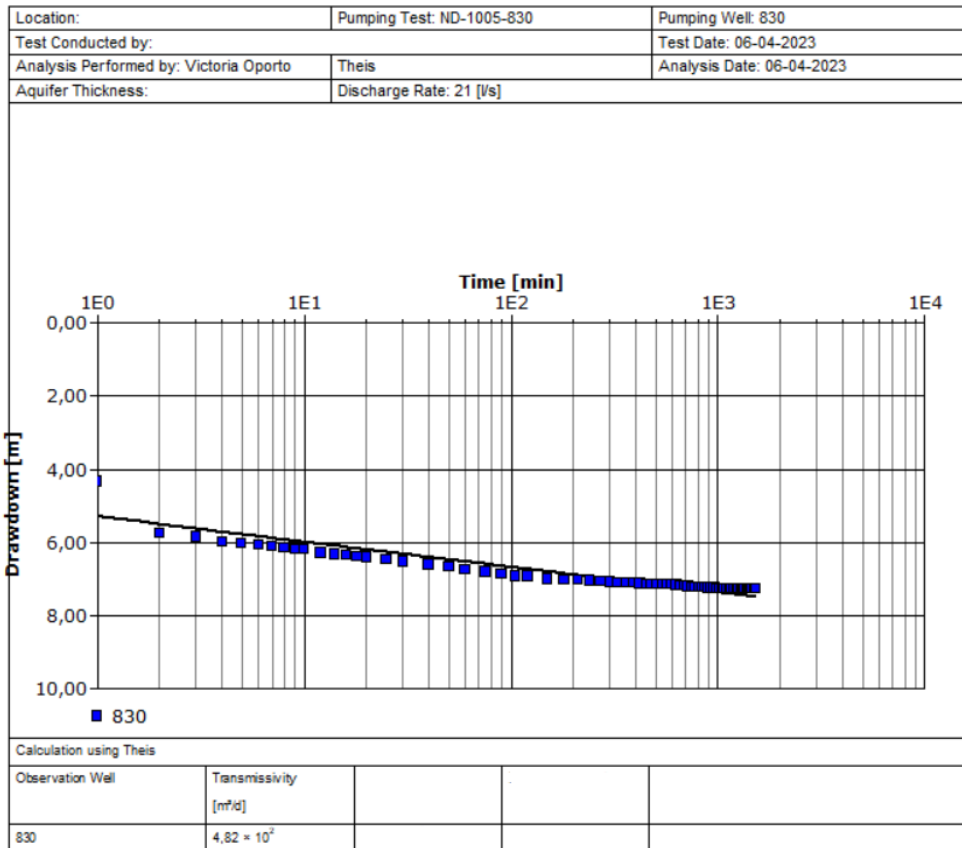
Prueba de gasto constante

Tiempo [Min]	Nivel Dinámico [m]	Descenso [m]	Q [l/s]
0	5.2	0.00	
1	9.39	4.19	
2	10.79	5.59	
3	10.9	5.70	
4	11.03	5.83	
5	11.08	5.88	
6	11.12	5.92	
7	11.16	5.96	
8	11.19	5.99	21
9	11.23	6.03	
10	11.25	6.05	
12	11.34	6.14	

14	11.38	6.18	
16	11.41	6.21	
18	11.44	6.24	
20	11.46	6.26	
25	11.51	6.31	21
30	11.58	6.38	
40	11.66	6.46	
50	11.73	6.53	
60	11.81	6.61	
75	11.86	6.66	
90	11.93	6.73	21
105	11.98	6.78	
120	11.98	6.78	
150	12.06	6.86	
180	12.07	6.87	
210	12.08	6.88	
240	12.1	6.90	
270	12.11	6.91	
300	12.14	6.94	
330	12.16	6.96	
360	12.15	6.95	
390	12.16	6.96	
420	12.18	6.98	
450	12.2	7.00	
480	12.2	7.00	
510	12.2	7.00	
540	12.2	7.00	
570	12.21	7.01	
600	12.21	7.01	
630	12.22	7.02	
660	12.24	7.04	
690	12.25	7.05	21
720	12.26	7.06	
750	12.27	7.07	
780	12.28	7.08	
810	12.28	7.08	21
840	12.28	7.08	
870	12.29	7.09	
900	12.3	7.10	
930	12.3	7.10	
960	12.3	7.10	
990	12.31	7.11	21
1020	12.31	7.11	

