



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

LAS AGUAS DEL LAGO VILLARRICA: CALIDAD Y PROCESOS
FISICOQUÍMICOS DE LOS RECURSOS HÍDRICOS QUE LO ALIMENTAN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

AGUSTÍN VALENZUELA MOURE

PROFESORA GUÍA:

LINDA DANIELE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

BENOIT VIGUER

PAULA DÍAZ PALMA

SANTIAGO DE CHILE

2019

LAS AGUAS DEL LAGO VILLARRICA: CALIDAD Y PROCESOS FÍSICOQUÍMICOS DE LOS RECURSOS HÍDRICOS QUE LO ALIMENTAN

El presente trabajo corresponde al estudio hidrogeológico realizado en la cuenca del lago Villarrica, en la región de La Araucanía, durante el año 2018, en el marco del desarrollo de los antecedentes técnicos para el plan de descontaminación de dicho lago. Este plan se inicia debido a los crecientes problemas de eutrofización que este lago presenta, debido al exceso de nutrientes. Esto se expresa en proliferaciones algales, que disminuyen la calidad de las aguas y traen problemas estéticos al lago y posiblemente de salud.

Las proliferaciones algales no dependen sólo de los aportes de nutrientes, sino que factores climáticos también tienen una alta influencia. Sin embargo, la dependencia de los organismos del fósforo podría ayudar a determinar a este elemento como limitante para el crecimiento de las algas.

El trabajo se basa en el análisis de 35 muestras de agua, 24 superficiales y 11 subterráneas, para comprender los procesos físicoquímicos de los recursos hídricos que alimentan al lago Villarrica. Los resultados muestran aguas bicarbonatadas de buena calidad, tanto para consumo como para riego, debido a su baja mineralización, evidenciada en la concentración de sólidos disueltos (92 mg/L en promedio), la baja conductividad (80 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en promedio) y un pH cercano a neutro, variando entre 6.22 y 8.92.

La química de las aguas es bastante homogénea, ya que todas son bicarbonatadas mixtas. Esto junto a la alta transmisividad de la zona (963 $\text{m}^2/\text{día}$ en promedio) permite inferir que las aguas superficiales y subterráneas están estrechamente relacionadas, y que los tiempos de residencia de las aguas en la cuenca probablemente sean cortos.

Se requieren más estudios aún, pero en base a las estimaciones de aportes de fosfato y nitrato de este trabajo hay una posibilidad de que los aportes a través de aguas subterráneas sean significativos.

Los resultados del análisis de componentes principales de las muestras indican que hay tres principales grupos: el primero relacionado a la interacción roca-agua, el segundo con el material volcánico de la zona, y el tercero con los aportes de nitrato. Se requieren más análisis, principalmente isotópicos, que puedan indicar con mayor seguridad las fuentes de los aportes de nutrientes.

Agradecimientos

A mi mamá y mi papá, por su amor, comprensión, tenacidad y todas esas cosas que se asumen que tienen que dar los padres, pero no están obligados. Como el dinero, gracias por permitirme salir de la U sin deudas.

A mis abuelas, por su preocupación e intentar atorarme con comida cada vez que tienen la oportunidad.

A mis hermanos, por su complicidad, cariño e idiotez, que siempre me anima cuando lo necesito.

A Bonnie, por su paciencia, amor, y apoyo, instándome a ser la mejor versión de mí mismo que puedo ser.

A Bancación Club de Yates, por su amistad y compañerismo, nunca olvidaré las juntas y el viaje.

A mis amigos de geología, que hicieron más divertidos los laboratorios, los terrenos y las tardes estudiando.

A mi comisión, por ayudarme a aprender una parte de lo necesario para comenzar a desenvolverme en la vida profesional.

Quisiera agradecer al Departamento de Geología por financiar parte de mis gastos por la campaña de muestreo en la que se basa esta memoria, al FONDECYT 1170569 por la ayuda como tesista y, por cubrir gastos relacionados al Congreso Geológico 2018, y al contrato del MMA con la Universidad de Chile “Análisis y trazado hidrogeoquímico - isotópico de la contaminación del agua, como insumo para la elaboración de un Plan de Descontaminación en el Lago Villarrica” Res. Ex. 0905 del 01/10/2018 por cubrir gastos del análisis isotópico y de la segunda campaña de muestreo realizada en el área de estudio.

Tabla de contenido

Tabla de contenido	iii
Índice de Figuras	vi
Índice de Tablas	ix
Introducción	1
Objetivo general	2
Objetivos específicos	2
Hipótesis de trabajo	2
Metodología	3
Campaña de muestreo	3
Ubicación y accesos	3
Diseño y planificación	4
Muestreo	7
Caracterización e identificación de procesos hidrogeoquímicos	9
Caracterización isotópica	9
Análisis de datos	9
Antecedentes geológicos de la zona de estudio	10
Marco geológico regional	10
Estratigrafía del área de estudio	11
Paleozoico-Triásico	14
Cretácico	14
Paleoceno	14
Oligoceno-Mioceno	14
Plioceno	15
Plioceno-Pleistoceno	16
Pleistoceno Superior-Holoceno	17
Geología estructural del área de estudio	18
Hidrogeología del área de estudio	19
Unidades hidrogeológicas	21
Hidroquímica del área de estudio	24
Piezometría	24
Marco Teórico	25
Balance iónico	25

Deducción de roca fuente	25
Conversión de unidades	26
Na y Cl.....	26
Ca y SO ₄	27
HCO ₃ y SiO ₂	27
SiO ₂ y Na.....	27
Ca y Mg	28
Na y K.....	28
Na y Ca	28
SiO ₂	28
Métodos gráficos.....	28
Diagrama de Piper.....	28
Razones entre elementos	29
Análisis estadístico.....	29
Análisis de componentes principales.....	29
Ley de Darcy	30
Resultados.....	31
Razones de elementos	34
SiO ₂	34
HCO ₃ y SiO ₂	35
SiO ₂ y Na.....	35
Na, K, Cl y Ca.....	37
Na y Cl.....	38
Mg y Ca	38
Ca y SO ₄	39
Cl, SO ₄ y HCO ₃	40
Análisis estadístico de elementos	42
Matriz de correlación	42
Análisis de Componentes Principales (ACP).....	43
Análisis espacial de componentes principales	46
Discusión	50
Proliferaciones de algas en el lago.....	50
Calidad del agua en la zona de estudio	56
Relación entre lago, agua superficial y agua subterránea	57
Los aportes de nitrógeno y fósforo.....	59

Fuentes identificadas.....	62
Cuantificación de aportes	67
Modelo hidrogeoquímico general.....	73
Origen de los componentes disueltos.....	73
Conclusiones	75
Bibliografía.....	77
Anexo A.....	80
Mediciones en terreno.....	80
Anexo B.....	81
Informes de laboratorio	81

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa de la zona de estudio, y las subcuencas en las que se encuentra. Las subcuencas fueron definidas por la DGA, y corresponden a 'Lago Villarrica y Toltén Alto' y 'Río Pucón', las cuales son parte de la cuenca Río Toltén, ubicada en la Región de La Araucanía.	3
Figura 2. Mapa de las posibles fuentes contaminantes en la cuenca, con acercamiento en rojo. Las fuentes puntuales corresponden a descargas de aguas servidas sin tratamiento en Curarrehue, Plantas de Tratamiento de Agua Servida (PTAS) en Pucón y Villarrica, pisciculturas que operan en la zona, el vertedero municipal de Pucón y el relleno sanitario de Villarrica. Fuentes difusas incluyen predios fertilizados de uso agrícola o forestal, cuya extensión es identificada por INDAP (2010 – 2015) y proporcionada por el MMA. También, se encuentran praderas de pastoreo de animales, además de las zonas pobladas de la ribera sur del lago Villarrica, cuyas áreas fueron registradas por CONAF (2013) y proporcionadas por el MMA. La zona poblada marcada no cuenta con alcantarillado, y se utiliza fosa séptica, por lo que se considera una potencial zona de contaminación difusa. Se omitió señalar la zona urbana de Villarrica y Pucón ya que cuentan con alcantarillado y PTAS.	5
Figura 3. Mapa de puntos muestreados con acercamiento en rojo. Se incluyen los puntos del plan que no fueron muestreados. Los números indican el orden en que fueron muestreados los puntos. Los círculos indican muestras de agua subterránea, mientras que los triángulos indican muestras de agua superficial.	6
Figura 4. Mapa de la geología de la zona de estudio. La leyenda se encuentra en la página siguiente.	12
Figura 5. Mapa de la hidrogeología de la zona, modificado a partir de DGA (2016).	20
Figura 6. Vista en 3D de la geología de la zona. Se indican las secuencias más relevantes para la hidrogeología local. Los pozos de la zona se encuentran principalmente en los depósitos morrénicos. Las capas someras (depósitos morrénicos, piroclásticos y laháricos) son altamente heterogéneas, y describen amplios grupos con características litológicas diferentes, por lo que es necesaria una caracterización más detallada de estas para una buena descripción de su potencial hidrogeológico. Algunos colores del mapa geológico han sido modificados ligeramente para facilitar la visualización.	23
Figura 7. Diagrama de flujo describiendo los pasos a seguir para la deducción de roca fuente de los elementos disueltos en el agua.	26
Figura 8. Izquierda: Forma de graficar en un diagrama Piper, con dos triángulos, de cationes y aniones respectivamente, y con el diamante central. Derecha: Clasificación de agua en un diagrama Piper, con los diferentes tipos de agua descritos por Piper (1944). Ambas imágenes fueron tomadas de Piper (1944).	29
Figura 9. Representación gráfica del flujo representado por Darcy.	30
Figura 10. Representación gráfica del flujo con la ecuación de Darcy en función de la transmisividad.	30
Figura 11. Error admisible según conductividad eléctrica, de acuerdo con Custodio y Llamas (1976).	34
Figura 12. Mapa de factor scores para el primer componente principal (CP1). Los valores de puntuación de componente corresponden a los rangos de cada cuartil.	47

Figura 13. Mapa de factor scores para el segundo componente principal (CP2). Los valores de puntuación de componente corresponden a los rangos de cada cuartil.	48
Figura 14. Mapa de factor scores para el tercer componente principal (CP3). Los valores de puntuación de componente corresponden a los rangos de cada cuartil.	49
Figura 15. Proliferación cianobacterial de <i>Dolichospermum</i> sp. en playa La Poza del lago Villarrica en verano de 2012 (Nimptsch, 2015). Foto tomada por Víctor Durán.	50
Figura 16. Distintos parámetros con las proliferaciones algales de enero de 2016, enero de 2017, enero de 2018 y mayo de 2018 (líneas verticales en verde). Se ve claramente que a pesar de seguir una tendencia de la aparición de proliferaciones de algas cuando hay mayor temperatura de superficie, mayor radiación solar, menor presión, menor velocidad del viento y ocurrencias en estación seca, se tiene una proliferación que no se comporta como las otras. Registros de proliferaciones tomados de Fundación Red Nuevas Ideas (2015). Datos de parámetros climáticos tomados de la Red Agrometeorológica del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) http://agromet.inia.cl/	52
Figura 17. Fotos tomadas en el lago Villarrica durante el verano de 2012, donde se muestra gente bañándose a pesar de la proliferación de algas. Siguiendo las guías de la OMS para aguas recreativas (WHO, 1999) no se debería permitir el contacto entre la gente y la escoria algal o cianobacterial. Foto tomada de la presentación 'Cianobacterias-Toxinas-Síntomas-Efectos' del Dr. Jorge Nimptsch.	53
Figura 18. Mapa de estaciones de monitoreo en el lago Villarrica.	54
Figura 19. Gráfico que muestra valores de N-NO ₃ en distintas estaciones de monitoreo del lago Villarrica. Las líneas azules verticales indican un evento de proliferación de algas, según lo registrado en el informe de la Fundación Red de Nuevas Ideas (2018).	55
Figura 20. Diagrama Piper de las aguas del muestreo de enero 2018. Los círculos negros representan muestras de agua subterránea mientras que los triángulos rojos representan muestras de agua superficial. Todas caen en el área 5 definida por Piper (1944), que corresponde a aguas bicarbonatadas sin ningún catión dominante en este caso.	56
Figura 21. Diagrama Piper de muestras tomadas para el informe de la DGA (2016) durante los años 2014-2015, en cuatro campañas de muestreo. Los círculos negros representan muestras de agua subterránea mientras que los triángulos rojos representan muestras de agua superficial. Todas las aguas grafican en el área 5 definida por Piper (1944) excepto dos, pertenecientes a pozos de la zona. Estas dos muestras se encuentran en el área 9 definida por Piper (1944).	57
Figura 22. Pozos con valores de cota hidráulica, tomado de DGA (2016) y modificado. Se muestran los años en que se midió el nivel estático de los pozos. Las flechas indican la dirección general de flujo estimada.	58
Figura 23. Mapa con pozos con valores de transmisividad, elaborado con datos de DGA (2016).	59
Figura 24. Mapa con las concentraciones de NO ₃ medidas en las muestras de la campaña de muestreo de enero 2018.	60
Figura 25. Mapa con las concentraciones de PO ₄ medidas en las muestras de la campaña de enero de 2018.	61