1050	12.31	7.11	
1080	12.31	7.11	
1110	12.32	7.12	
1140	12.32	7.12	21
1170	12.32	7.12	
1200	12.32	7.12	
1230	12.32	7.12	
1260	12.32	7.12	
1290	12.32	7.12	
1320	12.33	7.13	
1350	12.33	7.13	21
1380	12.33	7.13	
1410	12.33	7.13	
1440	12.33	7.13	
1470	12.33	7.13	
1500	12.33	7.13	21
1530	12.33	7.13	

Descenso en función del tiempo



Transmisividad (T)	436.96[m ² /día]
Coef. de almacenamiento (S)	8,1E-6

2. Pozo Escuela El Límite

Nombre	Escuela El Límite
Solicitante	Municipalidad de Futaleufú
Profundidad	24 [m]
Nivel estático	4,93 [m]
Caudal	1 [l/s]
Cribas	15-20 m

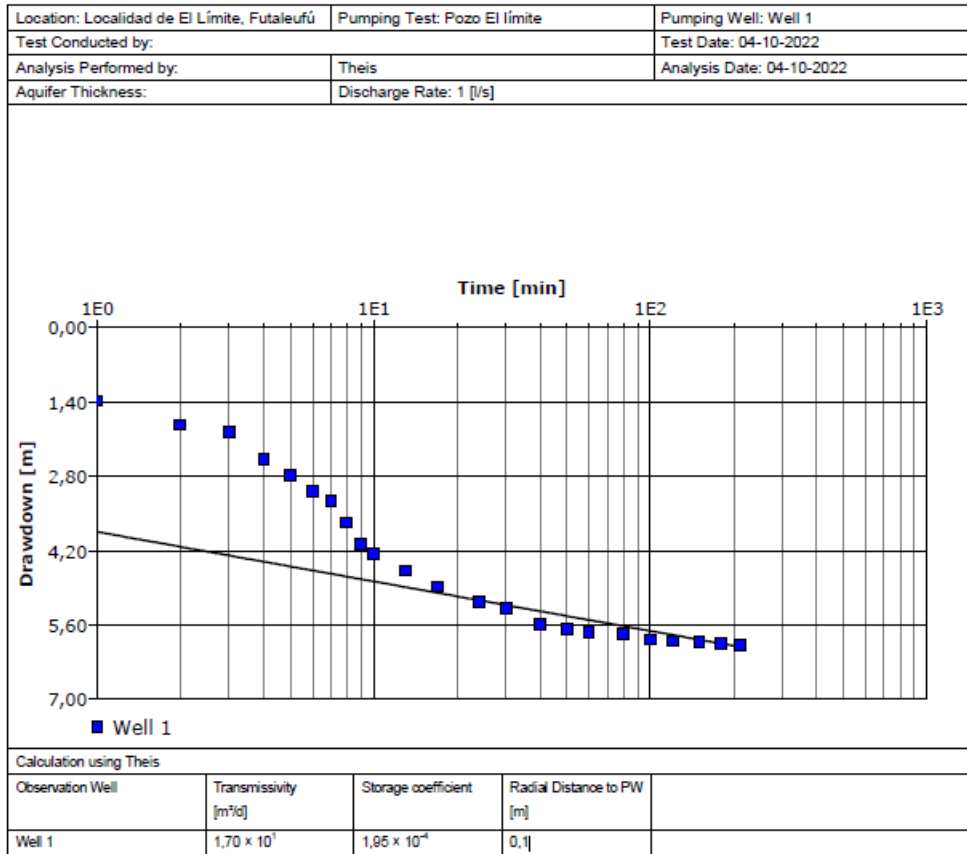
Estratigrafía

Desde	Hasta	Estratigrafía
0	2,2	Tierra vegetal
2,2	6,7	Arcillas gravas
6,7	12	Arenas sueltas
12	15,5	Arenas arcilla gris
15,5	18,6	Arena gris
18,6	24	Arenas sueltas negras

Prueba de gasto constante

Tiempo [Min]	Nivel Dinámico [m]	Descenso [m]	Q [l/s]
0	5.9	0.97	1
1	6.3	1.37	
2	6.76	1.83	
3	6.9	1.97	
4	7.4	2.47	
5	7.7	2.77	
6	8	3.07	
7	8.2	3.27	
8	8.6	3.67	
9	9	4.07	
10	9.2	4.27	
13	9.5	4.57	
17	9.8	4.87	

24	10.1	5.17	
30	10.2	5.27	
40	10.5	5.57	
50	10.6	5.67	
60	10.67	5.74	
80	10.7	5.77	
100	10.8	5.87	
120	10.83	5.90	
150	10.85	5.92	
180	10.88	5.95	
210	10.9	5.97	
240	10.9	5.97	
270	10.9	5.97	
300	10.9	5.97	
360	10.9	5.97	
420	10.9	5.97	
480	10.9	5.97	
540	10.9	5.97	
600	10.9	5.97	
660	10.9	5.97	
720	10.9	5.97	
780	10.9	5.97	
840	10.9	5.97	
900	10.9	5.97	
960	10.9	5.97	
1020	10.9	5.97	
1080	10.9	5.97	
1140	10.9	5.97	
1200	10.9	5.97	
1260	10.9	5.97	
1320	10.9	5.97	
1380	10.9	5.97	
1440	10.9	5.97	



3. Pozo Escuela Las Escalas

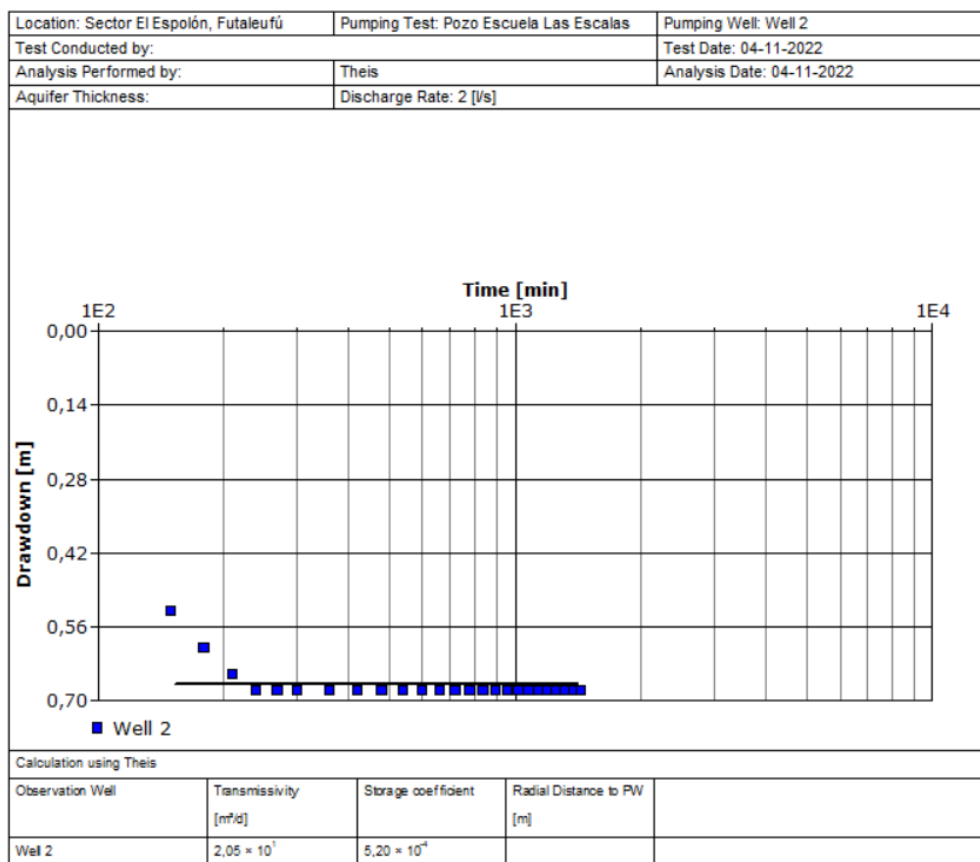
Nombre	Las Escalas
Solicitante	Municipalidad de Futaleufú
Profundidad	24 [m]
Nivel estático	5,92 [m]
Caudal	2 [l/s]
Cribas	12-18 m

Estratigrafía

Desde	Hasta	Estratigrafía
0	1,5	Tierra vegetal
1,5	3	Gravas y arenas cementadas
3	22	Grava limpia y bolones
22	24	Grava, arenas gruesas y arena fina

Prueba de gasto variable

Tiempo [Min]	Nivel Dinámico [m]	Descenso [m]
150	6.45	0.53
180	6.52	0.60
210	6.57	0.65
240	6.6	0.68
270	6.6	0.68
300	6.6	0.68
360	6.6	0.68
420	6.6	0.68
480	6.6	0.68
540	6.6	0.68
600	6.6	0.68
660	6.6	0.68
720	6.6	0.68
780	6.6	0.68
840	6.6	0.68
900	6.6	0.68
960	6.6	0.68
1020	6.6	0.68
1080	6.6	0.68
1140	6.6	0.68
1200	6.6	0.68
1260	6.6	0.68
1320	6.6	0.68
1380	6.6	0.68
1440	6.6	0.68