Figura 26. Mapa de predios fertilizados (datos INDAP 2010-2015) y de uso de suelo (datos CONAF 2013), junto a las concentraciones de NO ₃ medidas en pozos cercanos al lago Villarrica.	62
Figura 27. Mapa de predios fertilizados (datos INDAP 2010-2015) y de uso de suelo (datos CONAF 2013), junto a las concentraciones de PO ₄ medidas en pozos cercanos al lago Villarrica.	63
Figura 28. Mapa con la extensión de zonas pobladas, donde no hay alcantarillado y se utilizan fosas sépticas (CONAF, 2013), en azul y los valores de nitrato medidos en agua subterránea.	64
Figura 29. Mapa de la ribera sur del lago Villarrica, con los valores medidos de NO ₃ en agua superficial y la ubicación de las distintas pisciculturas. Los esteros en la imagen fluyen hacia el norte, llegando al lago.....	64
Figura 30. Mapa con concentración de PO ₄ en el pozo de la PTAS Villarrica, donde se tiene el valor máximo.....	65
Figura 31. Mapa mostrando puntos de muestreo aguas arriba y abajo de la descarga de la PTAS de Pucón (rombo verde) en el río Claro. En el mapa se encuentra la ubicación de la planta, pero la descarga se hace entre los puntos de muestreo.....	65
Figura 32. Mapa del sector sur del lago Caburga, con los valores medidos de NO ₃ y la ubicación de las distintas pisciculturas. Los ríos en la imagen fluyen hacia el suroeste.	66
Figura 33. Mapa del sector del río Cavisañi, el cual es tributado por los esteros donde se encuentran las pisciculturas en la imagen. Los valores medidos de NO ₃ no superaron el límite de detección. Los ríos y esteros en la imagen fluyen hacia el oeste.	66
Figura 34. Mapa con las siete descargas de aguas servidas en Curarrehue, con los puntos de muestreo y sus valores correspondientes de NO ₃ (mg/L).....	67
Figura 35. Mapa con estaciones fluviométricas de la DGA. Nótese que la estación que mide el caudal de flujo en el río Pucón tiene datos recién desde abril de 2018 hasta julio de 2018.	69
Figura 36. Mapa con la longitud de la sección de área de espesor saturado para los aportes de NO ₃ (A) y para los aportes de PO ₄ (B). La longitud se calculó en base a la extensión de los pozos donde se tomaron muestras. En el caso de los aportes de PO ₄ (B) se hizo sólo en base a pozos con concentraciones sobre el límite de detección.	72

Índice de Tablas

Tabla 1. Número de muestreos realizados por día de terreno, realizado en enero de 2018.	8
Tabla 2. Puntos de muestreo con sus respectivas descripciones.	8
Tabla 3. Propiedades hidráulicas para pozos en la cuenca del río Toltén. Se muestran los rangos y promedio de la transmisividad (T), la permeabilidad (K) por cada unidad hidrogeológica (UH). Tomado de DGA (2016).....	22
Tabla 4. Propiedades hidráulicas para pozos en la cuenca del río Imperial. Se muestran los rangos y promedio de la transmisividad (T), la permeabilidad (K) por cada unidad hidrogeológica (UH). Tomado de DGA (2016).....	22
Tabla 5. BI admisible según conductividad eléctrica. Tomado de Custodio y Llamas (1976).....	25
Tabla 6. Porcentaje de valores bajo el límite de detección (% Bajo LD) para cada elemento analizado por el laboratorio.	31
Tabla 7. Valores de elementos mayores en las muestras en meq/L y el BI calculado en % para cada una.	32
Tabla 8. Razones recomendadas por Hounslow (1995) para el chequeo de análisis de laboratorio. Los valores importantes muestran valores que sobrepasados indican un posible error de análisis o una característica especial de la muestra analizada.	33
Tabla 9. Valores de SiO ₂ por cada muestra.	34
Tabla 10. Valores de la razón HCO ₃ /SiO ₂ por cada muestra. Calculado en las unidades que se muestran.	35
Tabla 11. Valores de la razón SiO ₂ /(Na+K-Cl), calculado en las unidades que se muestran.	36
Tabla 12. Valores de (Na+K-Cl)/(Na+K-Cl+Ca) por cada muestra. Calculados en las unidades mostradas.	37
Tabla 13. Valores de la razón Na/(Na+Cl) por cada muestra. Calculados en las unidades que se muestran.	38
Tabla 14. Valores de la razón Mg/(Ca+Mg) por cada muestra. Calculados en las unidades que se muestran.	39
Tabla 15. Valores de la razón Ca/(Ca+SO ₄) por cada muestra. Calculados en las unidades que se muestran.	40
Tabla 16. Valores de las razones Cl/(suma aniones) y HCO ₃ /(suma aniones) por cada muestra. Calculados en las unidades que se muestran.	41
Tabla 17. Matriz de correlación con datos seleccionados. Se muestran sólo los datos que arrojan correlaciones significativas y con más de una correlación con otros elementos.....	42
Tabla 18. Porcentaje de la varianza y factor loadings tras la rotación Varimax de los componentes principales (CP).....	43
Tabla 19. Porcentaje de la varianza y factor loadings tras la rotación Varimax de los componentes principales (CP) calculados con datos de agua superficial y de agua subterránea por separado.	46
Tabla 20. Tabla con niveles de orientación para la toma de decisiones en distintas situaciones de presencia de cianobacterias en aguas recreativas. Tomado de WHO (1999).....	53
Tabla 21. Estaciones de monitoreo del lago Villarrica con sus respectivos períodos de vigencia.	54

Tabla 22. Mediciones de caudal en estaciones de la DGA en distintos ríos del área de estudio. En ciertos meses no se hicieron mediciones en ciertas estaciones. Se muestran los promedios mensuales, con su respectiva desviación media. Los datos se toman cada media hora en las estaciones.68

Tabla 23. Mediciones hechas por la UFRO (2018) en el Río Pucón, con las proyecciones del flujo másico utilizando el valor medido para el mes y para el año, asumiendo que se tiene el mismo caudal y concentración.68

Tabla 24. Mediciones hechas por la UFRO (2018) en los esteros de la ribera sur del lago Villarrica en enero de 2018, con las proyecciones de flujo másico utilizando el valor medido para el mes y para el año, asumiendo que se tiene el mismo caudal y concentración. Además, a modo de comparación, incluye los datos de las concentraciones medidas en este trabajo, en muestras tomadas en enero de 2018.69

Tabla 25. Datos de transmisividad de pozos de la DGA (2016) en el área de estudio y los valores de las concentraciones de nitrato en las aguas subterráneas de este trabajo.70

Introducción

La gestión ambiental del recurso hídrico y sus ecosistemas asociados, como el lacustre, requieren el aseguramiento de un uso sustentable, la protección y mantención de la calidad de las aguas, y la preservación de los sistemas acuáticos y la biota asociada. De acuerdo a la Legislación Vigente son los Planes de Prevención y Descontaminación del Medio Hídrico (DS N°39/2012) los que establecen la definición e implementación de medidas que tienen como objetivo recuperar los niveles señalados en las Normas Secundarias de Calidad Ambiental (NSCA) de una zona denominada como Zona Saturada en alguno de sus parámetros. Una vez que se ha declarado esta zona, se puede dictar una Resolución de Inicio del Anteproyecto del Plan de descontaminación.

La elaboración de Planes de descontaminación tiene tres etapas. Primero, la preparación de documentación técnica, científica y socioeconómica en el contexto de las NSCA, sus parámetros sobre la norma, y el anteproyecto del Plan. Luego se realiza una consulta pública sobre el anteproyecto para después, finalmente, hacer un análisis de las observaciones de la consulta pública y la elaboración del proyecto definitivo del Plan de descontaminación.

Se ha constatado que en el lago Villarrica, un importante lago relacionado al turismo de la Región de la Araucanía en Chile, se han superado los valores norma de los parámetros “Clorofila a”, “Transparencia” y Fósforo disuelto, establecidos en la Norma Secundaria de Calidad Ambiental (NSCA) de la Cuenca del Lago Villarrica en la mayoría de las áreas de vigilancia, por lo que se ha declarado Zona Saturada e iniciado un plan de descontaminación.

Actualmente el Plan se encuentra en su primera etapa, por lo que es crucial desarrollar una buena base técnica para la elaboración del anteproyecto.

Alrededor del lago y en sus afluentes se desarrollan actividades humanas que podrían alterar la calidad de las aguas tributarias del lago. Estas son pisciculturas, descargas de aguas servidas, fosas sépticas, predios agrícolas y de pastoreo, y vertederos. Datos de la Dirección General de Aguas (DGA) del 2016 indican que las aguas son poco mineralizadas, por lo que los aportes de nitrógeno y fósforo de estas actividades podrían estar relacionados con la superación de los parámetros de la norma.

En lo que respecta a su hidrogeoquímica, o la composición química relacionada a la geología con la que el agua entra en contacto, es una de las áreas del conocimiento más importantes sobre el agua, dado que se enfoca en los procesos químicos que afectan la circulación y distribución de los compuestos químicos en ella, dando información relevante sobre la calidad del agua para el consumo humano y aplicabilidad a usos económicos, y efectos en ecosistemas.

Esta Memoria de Título considerará realizar un estudio y análisis en el lago y sus afluentes para poder caracterizar hidrogeoquímicamente la zona, mediante la toma de muestras de agua y su posterior análisis. Este conocimiento se utilizará para construir un modelo hidrogeoquímico general de la zona en la que se encuentra el lago.

Objetivo general

Determinar la composición y origen de la química de los distintos afluentes del lago Villarrica y la subcuenca en la que éste se encuentra para desarrollar un modelo general hidrogeoquímico de la zona de estudio, que sirva de antecedente para la elaboración del plan de descontaminación.

Objetivos específicos

- Evaluar la calidad del agua del lago, el agua superficial y el agua subterránea en la cuenca del Toltén Alto.
- Conocer la relación entre el lago, el agua superficial y el agua subterránea en la cuenca del Toltén Alto.
- Identificar y cuantificar aportes de nitrógeno y fósforo al lago.
- Desarrollar un modelo general hidrogeoquímico de la zona de estudio.

Hipótesis de trabajo

La química del agua permite diferenciar las aguas superficiales y subterráneas sujetas a distintos procesos hidrogeoquímicos. En particular, la composición isotópica del agua puede ayudar a diferenciar las distintas fuentes de nitrógeno y fósforo que podrían contribuir a la proliferación de algas. Por lo tanto, mediante el análisis de la composición química e isotópica de las aguas aportantes al lago será posible distinguir las fuentes que contribuyen a los nutrientes del lago Villarrica.

Metodología

Primero, se revisaron los antecedentes ya existentes del área de estudio, ya que el Ministerio de Medio Ambiente (MMA) viene trabajando en la zona desde el año 2009. Luego se indagó en bibliografía más específica para cumplir los objetivos acordados.

Campaña de muestreo

Desde el MMA se decidió realizar una campaña de muestreo para caracterizar geoquímicamente el agua de la zona de estudio, y usar esta información como parte de los antecedentes técnicos para el plan de descontaminación, sumándose a los esfuerzos anteriores.

Ubicación y accesos

La campaña se realizó en el lago Villarrica, ubicado en la Región de la Araucanía, en la cuenca del Río Toltén, definida por la Dirección General de Aguas (DGA). Las subcuencas que abarcará la zona de estudio son las subcuencas Lago Villarrica y Toltén Alto, y Río Pucón (Figura 1).

Casi todos los puntos son accesibles desde la ruta CH-199, entre los kilómetros 55 a 116. Otros son accesibles desde las rutas S-69, S-839, S-849, S-863, S-895, S-905, S-935, S-947, S-963.

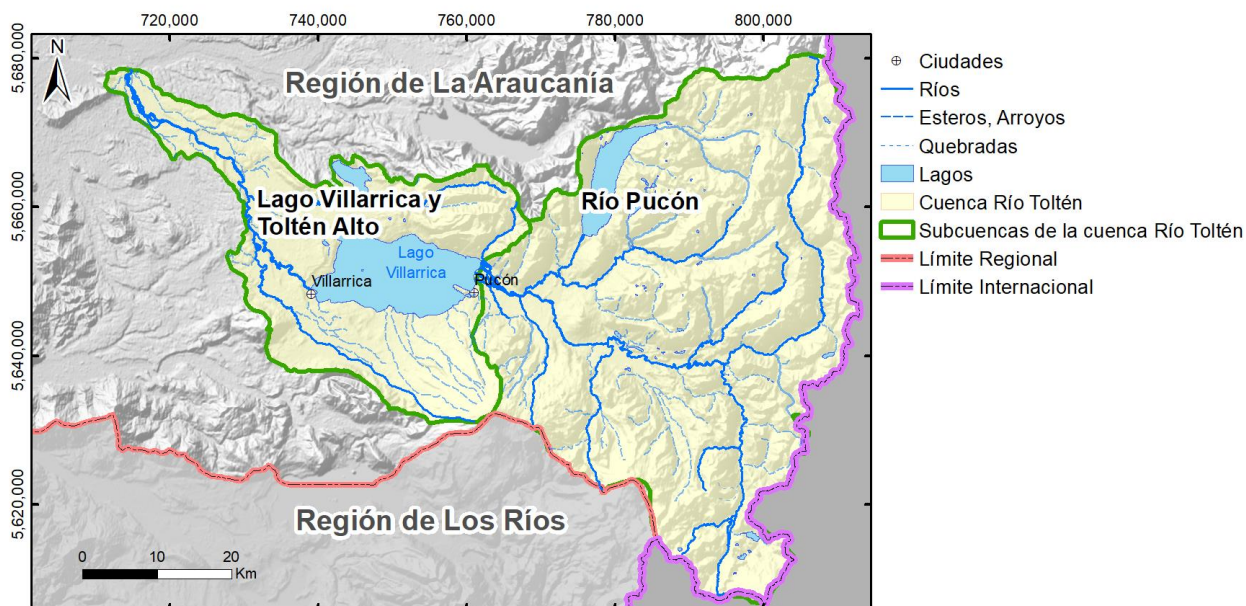


Figura 1. Mapa de la zona de estudio, y las subcuencas en las que se encuentra. Las subcuencas fueron definidas por la DGA, y corresponden a 'Lago Villarrica y Toltén Alto' y 'Río Pucón', las cuales son parte de la cuenca Río Toltén, ubicada en la Región de La Araucanía.