Anexo B: Muestras de Agua

Muestra	Este_UTM	Norte_UTM	Fuente	Tipo	ORP [mV]	pH	CE [mS/cm]	T [°C]
YE03	263790	5214054	Pozo/Noria	Punteras	33,1	6,63	145	10,19
YE07	763446	5214521	Pozo/Noria	Pozo	122,4	6,79	156	9,97
YE09	267988	5214203	Pozo/Noria	Pozo	210,5	6,02	135	14,97
YE10	263235	5213207	Pozo/Noria	Punteras	243,6	6,37	70	11
YE20	753700	5207905	Pozo/Noria	Pozo	-24,1	8,48	78	13,11
YE36	763310	5214508	Pozo/Noria	Pozo	-23,9	8,21	100	12,99
YE37	753411	5212394	Pozo/Noria	Pozo	-22,2	7,33	53	9,03
YE38	755806	5210782	Pozo/Noria	Noria	-21,5	7,5	251	9,23
YE01	263688	5216224	Vertiente	Vertiente	98,4	6,8	553	10,39
YE02	263702	5215481	Vertiente	Vertiente	147,9	6,4	150	7,42
YE04	263301	5213960	Vertiente	Vertiente	126,1	6,61	362	9,8
YE05	733889	5182796	Vertiente	Vertiente	200,6	7,12	139	8,64
YE06	272726	5210252	Vertiente	Vertiente	217,3	7,2	175	10,82

YE08	716816	5191606	Vertiente	Vertiente	135,8	6,53	63	12,22
YE12	745170	5203250	Vertiente	Vertiente	-26,5	8,77	28	15,71
YE13	748687	5210443	Vertiente	Vertiente	-26,6	8,26	50	15,81
YE14	748059	5210655	Vertiente	Vertiente	-29,4	8,11	35	21,21
YE15	744834	5202598	Vertiente	Vertiente	-28,3	7,7	34	13,21
YE16	743681	5202095	Vertiente	Vertiente	-29,7	7,67	29	18
YE17	742503	5201169	Vertiente	Vertiente	-28,5	7,61	23	14,24
YE18	740231	5196177	Vertiente	Vertiente	-28,3	7,9	12	15,07
YE19	742604	5200143	Vertiente	Vertiente	-29,5	7,36	30	16,22
YE21	753419	5207240	Vertiente	Vertiente	-24,5	8,04	123	11,08
YE22	756426	5211386	Vertiente	Vertiente	-24,8	7,64	231	12,11
YE23	751004	5206766	Vertiente	Vertiente	-24,8	7,88	90	9,98
YE24	751447	5212645	Vertiente	Vertiente	-27,8	8,29	170	15,4
YE25	739939	5169893	Vertiente	Vertiente	-27,3	8,17	36	15,6
YE27	740787	5168595	Vertiente	Vertiente	-25,7	7,95	298	11,15
YE32	711320	5239522	Vertiente	Vertiente	-23	6,51	34	10,52
YE33	713143	5242255	Vertiente	Vertiente	-23,7	6,48	63	11,73
YE34	707621	5235743	Vertiente	Vertiente	-24,1	7,25	133	8,91
YE35	709883	5200418	Vertiente	Vertiente	-23,5	8,04	76	10,37
YE39	760360	5213561	Vertiente	Vertiente	-21,9	7,16	135	12,24
YE40	741384	5196850	Vertiente	Vertiente	-25,7	8,32	28	15,65
YE50	745525	5203424	Vertiente	Vertiente	-21,4	7,23	92	12,36
YE51	741800	5200823	Vertiente	Vertiente	-22,7	7,51	33	12,54
YE52	740469	5201287	Vertiente	Vertiente	-23,8	7,52	88	10,95
YE55	708552	5236445	Vertiente	Vertiente	-41,9	9,48	231	50,3
YE26	741628	5165891	Superficial	Río/Estero	-26,2	8,33	22	11,25
YE28	756788	5212853	Superficial	Río/Estero	-24,3	8,3	49	15,15
YE29	730562	5186016	Superficial	Río/Estero	-25,6	8	38	13,46
YE30	708184	5211639	Superficial	Lago/Laguna	-25,8	8,04	40	15,01
YE31	685748	5239922	Superficial	Río/Estero	-24,7	7,97	29	12,78
YE56	707712	5235676	Superficial	Río/Estero	-28,1	8,86	57	14,64