Diseño y planificación

Se eligieron los puntos en base a la ubicación de las posibles fuentes contaminantes (Figura 2) que podrían explicar la superación de parámetros de la norma, y también a intentar caracterizar geoquímicamente los distintos afluentes del lago.

Las potenciales fuentes se dividen en puntuales y difusas. En las primeras, se encuentran las pisciculturas, descargas de aguas servidas sin tratamiento en Curarrehue, la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS) de Pucón y Villarrica, el vertedero municipal de Pucón y el relleno sanitario de Villarrica.

Las fuentes puntuales son estudiadas mediante puntos de control antes y después. Por temas de presupuesto y logística se agruparon varias fuentes que compartían cauces o que se encontraban en afluentes de un río común.

Las fuentes difusas se abordan principalmente desde el agua subterránea, tomando muestras en pozos de la zona.

Debido a la complejidad de muestrear en ciertos puntos se completaron sólo 35 de los 40 puntos. Éstos se pueden ver en el mapa (Figura 3).

El terreno se realizó en verano, específicamente entre el 8 y 18 de enero de 2018, para que los datos reflejen la química de las aguas en los momentos previos o durante las proliferaciones algales que ocurren en el lago.

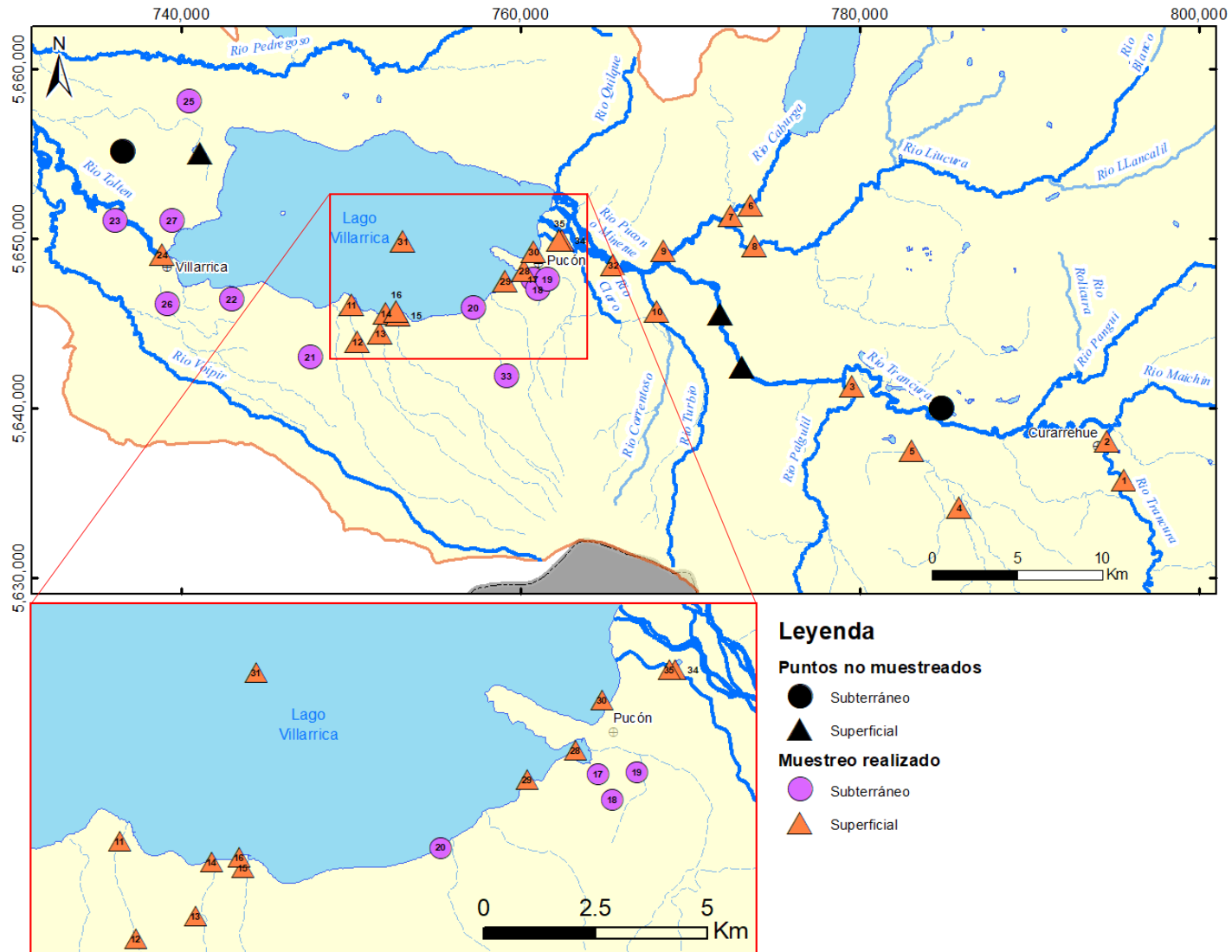


Figura 3. Mapa de puntos muestreados con acercamiento en rojo. Se incluyen los puntos del plan que no fueron muestreados. Los números indican el orden en que fueron muestreados los puntos. Los círculos indican muestras de agua subterránea, mientras que los triángulos indican muestras de agua superficial.

Muestreo

Se utilizaron los siguientes implementos:

- Guantes de nitrilo
- Medidor multiparámetro portátil de pH, conductividad y Eh HACH GQ40d
- Pozómetro, para medir nivel de agua en los pozos
- Bailer plástico, para tomar muestras de pozos en los que no se pudiera bombear
- Botellas de polietileno de 125 ml, unas con tratamiento para cationes y otras con tratamiento para aniones
- Filtros de 0.4 y 0.2 micras
- Ice pack
- Coolers para almacenamiento y transporte de muestras en terreno
- Ácido nítrico (HNO_3) concentrado a 20% v/v
- GPS
- 2 jarras plástica de 1L
- 3L de agua MQ
- Agua destilada, para la limpieza de los implementos

Lo primero es ambientar la jarra con el agua en el punto de muestreo (se llena y se vacía, tres veces), antes de tomar la muestra. El agua tomada de esta manera es mezclada entre las dos jarras. Luego en una jarra se mide con el medidor multiparámetro portátil la T° , la conductividad, el pH y el Eh., mientras que en la otra el agua a muestrear se trata de diferentes maneras de acuerdo con los distintos tipos de análisis de laboratorio que será sometida:

- Análisis de cationes o de trazas: Requiere filtrar el agua muestreada con filtro de 0.4 μm . La botella de 125 ml se llena hasta la mitad con el agua a muestrear y previamente filtrada, luego se le agrega 1 ml de ácido nítrico a 20% v/v y finalmente se llena completamente.
- Análisis de aniones: Requiere filtrar el agua muestreada con filtro de 0.4 μm . Se utiliza una botella de 125 ml.
- Análisis de carbonato y bicarbonato: No deben quedar burbujas de aire. Se utiliza una botella de 125 ml.
- Análisis de sílice: En la botella de 125 ml, a 99 ml de agua ultrapura se le agrega 1 ml de muestra.
- Análisis de isótopos de ^{14}N : Requiere filtrado con filtro de 0.2 μm . Se utiliza una botella de 125 ml.

Todas las botellas son ambientadas previamente, con el agua filtrada si es necesario usar filtro. Después del muestreo son selladas con cinta gris.

Las muestras deben mantenerse a 4°C dentro de lo posible. Para esto se mantenían dentro de los coolers con los ice packs. Una vez en el lugar de alojamiento se guardaban en el refrigerador.

Tabla 1. Número de muestreos realizados por día de terreno, realizado en enero de 2018.

Día	10/01	11/01	12/01	13/01	15/01	16/01	17/01	Total
N° de muestreos	3	7	6	6	5	6	2	35

Tabla 2. Puntos de muestreo con sus respectivas descripciones.

Punto de muestreo	Descripción
1	Río Trancura antes de descargas de aguas servidas de Curarrehue
2	Río Trancura, después de descargas de aguas servidas de Curarrehue
3	Río Palguín
4	Río Cabedaña, antes de piscicultura Hendrix Genetics
5	Después de confluencia entre ríos Cabedaña y Uampoe
6	Río Caburgua antes de las pisciculturas
7	Río Caburgua, después de las pisciculturas
8	Río Liucura
9	Después de confluencia entre ríos Liucura y Caburgua
10	Río Turbio
11	Estero Molco
12	Estero Chosco antes de Piscicultura Chehuilco
13	Estero Loncotraro antes de Piscicultura Loncotraro
14	Estero Loncotraro, después de Piscicultura Loncotraro
15	Estero Correntoso antes de piscicultura Fundo La Cascada
16	Estero Las Chilcas
17	Estanque del Hotel Gran Pucón. Toma agua de un pozo automática y continuamente.
18	Llave en planta de agua potable. El agua se extrae de pozo O-91 (código DGA).
19	Pozo Aguas Araucanías en plaza Colo-Colo. O-138 (código DGA)
20	Pozo Camping Soraya Eltit
21	Noria casa Lefún 77. O-410 (código DGA)
22	Pozo Condominio Alto Pinar. O-80 (código DGA)
23	Pozo en PTAS de Villarrica. Pozo O-313 (código DGA).
24	Río Toltén, en la desembocadura del lago Villarrica
25	Pozo O-139 (código DGA)
26	Pozo O-119 (código DGA)
27	Pozo Condominio Jardines de Villarrica. O-435 (código DGA)
28	Lago Villarrica, cercano a muelle La Poza
29	Lago Villarrica, ribera Oeste. Antes de entrada de La Poza, desde el sur.
30	Lago Villarrica, cercano a Playa Grande
31	Centro del Lago Villarrica
32	Río Pucón, antes de la desembocadura al lago Villarrica.
33	Pozo Fundo el Volcán. O-412 (código DGA).
34	Río Claro antes de la descarga de la PTAS de Pucón
35	Río Claro después de la descarga de la PTAS de Pucón

Caracterización e identificación de procesos hidrogeoquímicos

Se midieron parámetros in situ (T° , conductividad eléctrica, pH, Eh) con el instrumento multiparámetro, además de enviar las muestras de agua descritas anteriormente para análisis químico.

Estos análisis fueron realizados por el laboratorio de Geoquímica de Fluidos del CEGA (FCFM, Universidad de Chile), y corresponden a los siguientes:

- Análisis de Aniones (F^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Br^- , NO_3^- , PO_4^{3-})
- Análisis de Cationes (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})
- Análisis de Trazas (Li, Be, B, Al, V, Cr, Fe, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Zr, Mo, Ag, Cd)
- Análisis de Bicarbonato y Carbonato
- Análisis de Sílice

La instrumentación utilizada por el laboratorio corresponde a:

- Titulador automático Hanna HI-902C con electrodo de vidrio combinado, sensor de temperatura. Determinación de carbonatos y bicarbonatos en agua usando el Método de Giggenbach. Medida de pH.
- Cromatógrafo Iónico 861 Advanced Compact IC Metrohm, columna Metrosep A Supp 5 - 250/4.0, pre-columna Metrosep RP 2 Guard/3.5, detector de conductividad. Para análisis de aniones.
- Espectrofotómetro de absorción atómica con llama (F-AAS) Perkin Elmer PinAAcle 900F, con nebulizador estándar. Para análisis de cationes mayores.
- Espectrometría de masas cuadrupolo con fuente de plasma de acoplamiento inductivo y celda de colisión, Thermo Scientific ICP-MS Q iCAP Q. Para análisis de trazas.

Caracterización isotópica

Las muestras fueron enviadas a la Universitat de Barcelona para el análisis de ^{14}N de las muestras de agua, pero hasta el momento no se han analizado.

Análisis de datos

Los datos obtenidos de los análisis químicos del terreno correspondiente a esta memoria, además de datos anteriores provistos por el MMA y la Dirección General de Aguas (DGA) serán analizados comparativa y estadísticamente, con técnicas y procedimientos descritos en el Marco Teórico de esta memoria.

Antecedentes geológicos de la zona de estudio

Estudios anteriores en la zona incluyen las cartas geológicas del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) y un informe de la DGA sobre la hidrogeología de la Región de la Araucanía (DGA, 2016).

Marco geológico regional

Las unidades geológicas del área de estudio muestran la evolución del margen sudamericano desde el Cretácico Inferior hasta el Holoceno.

El área de estudio comprende parte del arco plutónico del Cretácico y Mioceno, en forma de una franja longitudinal de 300 km, que se extiende entre 38-40°S. En el Paleoceno se desarrolló una serie de cuencas intramontanas restringidas. Durante el Oligoceno a Mioceno Inferior se desarrollaron cuencas extensionales marinas y continentales con volcanismo básico a ácido en este sector, junto a una amplia zona entre los 38 y 42°, ubicada entre la Cordillera de la Costa y la Cordillera de los Andes (Muñoz et al., 2000; Jordan et al., 2001), representado por la Formación Curamallín (Moreno y Lara, 2008; Jara et al., 2011).

El arco plutónico antes mencionado ha permanecido prácticamente estático desde el Cretácico en esta latitud, durante el Mioceno se articuló en un conjunto de plutones, formando una franja asociada genéticamente a la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO), y al establecimiento de un régimen transpresivo, que podría dar una explicación a la deformación registrada en las secuencias volcanosedimentarias. Además, Radic (2010) da cuenta de la inversión de las cuencas del Oligoceno-Mioceno.

En el Plioceno-Pleistoceno, se desarrolló una actividad volcánica calcoalcalina, con centros de emisión hacia el este, y la depositación de materiales clásticos continentales, que son parte de la Formación Malleco (Jara et al., 2011).

La relación espacial entre el arco plutónico y la ZFLO se ha mantenido en los eventos volcánicos del Pleistoceno Inferior-Holoceno representados por la construcción de estratovolcanes y conos monogenéticos (Moreno y Lara, 2008).

El Pleistoceno-Holoceno se caracteriza por una sucesión de procesos volcánicos y glaciales que modelan a la morfología local, evidenciados en los últimos tres ciclos glaciales y la edificación del volcán Villarrica (Moreno y Clavero, 2006; Jara et al., 2011), además del régimen transpresivo (Moreno y Lara, 2008).

Estratigrafía del área de estudio

La geología del área de estudio (Figura 4), descrita por Moreno y Clavero /2006), Moreno y Lara (2008) y Jara et al. (2011), comprende un basamento del Paleozoico al Triásico, bajo intrusivos cretácicos (Kg) y miocenos (Mg). Sobre esto hay lavas y material piroclástico del Paleoceno-Pleistoceno (KTvc, OMcm, PPlm, Plv), labrados por las glaciaciones Santa María (Plm2) y Llanquihue (Plgf1, Plm1), de este último período. Sobre lo anterior, se encuentran depósitos producidos por el volcanismo del Pleistoceno hasta los tiempos actuales (PIHdp, Hv, Hlh), además de los depósitos cuaternarios (Hrm, Hep, Hc, Hal, Hf).

Paleozoico-Triásico

Complejo Metamórfico Bahía Mansa (Devónico-Triásico)

Conjunto de rocas metamórficas compuesto por esquistos pelíticos y máficos, y cuerpos ultramáficos serpentinizados. El metamorfismo es de carácter regional, la deformación caracterizada por una segunda foliación regional sobre una relictas, y corresponde a facies de esquistos verdes (Jara et al., 2011).

Ha sido datada con K-Ar y $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ entre 260 y 220 Ma.

Cretácico

Granitoides Palguín Kgp (Cretácico Inferior)

Comprende dos intrusivos, compuestos principalmente por tonalitas y granodioritas. Se ubican al sur del lineamiento NW-SE del valle del río Pucón, conformando los cerros La Liebre y Palguín (Moreno y Lara, 2008).

Moreno y Lara (2008) obtuvieron una edad $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de 105.4 Ma.

Granito Caburgua Kgc (Cretácico Superior)

Se define por Moreno y Lara (2008) como un cuerpo intrusivo, comprendido por granitos, y granodioritas y dioritas subordinadas. Aflora al oeste y sureste del lago Caburgua. El primer afloramiento, se ubica al oeste de la ZFLO, conformando una franja norte-sur de 16 km de largo y 3-7 km de ancho, mientras que el segundo se encuentra al este de la ZFLO, formando un cuerpo irregular de 60 km².

Se obtuvieron edades de 79 Ma y 64 Ma con K-Ar (Moreno y Lara, 2008).

Paleoceno

Estratos de Relicura Par (Paleoceno)

Secuencia estratificada y plegada de brechas volcánicas, tobas ignimbríticas, y lavas andesíticas, con fuerte alteración de clorita y epidota, con base desconocida y hacia el techo cubierta en discordancia angular por la Formación Curarrehue y rocas volcánicas pleistocenas y holocenas (Moreno y Lara, 2008). También incluye diques, filones manto, andesitas macizas y pórfidos andesíticos y dacíticos.

Esta secuencia forma una sucesión compleja de sinclinales y anticlinales, con rumbos y manteos en varias direcciones (Moreno y Lara, 2008).

Jordan et al. (2001) obtuvieron edades de 50-57 Ma.

La secuencia se considera equivalente al Complejo Vizcacha-Cumilao de Suárez y Emparán (1997) (Moreno y Lara, 2008).

Oligoceno-Mioceno

Formación Curamallín OMcm (Oligoceno-Mioceno)

Descrita por Moreno y Lara (2008) como una sucesión estratificada y plegada de capas de tobas, areniscas tobáceas, brechas volcánicas y lavas andesíticas con

intercalaciones de lutitas y limonitas, que conforma una franja norte-sur de hasta 12 km de ancho, y que alcanza 1000 metros de espesor al norte de Pucón, en el cerro Chaquilcura. Se encuentra sobre cuerpos intrusivos del Cretácico y Eoceno, y bajo la Formación Malleco, en discordancia angular. Además, está intruída por granitoides del Mioceno.

Esta formación es equivalente a los Estratos de Lago Ranco de Campos et al. (1998), y se han obtenido edades de 14.5 y 19.8 Ma (Moreno y Lara, 2008), entre 11 y 22 Ma (Suárez y Emparán, 1995, 1997), de 13 a 21 Ma (García et al., 1988; Campos et al., 1998) y 25 Ma (Jordan et al., 2001).

Granitoides Carhuello Mgc (Mioceno)

Definidos como un cuerpo intrusivo plutónico formado por dioritas, granitos y granodioritas, cuyos afloramientos se ubican al norte y noreste de Pucón, en el sector de Quelhue y el cerro Carhuello. Ocupa una superficie irregular de 50 km² y subyace a la Formación Malleco y a las unidades volcánicas pleistocenas y holocenas en discordancia de erosión. Además, intruye a la Formación Curamallín, del Oligoceno-Mioceno (Moreno y Lara, 2008).

Dos edades K-Ar dan valores de 12.5 y 11.8 Ma, y otras dos con ⁴⁰Ar/³⁹Ar arrojan valores de 14.5 y 11.32 Ma (Moreno y Lara, 2008).

Granitoides Trancura Mgt (Mioceno Superior)

De acuerdo con Moreno y Lara (2008), incluyen diferentes rocas intrusivas miocenas que concentran sus afloramientos en el dominio interno de la ZFLO y en una franja transversal a lo largo del valle del río Pucón, en dirección ONO-ESE. Comprenden granitos, granodioritas, aplitas y dioritas, incluyendo pórfidos andesíticos y dacíticos subordinados. Subyacen a la Formación Curarrehue y a materiales volcánicos pleistocenos y holocenos. Además, intruyen al Granito Caburgua del Cretácico Superior, a los Granitoides Carhuello del Mioceno, a los Estratos de Relicura del Paleoceno y a la Formación Curamallín del Oligoceno-Mioceno.

Moreno y Lara (2008) obtuvieron edades K-Ar entre 14.4 y 4.8 Ma.

Plioceno

Formación Curarrehue Pc (Plioceno)

Corresponde a un conjunto de rocas volcánicas, volcanosedimentarias y sedimentarias que afloran al este de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui. Está compuesta por tobas, brechas volcánicas, conglomerados volcánicos y lavas andesíticas, además de areniscas y limolitas, y está intruída por pórfidos micrograníticos y filones manto andesíticos (Moreno y Lara, 2008).

Moreno y Lara (2008) obtuvieron edades de 3.98 Ma en circones con U-Pb SHRIMP, y 3.3 y 3.7 Ma con K-Ar.

Esta unidad es equivalente a la unidad inferior de la Formación Malleco definida por Suárez y Emparán (1997) en la Hoja Curacautín.

Plioceno-Pleistoceno

Formación Malleco PPlm (Plioceno-Pleistoceno Inferior)

Suárez y Emparán (1997) la definieron en la Hoja Curacautín como una secuencia volcánica continental, constituida por una alternancia de brechas volcánicas, conglomerados volcánicos, tobas ignimbríticas y lavas basálticas a andesíticas.

Se obtuvieron edades de entre 4.4 y 0.8 Ma con K-Ar (Suárez y Emparán), y 1.7 Ma con K-Ar (Lara et al. 2001).

Estratovolcanes Antiguos Plimv (Pleistoceno Inferior a Medio)

Comprende secuencias estratificadas, erosionadas y remanentes de estratovolcanes antiguos, constituida por lavas basálticas a dacíticas, con predominancia de andesitas-basálticas, con intercalaciones de tobas, brechas y conglomerados volcánicos, diques, filones mantos y lacolitos (Moreno y Lara, 2008).

Los estratos son subhorizontales y están en discordancia de erosión sobre granitoides, o en discordancia angular sobre rocas de los Estratos de Relicura y las formaciones Curamallín y Curarrehue.

Moreno y Lara (2008) constatan edades de 0.8 Ma con K-Ar en roca total y, 635 y 330 ka con $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. Moreno y Clavero (2006) dataron lavas en 600 y 580 ka con $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$.

Lavas y rocas volcanoclásticas Plmsv (Pleistoceno Medio a Superior)

Forma la secuencia basal erosionada de los estratovolcanes modernos (volcanes Villarrica, Quetrupillán y Sollipulli). Se componen de andesitas basálticas, e incluye basaltos y andesitas silíceas a dacitas, con frecuentes intercalaciones de tobas, brechas, y conglomerados volcánicos de origen lahárico y fluvio-glacial.

Las edades de las dataciones hechas en esta unidad corresponden a 190, 170, 138 y 100 ka (Moreno y Lara, 2008) y, a 170 y 95 ka (Moreno y Clavero, 2006), además, en sectores del volcán Villarrica los productos volcánicos fueron emitidos durante la Glaciación Llanquihue, antes de los 14 ka (Pavez, 1997; Naranjo et al., 1993).

Depósitos glaciales de la Glaciación Llanquihue Plm1 (Pleistoceno Superior)

Esta unidad comprende depósitos morrénicos y glaciofluviales. Los primeros corresponden a diamictos polimícticos, soportados por una matriz que incluye clastos subredondeados, arena, limo y arcilla. Se encuentran en el extremo nororiente del lago Villarrica, al sur de Pucón y al suroeste del lago Caburgua. Los segundos no se encuentran muy extendidos, y se presentan entremezclados con las morrenas, formados por bancos de gravas intercaladas con niveles de arena (Moreno y Lara, 2008).

Jara et al. (2011) separan esta unidad en su parte morrénica (Plm1) y su parte glaciofluvial (Plgf1), describiéndolas más detalladamente.

Mercer (1976) sitúa la Glaciación Llanquihue entre 75 y 14 ka. Dataciones ^{14}C sitúan el último avance glacial entre 35 y 14.2 ka (Heusser, 1974; Porter, 1981; Lowell et al., 1995; Clayton et al., 1997).

Estos depósitos están cubiertos por la Ignimbrita Cudico (PIHdp) con una edad de 13.8 ka, la cual les acota esta edad mínima (Moreno y Clavero, 2006).

Pleistoceno Superior-Holoceno

Lavas tardiglaciales PIHv (Pleistoceno Superior Alto-Holoceno)

Constituida por lavas tipo pahoehoe, aa y de bloques, con intercalaciones piroclásticas, forman gran parte de la base de estratovolcanes actuales, como el Villarrica, o afloran como coladas en diversos sectores. Sobreyacen a las unidades volcánicas pleistocenas (Plimv, Plmsv) y los depósitos de la Glaciación Llanquihue (Plm1) (Moreno y Lara, 2008).

Considerando la morfología, Moreno y Lara (2008) establecen una edad máxima inferior a 14 ka. Además, incluyen depósitos piroclásticos del Holoceno (>3.5 ka) en esta unidad.

Depósitos piroclásticos posglaciales PIHdp (Pleistoceno Superior alto-Holoceno)

Moreno y Lara (2008) la definen como una unidad formada por una sucesión de depósitos piroclásticos posglaciales, con intercalaciones de lavas basálticas a dacíticas. Estos depósitos piroclásticos pueden ser tanto de flujo como de caída, y cubren toda el área estudiada. Se representan en el mapa sólo las zonas donde superan los 10 m de espesor.

En la base dataciones ^{14}C indican una edad entre 14.3 y 13.4 ka en las ignimbritas Cudico y Licán (Clavero, 1996; Moreno y Clavero, 2006). En el techo la ignimbrita Pucón se ha datado entre 3.9 y 3.5 ka (Moreno, 1993; Moreno et al. 1994; Clavero, 1996; Moreno y Clavero, 2006).

Anillos de tobas recientes Hva (Holoceno)

Descrita por Jara et al. (2011) como un anillo de tobas monogénico, perteneciente a los Centros Eruptivos de Rucapillán (Moreno y López-Escobar, 1994). Se compone de fragmentos de bombas de basaltos afíricos, de granitoides y diversas rocas volcánicas, inmersos en matriz de ceniza meteorizada a palagonita (Moreno y López-Escobar, 1994).

Se encuentra cubriendo los depósitos de la Glaciación Santa María y corta a la ignimbrita Curacautín de 13.2 ka (Naranjo y Moreno, 2004).

Lavas recientes Hv (Holoceno)

Unidad conformada por coladas de lavas aa y pahoehoe basálticas a dacíticas recientes e históricas asociadas al volcán Villarrica (Jara et al., 2011).

Son más jóvenes que la ignimbrita Pucón, de 3.5 ka, y varias fueron emitidas durante las erupciones históricas de los años 1787, 1921, 1948, 1964, 1971 y 1984 (Moreno y Clavero, 2006).

Depósitos laháricos históricos y recientes HIh (Holoceno)

Asociados a erupciones históricas del volcán Villarrica y distribuyéndose en sus flancos, corresponden a depósitos de flujos detríticos volcanoclásticos, no consolidados, con fragmentos monomícticos de lavas y bloques polimícticos mal seleccionados en matriz arenosa (Jara et al, 2011).

Descritos separadamente entre históricos (Hlh) y recientes (Hlhr) por Moreno y Lara (2008) y considerados como parte de los productos de las erupciones en la subunidad histórica Hv3lh definida por Moreno y Clavero (2006).

Depósitos de remoción en masa Hrm (Holoceno)

Definidos por Moreno y Lara (2008) como conos o lóbulos formados por depósitos de flujo de detritos y deslizamiento de roca. Tienen fragmentos angulosos, tamaño gravas a bloques con matriz de gravilla, arena y arcilla-limo.

Depósitos poligénicos Hp (Holoceno)

Arenas, gravas y limos, con intercalaciones de depósitos volcanoclásticos, constituidos principalmente por depósitos fluviales, lacustres y laháricos, con intercalaciones de depósitos de flujo piroclástico y aluviales (Moreno y Lara, 2008).

Depósitos deltaicos Hd (Holoceno superior)

Estos bancos de arenas finas a gruesas y gravas subordinadas, formando abanicos llanos, se encuentran en las desembocaduras de los ríos *Pucón*, *Trafampulli* y *Blanco* (Moreno y Lara, 2008).

Depósitos de playas lacustres Hpl (Holoceno superior)

Se trata de depósitos litorales de lagos, comprendiendo arenas finas a gruesas y gravas finas subordinadas, que forman bancos horizontales de variable espesor. Constituyen las riberas de los lagos *Villarrica* y *Caburgua* (Moreno y Clavero, 2006; Moreno y Lara, 2008; Jara et al., 2011).

Depósitos Coluviales Hc (Holoceno superior)

Depósitos de gravas, arenas y limos, dispuestos como escombros de falda, en forma de conos. Debido a las frecuentes pendientes empinadas, estos depósitos son abundantes (Moreno y Clavero, 2006; Moreno y Lara, 2008; Jara et al., 2011).

Depósitos de abanico aluvial (Hal) (Holoceno superior)

Compuestos por gravas y arenas, formando abanicos, localizados en la desembocadura de quebradas (Jara et al., 2011).

Depósitos fluviales actuales Hf (Holoceno)

Son depósitos no consolidados compuestos por arenas y gravas, distribuidos a lo largo de los cauces de los ríos de la zona. Tienen espesores variables, de metros a decenas de metros, e incluyen gravas fluviales con imbricación y bancos de arena fina en las planicies de inundación (Moreno y Lara, 2008; Jara et al., 2011).

Geología estructural del área de estudio

Situada en parte del dominio andino interno, en el área estudiada destacan dos rasgos estructurales de primer orden, correspondientes a dos lineamientos N-S a NNE-SSW, los cuales son la ZFLO y la Falla Reigolil-Pirehueico. Éstas definen un sistema estructural intra-arco de 1200 km de extensión, entre los 38-46°S (Cembrano et al., 1996; Cembrano et al., 2000).

Estructuras subordinadas tienen una orientación NW-SE, como son la cadena de estratovolcanes Villarrica-Lanín, y estructuras más localizadas como la ribera norte del lago Villarrica y la mitad del curso del río Trancura (Moreno y Lara, 2008).

Los lineamientos principales están representados por grupos de fallas inversas y transcurrentes, que describen un eje de acortamiento NE-SW, concomitante con un régimen transpresivo dextral (Lavenu et al., 1997; Lavenu y Cembrano, 1999). De acuerdo con lo anterior, la disposición de la cadena de estratovolcanes permite una interpretación similar para el régimen del Pleistoceno-Holoceno, cuando dominaba un eje de máximo esfuerzo horizontal de rumbo NE-SW (Lavenu y Cembrano, 1999; Rosenau et al., 2006; Lara et al., 2006).

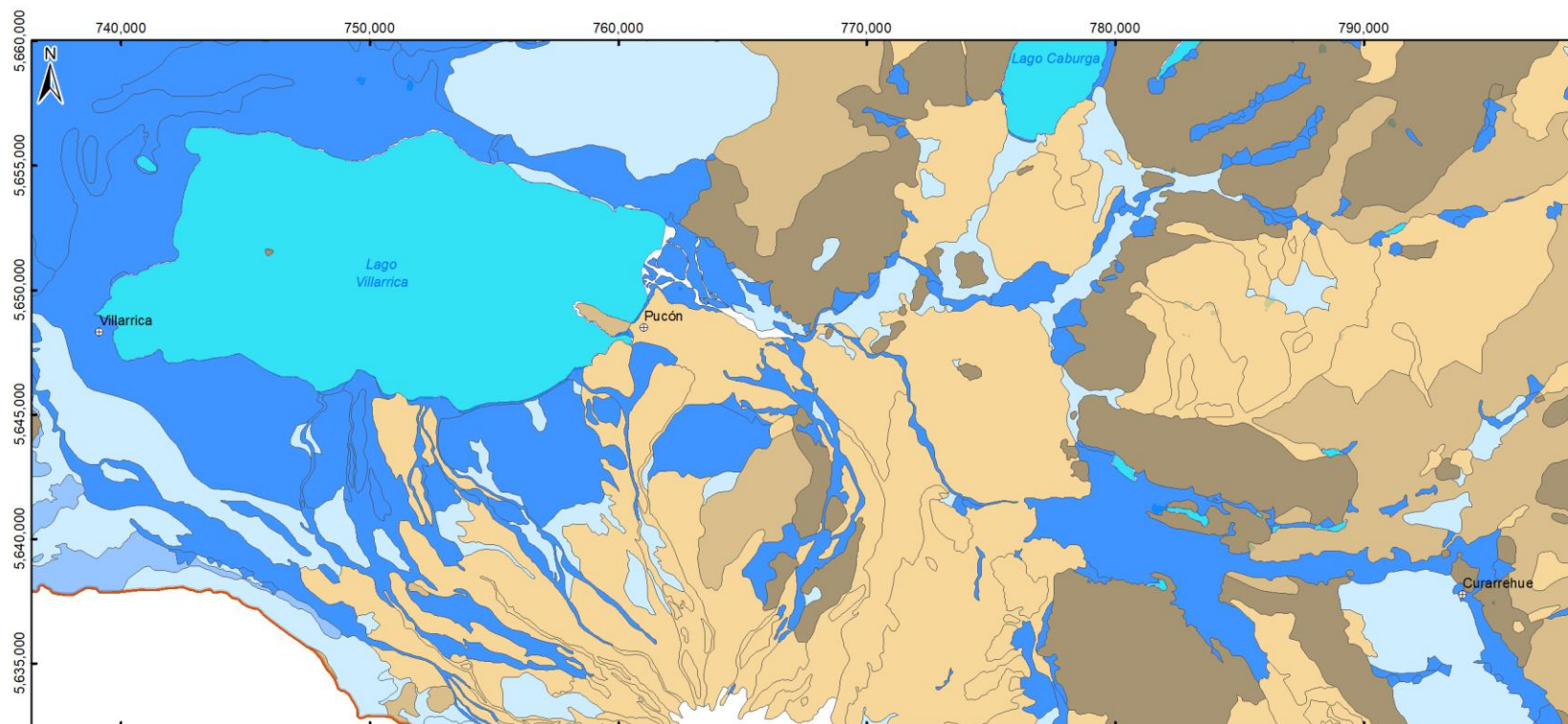
Durante el Cuaternario, el margen occidental de la franja plutónica miocena y la Falla Reigolil-Pirehueico delimitan la zona de deformación activa, en un régimen igual al anterior (Lavenu y Cembrano, 1999).

El sector occidental del área de estudio se localiza en la Depresión Intermedia, en donde la cobertura de depósitos glaciales y piroclásticos del Cuaternario hacen difícil verificar la continuidad de lineamientos y estructuras a escala regional definidas en zonas aledañas (Jara et al., 2011).

De todas formas, se pueden observar estructuras locales, como fallas menores de orientación NW-SE, en afloramientos de las formaciones Curamallín y Malleco. Esta orientación coincide con lineamientos nombrados en los párrafos anteriores (Jara et al., 2011).

Hidrogeología del área de estudio

En el informe de la DGA (2016) se definieron unidades hidrogeológicas en la Región de la Araucanía basada en geología del área de estudio utilizando la descripción estratigráfica de pozos, la litología, la piezometría y otros parámetros hidráulicos (Figura 5). Se adaptaron los nombres de las unidades para que tengan un mejor sentido hidrogeológico.



1:200,000

0 5 10 Km

Leyenda

- UH1: Depósitos detríticos no consolidados del Cuaternario Superior
- UH2: Depósitos glaciofluviales no consolidados del Cuaternario Superior
- UH3: Depósitos volcanosedimentarios semi-consolidados a consolidados del Neógeno Superior al Cuaternario
- UH4: Lavas y depósitos volcanosedimentarios del Cuaternario Superior
- UH5: Depósitos volcanosedimentarios consolidados del Paleógeno al Neógeno
- UH6: Basamento metamórfico del Paleozoico al Mesozoico

Figura 5. Mapa de la hidrogeología de la zona, modificado a partir de DGA (2016).

Unidades hidrogeológicas

UH1: Depósitos detríticos no consolidados del Cuaternario Superior

Se agrupan todos los depósitos no consolidados desde el Pleistoceno Superior al Holoceno. Presenta un espesor variable, desarrollándose mayormente en los valles, cauces de ríos y faldas de cerros. Se compone de los depósitos morrénicos y glaciofluviales de la Glaciación Llanquihue (Plm1), fluviales (Hf), laháricos históricos y actuales (Hlh), de remoción en masa (Hrm), coluviales (Hc), de abanico aluvial (Hal), deltaicos (Hd), poligénicos (Hp) y de playas lacustres (Hpl).

Se considera esta unidad como el acuífero principal de la región.

UH2: Depósitos glaciofluviales no consolidados del Cuaternario Superior

Se conforma por depósitos no consolidados a semi consolidados de origen glacial a glaciofluvial del Pleistoceno Medio a Pleistoceno Superior. Incluye los depósitos morrénicos y glaciofluviales de la glaciación Río Llico, Santa María y los depósitos fluvioestuarinos.

UH3: Depósitos volcanosedimentarios semi-consolidados a consolidados del Neógeno Superior al Cuaternario

En el área de estudio, esta unidad considera depósitos volcanosedimentarios semi consolidados a consolidados del Plioceno-Pleistoceno al Holoceno. Integrada por la Formación Curarrehue (Pc), la Formación Malleco (PPlm), depósitos del abanico volcanoclástico de Muco y los depósitos piroclásticos posglaciales (PIHdp).

Tiene afloramientos aislados en la precordillera y cordillera de la cuenca del río Toltén, y puede alcanzar profundidades de 300-400 m.

UH4: Lavas y depósitos volcanosedimentarios del Cuaternario Superior

Compuesta por lavas con intercalaciones de rocas volcanoclásticas del Pleistoceno Inferior al Holoceno, correspondiendo a los estratovolcanes antiguos (Plimv), lavas y rocas volcanoclásticas (Plmsv), lavas tardiglaciales (PIHv) y lavas recientes (Hv).

UH5: Depósitos volcanosedimentarios consolidados del Paleógeno al Neógeno

Unidad integrada por depósitos consolidados que abarcan desde el Triásico al Pleistoceno. En el área de estudio sólo se encuentra en los estratos de Relicura, del Paleoceno, y en la formación Curamallín, del Oligoceno-Mioceno. Incluye la formación Llafquentué-Huimpil, la formación Nacientes del Bio Bio, los estratos de Relicura (Par), la formación Temuco, la formación Pilmahue, la formación Curamallín (OMcm) y Conglomerados Raluncoyén y Paillal.

Presenta afloramientos aislados en la Cordillera de los Andes.

UH6: Basamento metamórfico del Paleozoico al Mesozoico

Formada por los complejos metamórficos de la región y por los cuerpos plutónicos del Jurásico Superior al Mioceno. En el área de estudio estos son el complejo metamórfico Bahía Mansa (PzTrbm), los granitoides Palguín (Kgp), granito Caburgua (Kgc), granitoides Carhuello (Mgc) y granitoides Trancura (Mgt).

Aflora principalmente en cuenca del río Toltén, y puede alcanzar profundidades de más de 1000 m de acuerdo con registros de pozos profundos alrededor de Temuco.

Esta unidad se considera con baja a muy baja conductividad hidráulica, aunque no se cuentan con datos de análisis de pruebas de bombeo en esta unidad. Se estima una permeabilidad menor a 10^{-5} m/d (Domenico y Schwartz, 1998).

Además, en DGA (2016) se analizaron datos de pruebas de bombeo para determinar las propiedades hidráulicas de cada unidad hidrogeológica (Tablas 3 y 4).

Tabla 3. Propiedades hidráulicas para pozos en la cuenca del río Toltén. Se muestran los rangos y promedio de la transmisividad (T), la permeabilidad (K) por cada unidad hidrogeológica (UH). Tomado de DGA (2016).

Toltén		T (m²/d)			-	K (m/d)	
Unidades hidrogeológicas	N° de datos	Mín	Máx	Promedio	Mín	Máx	Promedio
UH1	24	10.95	3845.63	721.68	0.19	99.24	21.40
UH2	15	29.11	1270.51	369.58	0.46	52.62	10.61
UH3	1	12.65	12.65	12.65	0.15	0.15	0.15
UH4	3	158.11	3870.75	1436.58	2.52	146.07	50.89

Tabla 4. Propiedades hidráulicas para pozos en la cuenca del río Imperial. Se muestran los rangos y promedio de la transmisividad (T), la permeabilidad (K) por cada unidad hidrogeológica (UH). Tomado de DGA (2016).

Imperial		T (m²/d)			-	K (m/d)	
Unidades hidrogeológicas	N° de datos	Mín	Máx	Promedio	Mín	Máx	Promedio
UH1	21	6.28	7905.60	842.66	0.09	309.17	27.87
UH2	1	101.19	101.19	101.19	2.26	2.26	2.26
UH3	24	0.10	5002.78	353.56	0.06	50.53	6.11
UH4	2	32.02	164.99	98.50	0.39	3.53	1.96
UH5	2	12.46	74.41	43.43	0.26	0.74	0.50
UH6	1	59.59	59.59	59.59	1.42	1.42	1.42

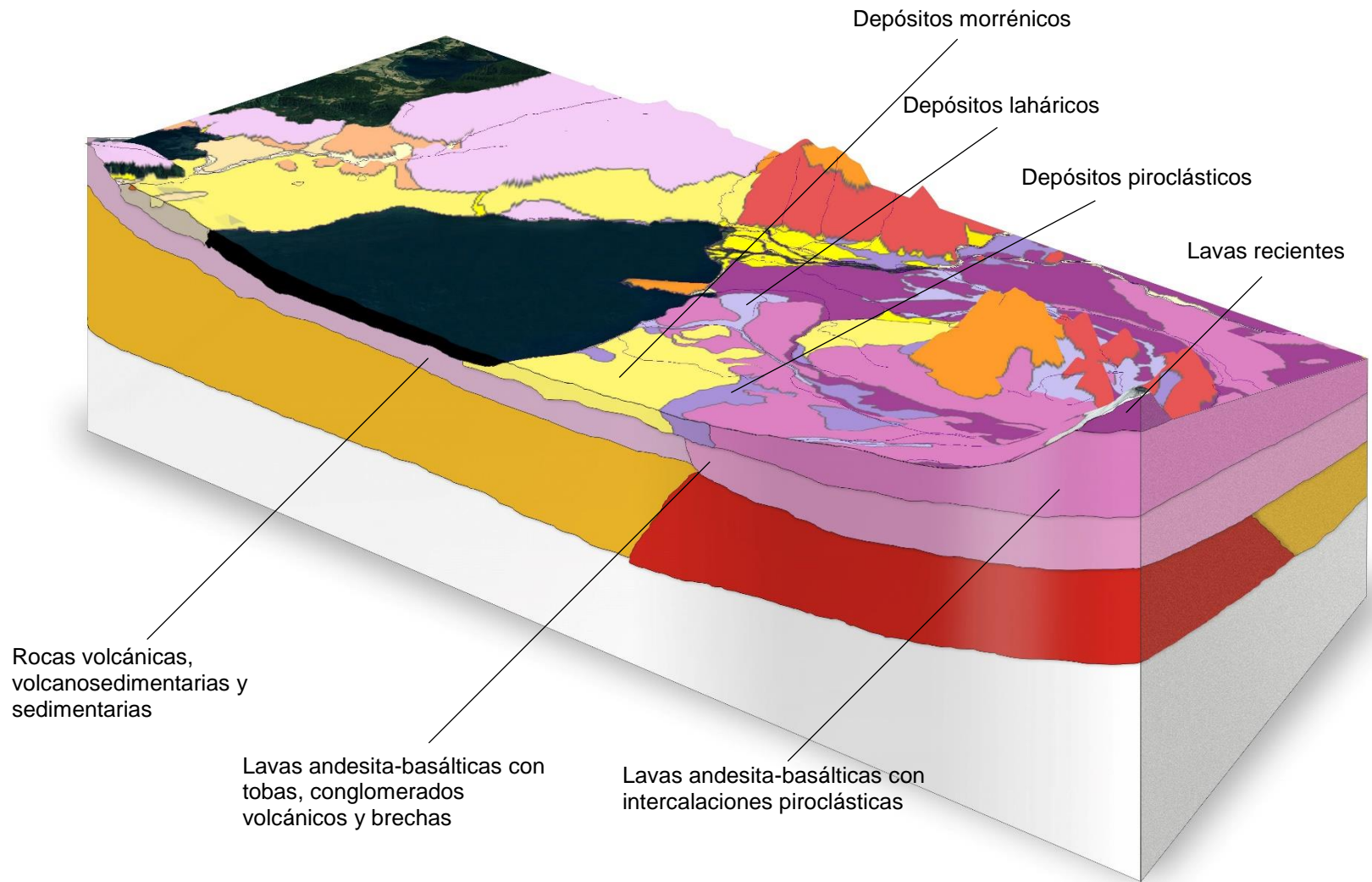


Figura 6. Vista en 3D de la geología de la zona. Se indican las secuencias más relevantes para la hidrogeología local. Los pozos de la zona se encuentran principalmente en los depósitos morrénicos. Las capas someras (depósitos morrénicos, piroclásticos y laháticos) son altamente heterogéneas, y describen amplios grupos con características litológicas diferentes, por lo que es necesaria una caracterización más detallada de estas para una buena descripción de su potencial hidrogeológico. Algunos colores del mapa geológico han sido modificados ligeramente para facilitar la visualización.

Hidroquímica del área de estudio

En el informe de la DGA (2016) se constata que tanto las aguas superficiales como subterráneas corresponden a aguas frescas del tipo bicarbonatado intermedio, sin mucha variación entre ellas.

Piezometría

Se tienen valores de cota hidráulica en la zona, aunque su reducido número y alto rango temporal (1995-2012) impiden que se pueda realizar un análisis apropiado.

Marco Teórico

La composición inicial de las aguas, tanto superficiales como subterráneas, se origina en la lluvia. Durante su paso de vuelta hacia el océano, la composición es alterada por evaporación, aireación, y meteorización de roca. Durante esta última, diversos elementos son agregados al agua. Generalmente los elementos mayores encontrados en el agua corresponden a Na, K, Ca, Mg, Cl, HCO₃, SO₄. Estos elementos, y distintas cantidades de elementos menores y trazas, varían de acuerdo a la geología local.

Balance iónico

Se hace un balance iónico, para comprobar la precisión del análisis químico, dado que la solución acuática debe ser eléctricamente neutra. Entonces, la suma de los cationes y los aniones debe ser igual en unidad meq/L. Esta unidad se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{meq}{L} = \frac{\frac{mg}{L} * valencia}{Masa\ molecular}$$

El balance iónico (BI) se presenta usualmente como porcentaje, su fórmula es:

$$BI = \frac{\sum Cationes - \sum Aniones}{\sum Cationes + \sum Aniones} * 100$$

Hounslow (1995) recomienda sólo analizar datos si $|BI|$ es menor a 5% y adjudica que sea mayor a este valor a distintas razones:

- El análisis no es preciso
- Hay otros constituyentes presentes que no fueron usados para el cálculo de BI
- El agua es bastante ácida y los iones H⁺ no fueron considerados
- Hay iones orgánicos presentes en cantidades significativas (usualmente indicado por agua de color)

Custodio y Llamas (1976) ofrecen rangos de BI de acuerdo con la conductividad, ya que muestras con menores conductividades resultan en mayores valores de BI.

Tabla 5. BI admisible según conductividad eléctrica. Tomado de Custodio y Llamas (1976).

Conductividad eléctrica (µS/cm)	50	200	500	2000
BI admisible (%)	±30	±10	±8	±4

Deducción de roca fuente

Se puede utilizar para chequeo analítico o cuando no se conozca el origen del agua. Hounslow (1995) recomienda seguir una serie de pasos para esto, basado en razones entre los iones mayores y SiO₂ (Figura 4):

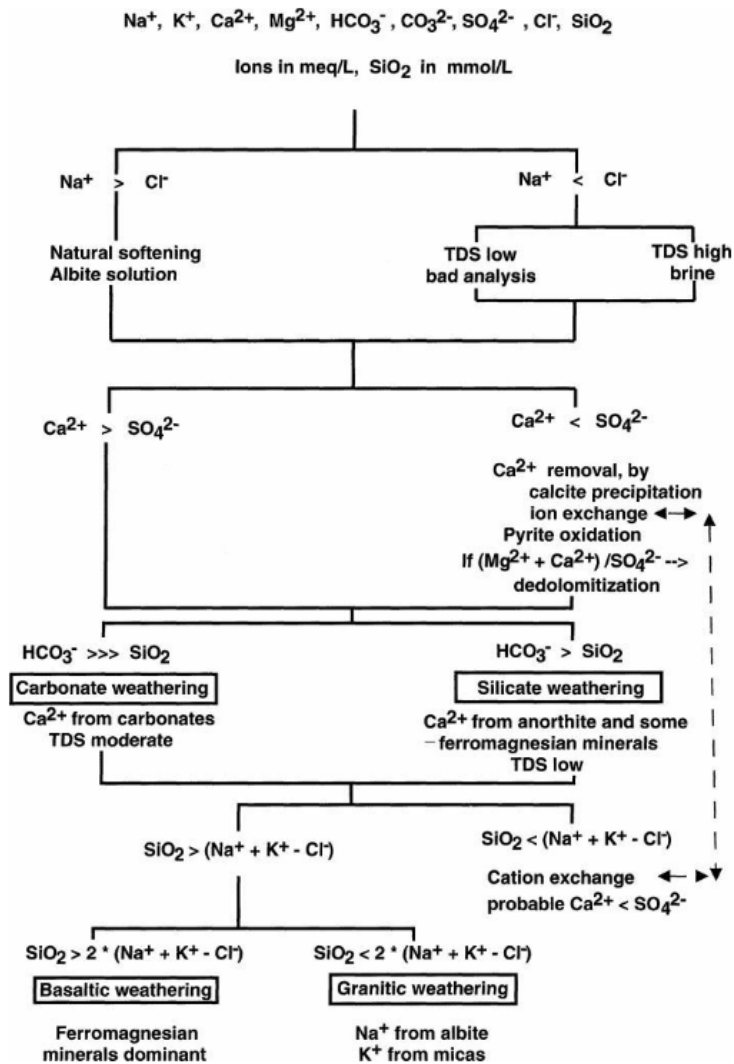


Figura 7. Diagrama de flujo describiendo los pasos a seguir para la deducción de roca fuente de los elementos disueltos en el agua.

Conversión de unidades

Los cationes y aniones mayores (Na, K, Ca, Mg, Cl, HCO_3 , SO_4 , en este caso) son convertidos a meq/L, y el SiO_2 es convertido a mmol/L. Esto para poder operar con los valores de una manera químicamente significativa.

Na y Cl

Se comparan los contenidos de Cl y Na. Se asume que la principal fuente de Cl es la disolución de halita o desde el océano a través de la lluvia. El Na puede venir de la halita, pero además de disolución de albite, plagioclasa o intercambio catiónico.

- Na = Cl indica disolución de halita
- Na < Cl indica intrusión marina o salmuera
- Na > Cl indica una fuente distinta a la alita, como puede ser albite u otro mineral

Una de estas reacciones es $Ca^{2+} + 2Na\text{-Arcilla} \rightarrow 2Na^+ + Ca\text{-Arcilla}$

Ca y SO₄

Se comparan los contenidos de Ca y SO₄. Se asume que el sulfato generalmente proviene de la disolución de yeso o la neutralización de aguas ácidas por calcita o dolomita. En esta última el Mg podría ser considerable.

- Ca = SO₄ indica yeso
- Ca < SO₄ indica oxidación de piritita, o remoción de Ca por precipitación
- Ca > SO₄ indica otra fuente además del yeso, ya sea calcita, dolomita o silicatos

Hay que considerar que el calcio también puede derivar de anortita y algunos minerales ferromagnesianos, por lo que hay que distinguir si la meteorización afecta principalmente a carbonatos o silicatos.

HCO₃ y SiO₂

Se comparan los contenidos HCO₃ y SiO₂. El HCO₃ se produce cuando CO₂ y agua reaccionan con distintos minerales en un proceso llamado hidrólisis ácida. Los carbonatos y la anortita se disuelven sin liberar sílice (de hecho, no se puede distinguir la fuente en este caso utilizando valores de HCO₃ y SiO₂), mientras que la albita libera cantidades considerables de sílice e iguales o menores de bicarbonato.

Se utilizan razones arbitrarias para indicar qué proceso prima sobre el otro:

- HCO₃/SiO₂ < 5 indica meteorización de silicatos
- HCO₃/SiO₂ > 10 indica meteorización de carbonatos

Valores intermedios indican una mezcla de ambos procesos, sin que se destaque uno.

SiO₂ y Na

Se comparan los contenidos de SiO₂ y sodio que no provenga de halita (Na + K – Cl). Se asume que, al sustraer el cloruro del sodio, entonces éste último viene de la meteorización de albita o intercambio iónico, y el potasio viene de la meteorización de biotita y en menor medida de feldespato potásico. Si hay otros minerales ferromagnesianos entonces habrá más SiO₂ que Na y K.

- SiO₂ < (Na + K – Cl) indica que el intercambio catiónico es la principal fuente del exceso de Na
- SiO₂ > (Na + K – Cl) indica que la meteorización de albita es probable. El producto puede ser caolinita o montmorillonita. La fuente más probable sería roca granítica.
- SiO₂ > 2(Na + K – Cl) indica que hay meteorización de minerales ferromagnesianos. Bajo estas condiciones la fuente del calcio podría ser anortita. En este caso, la fuente más probable sería roca basáltica.

Ca y Mg

Si la cantidad de Mg es mayor que la de Ca hay dos casos posibles:

- A 500 mg/L de sólidos totales disueltos (STD): hay intrusión marina
- A 100-200 mg/L STD: hay disolución de minerales ferromagnesianos

Na y K

Estos elementos se podrían producir en cantidades similares por la meteorización de rocas ígneas, pero el Na será mayor que el K, debido a que éste último es más fácil de quitar en solución por arcillas o plantas.

Na y Ca

Se constató (Drever y Hurcomb, 1986) que la razón Na/Ca en el agua es similar a la de la plagioclasa que ha sido meteorizada.

SiO₂

En las deducciones anteriores se asume que la sílice reportada en los análisis viene de meteorización de silicatos y no de disolución.

La solubilidad del SiO₂ desde el cuarzo es baja, pero podría ser considerable en el caso del gel de sílice. En varios casos (White, 1979; White et al., 1980 y Hearn et al., 1985), el alto contenido de sílice es atribuido a la influencia de vidrio volcánico, que puede comportarse como gel de sílice. Hounslow (1995) recomienda tener cuidado con el uso de datos de sílice cuando superen los 30 mg/L.

Métodos gráficos

Se utilizan para detectar tendencias en la química del agua y para graficar los análisis en un mapa, integrando la variable espacial dentro del análisis.

Diagrama de Piper

Se basa en el contenido químico disuelto en el agua. Típicamente, las aguas naturales contienen pocos componentes disueltos, con cationes (metales o bases) y aniones (radicales ácidos) en equilibrio.

Como se encuentra en equilibrio, la suma de los cationes debe igualar a la de los aniones en peso equivalente.

Este diagrama clasifica el agua en base a tres cationes y tres aniones, utilizando diagramas ternarios, uno para cada uno. Luego se combinan estos diagramas para graficar en un campo en forma de diamante, dentro del cual ciertas áreas determinan el tipo de agua, dependiendo dónde se grafican los datos (Ver Figura 5, izquierda).

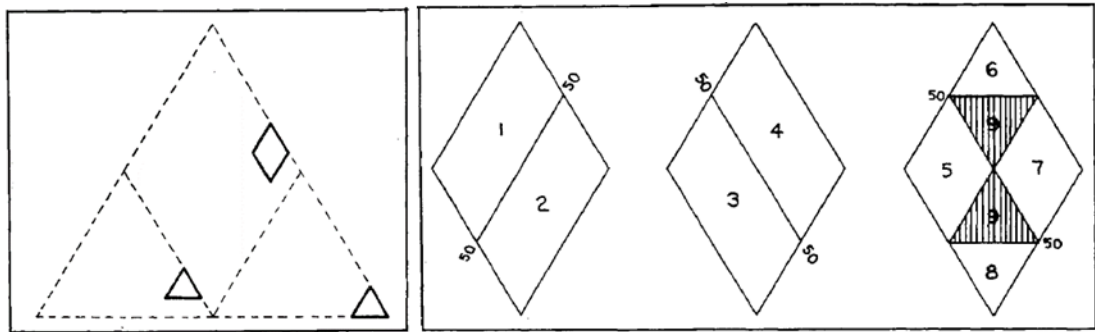


Figura 8. Izquierda: Forma de graficar en un diagrama Piper, con dos triángulos, de cationes y aniones respectivamente, y con el diamante central. Derecha: Clasificación de agua en un diagrama Piper, con los diferentes tipos de agua descritos por Piper (1944). Ambas imágenes fueron tomadas de Piper (1944).

Razones entre elementos

A veces es difícil sacar conclusiones en base a los valores absolutos de concentraciones, especialmente si se trata de aguas poco mineralizadas o de mezcla. Para compensar por estos efectos se recomienda utilizar razones entre distintos elementos.

Estas razones, utilizadas junto a reacciones químicas u otros datos, podrían ayudar a determinar los procesos más relevantes a nivel hidrogeoquímico.

Análisis estadístico

Se utilizaron algunas técnicas estadísticas para determinar las características poblacionales de las muestras tomadas.

Análisis de componentes principales

Es un procedimiento estadístico que permite transformar un set de variables posiblemente correlacionadas en otro de variables linealmente no correlacionadas. Se puede pensar como un ajuste de los datos a un elipsoide de n dimensiones, de manera que el primer eje contenga la mayor varianza, y los siguientes ejes (perpendiculares a este) contengan sucesivamente menor varianza hasta contener toda la varianza de los datos. Luego se seleccionan las nuevas variables que expliquen la mayoría de la varianza y que, al mismo tiempo, sean menores en número a las variables originales.

El análisis de componentes principales (ACP) permite explorar la relación entre varias variables y usar estas relaciones para crear nuevas variables tales que sean independientes unas de otras, las relaciones relativas entre variables se conservan y las relaciones geométricas entre las variables nuevas y las anteriores son constantes y fáciles de interpretar en una manera cualitativa (MacLeod, 2005).

Ley de Darcy

Se utiliza la ley de Darcy para describir los flujos subterráneos. El flujo, según Darcy, puede definirse con la siguiente ecuación:

$$Q = kAi$$

Donde Q representa el flujo en unidades de volumen por tiempo, k representa la permeabilidad, A es la sección transversal al flujo, e i es el gradiente hidráulico (Figura 9).

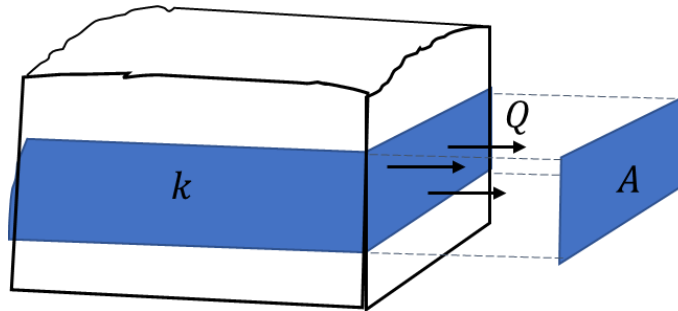


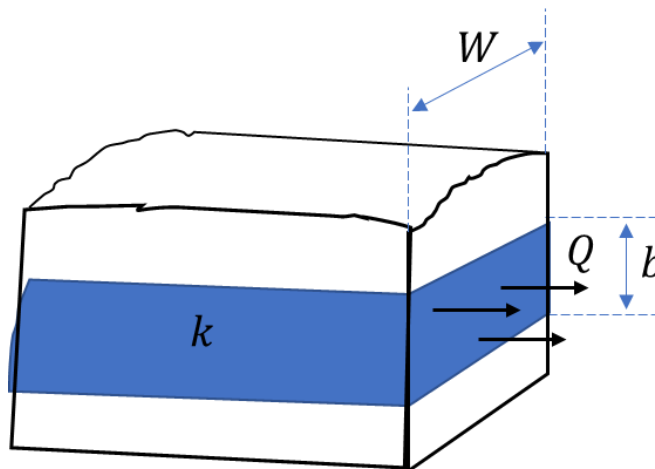
Figura 9. Representación gráfica del flujo representado por Darcy.

Si se modifica esta ecuación en función del largo y ancho del área A se tiene:

$$Q = kbWi$$

Donde b es el espesor saturado y W es el largo de la sección del área A . Integrando el concepto de transmisividad (T) en la ecuación, el cual corresponde a kb , se tiene lo siguiente (Figura 10):

$$Q = TWi$$



$$kb = T$$

Figura 10. Representación gráfica del flujo con la ecuación de Darcy en función de la transmisividad.

Resultados

Los resultados de los análisis fueron entregados por el laboratorio, y se encuentran en Anexos.

Primero se depura la base de datos. Se hizo eligiendo no analizar los elementos que presenten un 20% o más de datos bajo el nivel de detección. En la Tabla 6 se pueden ver los elementos con sus porcentajes de datos bajo el nivel de detección. Bajo este criterio no se considerarán los datos de Br, CO₃, Be, Cr, Cu, Se, Zr, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, W, Hg, Pb, U.

Tabla 6. Porcentaje de valores bajo el límite de detección (% Bajo LD) para cada elemento analizado por el laboratorio.

Elemento	% Bajo LD	Elemento	% Bajo LD
F- (mg/L)	2.86	Mn (ug/L)	5.71
Cl- (mg/L)	0.00	Co (ug/L)	22.86
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	0.00	Ni (ug/L)	5.71
Br- (mg/L)	100.00	Cu (ug/L)	71.43
NO ₃ ⁻ (mg/L)	42.86	Zn (ug/L)	0.00
PO ₄ ³⁻ (mg/L)	88.57	As (ug/L)	5.71
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	0.00	Se (ug/L)	100.00
CO ₃ ²⁻ (mg/L)	0.00	Rb (ug/L)	0.00
Na (mg/L)	0.00	Sr (ug/L)	0.00
K (mg/L)	0.00	Zr (ug/L)	100.00
Ca (mg/L)	0.00	Mo (ug/L)	40.00
Mg (mg/L)	0.00	Ag (ug/L)	100.00
SiO ₂ (mg/L)	0.00	Cd (ug/L)	97.14
Li (ug/L)	8.57	Sn (ug/L)	94.29
Be (ug/L)	100.00	Sb (ug/L)	88.57
B (ug/L)	0.00	Cs (ug/L)	14.29
Al (ug/L)	0.00	Ba (ug/L)	0.00
V (ug/L)	0.00	W (ug/L)	91.43
Cr (ug/L)	100.00	Hg (ug/L)	100.00
Fe (ug/L)	8.57	Pb (ug/L)	85.71
		U (ug/L)	40.00

Dado que el NO₃ y PO₄ son importantes desde el punto de vista de los procesos de eutrofización se comentará sobre los valores encontrados a pesar de tener más del 20% de sus datos bajo el límite de detección, aunque no se analizarán de la misma manera que los demás elementos que tienen menos de 20% de los datos bajo el nivel de detección.

Se constató la precisión de los análisis de laboratorio mediante balance iónico, y algunas comparaciones entre elementos. Los resultados de esto se ven en las Tablas 7 y 8.

Tabla 7. Valores de elementos mayores en las muestras en meq/L y el BI calculado en % para cada una.

Punto de muestreo	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na meq/L	K	Ca	Mg	BI %
1	0.10	0.02	0.41	0.20	0.03	0.22	0.14	4.09
2	0.03	0.02	0.38	0.15	0.02	0.22	0.13	9.50
3	0.04	0.05	0.39	0.16	0.03	0.22	0.12	5.31
4	0.01	0.05	0.13	0.09	0.01	0.12	0.05	19.45
5	0.08	0.18	0.40	0.31	0.04	0.21	0.16	3.65
6	0.03	0.01	0.82	0.24	0.04	0.34	0.28	2.67
7	0.03	0.02	0.37	0.13	0.02	0.23	0.10	7.03
8	0.04	0.05	0.45	0.17	0.02	0.29	0.14	6.12
9	0.08	0.04	0.45	0.21	0.02	0.26	0.14	4.44
10	0.03	0.01	0.20	0.07	0.01	0.12	0.07	5.02
11	0.09	0.01	0.46	0.24	0.03	0.28	0.16	10.83
12	0.09	0.01	0.65	0.27	0.03	0.30	0.21	4.17
13	0.09	0.01	0.84	0.26	0.05	0.44	0.29	4.39
14	0.05	0.01	0.58	0.18	0.03	0.29	0.18	4.24
15	0.14	0.01	0.50	0.26	0.03	0.26	0.15	3.05
16	0.05	0.01	0.40	0.15	0.02	0.22	0.12	6.20
17	0.05	0.02	0.92	0.27	0.04	0.45	0.30	3.34
18	0.03	0.02	0.72	0.22	0.03	0.36	0.23	3.90
19	0.06	0.02	1.20	0.37	0.04	0.53	0.41	2.60
20	0.08	0.02	1.46	0.32	0.07	0.78	0.45	1.97
21	0.04	0.15	0.50	0.21	0.02	0.32	0.17	2.26
22	0.04	0.01	0.74	0.25	0.04	0.30	0.27	4.36
23	0.23	0.49	1.06	0.48	0.06	0.59	0.25	-12.97
24	0.05	0.03	0.43	0.18	0.02	0.26	0.15	8.52
25	0.08	0.02	0.85	0.26	0.05	0.48	0.28	5.69
26	0.05	0.01	0.79	0.28	0.05	0.32	0.30	5.60
27	0.06	0.02	0.84	0.28	0.03	0.45	0.27	5.90
28	0.05	0.03	0.45	0.17	0.02	0.25	0.15	5.75
29	0.05	0.03	0.43	0.17	0.02	0.25	0.15	6.31
30	0.05	0.04	0.35	0.17	0.02	0.25	0.15	15.14
31	0.05	0.04	0.35	0.17	0.02	0.26	0.14	13.98
32	0.06	0.06	0.49	0.20	0.03	0.30	0.16	5.99
33	0.04	0.01	0.67	0.18	0.04	0.40	0.17	5.01
34	0.04	0.01	0.49	0.17	0.02	0.26	0.17	6.55
35	0.04	0.01	0.49	0.19	0.02	0.27	0.17	9.08

Tabla 8. Razones recomendadas por Hounslow (1995) para el chequeo de análisis de laboratorio. Los valores importantes muestran valores que sobrepasados indican un posible error de análisis o una característica especial de la muestra analizada.

Punto de muestreo	$\frac{K}{Na + K}$	$\frac{Mg}{Ca + Mg}$	$\frac{Ca}{Ca + SO_4}$	$\frac{Na}{Na + Cl}$
	%			
1	11.05	38.31	90.07	66.25
2	13.33	37.68	92.25	82.64
3	14.39	35.59	82.27	81.66
4	12.40	29.47	71.69	88.28
5	11.20	43.59	53.03	78.84
6	15.11	45.52	98.59	90.19
7	14.38	29.25	91.25	82.27
8	10.13	32.13	84.50	79.74
9	9.98	34.79	86.44	71.26
10	10.38	35.43	89.92	74.00
11	9.83	35.69	96.99	71.78
12	9.59	41.41	97.92	75.05
13	15.56	39.73	98.52	73.77
14	14.50	38.43	97.75	79.88
15	9.51	36.27	97.35	65.06
16	12.80	36.38	97.15	77.34
17	12.92	39.86	96.10	85.90
18	12.19	38.42	95.51	86.79
19	9.96	43.28	96.30	86.82
20	18.81	36.73	97.07	79.84
21	7.37	34.26	68.61	84.77
22	13.25	47.17	95.90	86.57
23	10.39	29.49	54.53	67.61
24	12.10	36.01	89.59	77.44
25	15.18	37.02	96.81	76.84
26	14.94	48.38	95.69	86.22
27	10.64	37.32	96.34	83.07
28	12.03	37.73	89.08	77.23
29	11.79	37.41	88.57	77.19
30	11.88	36.98	86.17	77.23
31	11.28	35.70	86.78	77.37
32	11.98	34.84	84.00	76.34
33	18.80	29.31	98.25	82.41
34	10.51	39.99	96.29	82.72
35	10.28	38.61	95.95	81.56
Valores importantes	>20%	>40%	<50%	<50%

El balance iónico es alto en algunos casos, pero según Custodio y Llamas (1976) hay rangos de errores admisibles dependiendo de la conductividad eléctrica. Se pueden ver en la Figura 7 (Se han convertido en positivo todos los valores de BI).

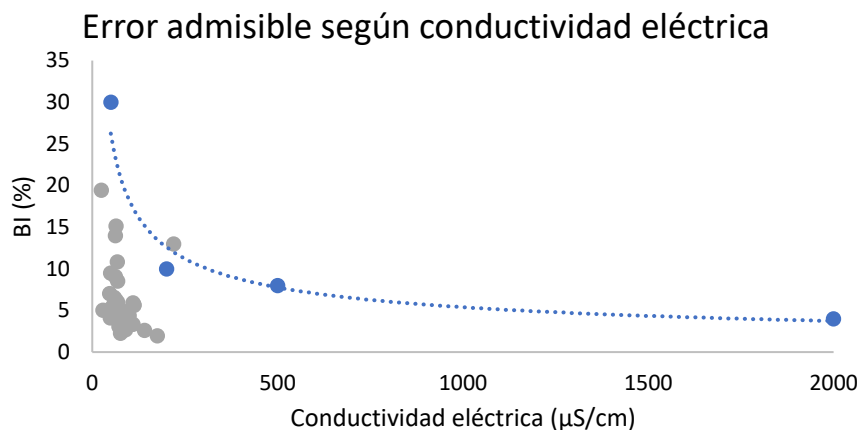


Figura 11. Error admisible según conductividad eléctrica, de acuerdo con Custodio y Llamas (1976).

Razones de elementos

Se compararon distintas razones y valores de elementos de acuerdo con el procedimiento recomendado por Hounslow (1995).

SiO₂

Un valor sobre 0.5 mmol/L indica presencia de vidrio volcánico, el cual contiene gel de sílice, que libera SiO₂ al agua a temperaturas más bajas que el cuarzo.

Tabla 9. Valores de SiO₂ por cada muestra.

Punto de muestreo	SiO ₂ mmol/L	Punto de muestreo	SiO ₂ mmol/L
1	0.52	19	0.77
2	0.67	20	1.20
3	0.48	21	0.48
4	0.52	22	0.85
5	0.50	23	0.75
6	0.68	24	0.40
7	0.35	25	0.78
8	0.43	26	0.88
9	0.47	27	0.77
10	0.33	28	0.37
11	0.67	29	0.38
12	0.63	30	0.35
13	0.93	31	0.38
14	0.70	32	0.35
15	0.67	33	0.83
16	0.60	34	0.58
17	0.78	35	0.55
18	0.67		

HCO₃ y SiO₂

La razón $\frac{HCO_3^-}{SiO_2}$ muestra si hay mayor meteorización de silicatos o carbonatos. Bajo 5, implica meteorización de silicatos, sobre 10 de carbonatos, y entre estos valores es ambigua. Sin embargo, hay que tener cuidado con estos valores ya que no consideran que haya vidrio volcánico, sino sólo silicatos, por lo que se necesita comparar con más datos para sacar una conclusión acertada. Valores sobre 30 mg/L para la sílice requieren mayor atención.

Tabla 10. Valores de la razón HCO₃/SiO₂ por cada muestra. Calculado en las unidades que se muestran.

Punto de muestreo	SiO ₂	HCO ₃ ⁻	$\frac{HCO_3^-}{SiO_2}$	Punto de muestreo	SiO ₂	HCO ₃ ⁻	$\frac{HCO_3^-}{SiO_2}$
	mmol/L	meq/L			mmol/L	meq/L	
1	0.52	0.41	0.79	19	0.77	1.20	1.57
2	0.67	0.38	0.57	20	1.20	1.46	1.22
3	0.48	0.39	0.80	21	0.48	0.50	1.03
4	0.52	0.13	0.24	22	0.85	0.74	0.87
5	0.50	0.40	0.80	23	0.75	1.06	1.41
6	0.68	0.82	1.20	24	0.40	0.43	1.08
7	0.35	0.37	1.05	25	0.78	0.85	1.09
8	0.43	0.45	1.03	26	0.88	0.79	0.90
9	0.47	0.45	0.97	27	0.77	0.84	1.10
10	0.33	0.20	0.62	28	0.37	0.45	1.22
11	0.67	0.46	0.69	29	0.38	0.43	1.12
12	0.63	0.65	1.02	30	0.35	0.35	0.99
13	0.93	0.84	0.90	31	0.38	0.35	0.92
14	0.70	0.58	0.83	32	0.35	0.49	1.39
15	0.67	0.50	0.75	33	0.83	0.67	0.80
16	0.60	0.40	0.67	34	0.58	0.49	0.86
17	0.78	0.92	1.18	35	0.55	0.49	0.89
18	0.67	0.72	1.08				

La razón es bastante baja para todas las muestras, por lo que se concluye que hay una mayor meteorización de silicatos o de vidrio volcánico en el área de estudio.

SiO₂ y Na

La razón entre la sílice y el Na que no proviene de halita indica si hay mayor presencia de albita o de silicatos ferromagnesianos como fuente del Na.

Tabla 11. Valores de la razón $SiO_2/(Na+K-Cl)$, calculado en las unidades que se muestran.

Punto de muestreo	SiO ₂	Na	K	Cl	$\frac{SiO_2}{Na^+ + K^+ - Cl^-}$
	mmol/L	meq/L	meq/L	meq/L	
1	0.52	0.20	0.03	0.10	4.16
2	0.67	0.15	0.02	0.03	4.71
3	0.48	0.16	0.03	0.04	3.29
4	0.52	0.09	0.01	0.01	5.89
5	0.50	0.31	0.04	0.08	1.86
6	0.68	0.24	0.04	0.03	2.72
7	0.35	0.13	0.02	0.03	2.87
8	0.43	0.17	0.02	0.04	2.98
9	0.47	0.21	0.02	0.08	3.19
10	0.33	0.07	0.01	0.03	5.82
11	0.67	0.24	0.03	0.09	3.93
12	0.63	0.27	0.03	0.09	3.01
13	0.93	0.26	0.05	0.09	4.35
14	0.70	0.18	0.03	0.05	4.18
15	0.67	0.26	0.03	0.14	4.54
16	0.60	0.15	0.02	0.05	4.62
17	0.78	0.27	0.04	0.05	2.91
18	0.67	0.22	0.03	0.03	3.14
19	0.77	0.37	0.04	0.06	2.18
20	1.20	0.32	0.07	0.08	3.87
21	0.48	0.21	0.02	0.04	2.60
22	0.85	0.25	0.04	0.04	3.38
23	0.75	0.48	0.06	0.23	2.46
24	0.40	0.18	0.02	0.05	2.68
25	0.78	0.26	0.05	0.08	3.45
26	0.88	0.28	0.05	0.05	3.10
27	0.77	0.28	0.03	0.06	2.96
28	0.37	0.17	0.02	0.05	2.60
29	0.38	0.17	0.02	0.05	2.77
30	0.35	0.17	0.02	0.05	2.49
31	0.38	0.17	0.02	0.05	2.78
32	0.35	0.20	0.03	0.06	2.14
33	0.83	0.18	0.04	0.04	4.59
34	0.58	0.17	0.02	0.04	3.73
35	0.55	0.19	0.02	0.04	3.27

Si es mayor a 2 se tiene que hay mayor meteorización de basaltos, con silicatos ferromagnesianos dominantes, si es mayor a 1 hay mayor meteorización de granitos, con el Na⁺ de la Albita y el K⁺ de micas.

Para concluir si el proceso principal corresponde a meteorización de silicatos ferromagnesianos, hay que comparar los datos con el Mg también. Pero con estos datos se puede decir que aparte de albita podría haber un aporte de minerales ferromagnesianos.

Na, K, Cl y Ca

La razón $\frac{Na^+ + K^+ - Cl^-}{Na^+ + K^+ - Cl^- + Ca^{2+}}$ se usa para determinar si es posible la meteorización de plagioclasa. Para que sea posible esta razón debe encontrarse entre 0.2 y 0.8.

Tabla 12. Valores de $(Na+K-Cl)/(Na+K-Cl+Ca)$ por cada muestra. Calculados en las unidades mostradas.

Punto de muestreo	Na meq/L	K meq/L	Cl meq/L	Ca meq/L	$\frac{Na^+ + K^+ - Cl^-}{Na^+ + K^+ - Cl^- + Ca^{2+}}$
1	0.20	0.03	0.10	0.22	0.36
2	0.15	0.02	0.03	0.22	0.40
3	0.16	0.03	0.04	0.22	0.40
4	0.09	0.01	0.01	0.12	0.42
5	0.31	0.04	0.08	0.21	0.57
6	0.24	0.04	0.03	0.34	0.43
7	0.13	0.02	0.03	0.23	0.34
8	0.17	0.02	0.04	0.29	0.34
9	0.21	0.02	0.08	0.26	0.36
10	0.07	0.01	0.03	0.12	0.32
11	0.24	0.03	0.09	0.28	0.38
12	0.27	0.03	0.09	0.30	0.41
13	0.26	0.05	0.09	0.44	0.33
14	0.18	0.03	0.05	0.29	0.36
15	0.26	0.03	0.14	0.26	0.37
16	0.15	0.02	0.05	0.22	0.38
17	0.27	0.04	0.05	0.45	0.38
18	0.22	0.03	0.03	0.36	0.37
19	0.37	0.04	0.06	0.53	0.40
20	0.32	0.07	0.08	0.78	0.28
21	0.21	0.02	0.04	0.32	0.37
22	0.25	0.04	0.04	0.30	0.45
23	0.48	0.06	0.23	0.59	0.34
24	0.18	0.02	0.05	0.26	0.36
25	0.26	0.05	0.08	0.48	0.32
26	0.28	0.05	0.05	0.32	0.47
27	0.28	0.03	0.06	0.45	0.37
28	0.17	0.02	0.05	0.25	0.36
29	0.17	0.02	0.05	0.25	0.36
30	0.17	0.02	0.05	0.25	0.36
31	0.17	0.02	0.05	0.26	0.35
32	0.20	0.03	0.06	0.30	0.36
33	0.18	0.04	0.04	0.40	0.31
34	0.17	0.02	0.04	0.26	0.38
35	0.19	0.02	0.04	0.27	0.38

Todos los datos se encuentran dentro del rango en el que la meteorización de plagioclasa es posible.

Na y Cl

Se compara la razón $\frac{Na^+}{Na^+ + Cl^-}$ con ciertos valores que indican el proceso esperado. Si el valor es mayor a 0.5 indica que hay más fuentes que la halita para el Na.

Tabla 13. Valores de la razón Na/(Na+Cl) por cada muestra. Calculados en las unidades que se muestran.

Punto de muestreo	Na meq/L	Cl- meq/L	$\frac{Na^+}{Na^+ + Cl^-}$	Punto de muestreo	Na meq/L	Cl- meq/L	$\frac{Na^+}{Na^+ + Cl^-}$
1	0.20	0.10	0.66	19	0.37	0.06	0.87
2	0.15	0.03	0.83	20	0.32	0.08	0.80
3	0.16	0.04	0.82	21	0.21	0.04	0.85
4	0.09	0.01	0.88	22	0.25	0.04	0.87
5	0.31	0.08	0.79	23	0.48	0.23	0.68
6	0.24	0.03	0.90	24	0.18	0.05	0.77
7	0.13	0.03	0.82	25	0.26	0.08	0.77
8	0.17	0.04	0.80	26	0.28	0.05	0.86
9	0.21	0.08	0.71	27	0.28	0.06	0.83
10	0.07	0.03	0.74	28	0.17	0.05	0.77
11	0.24	0.09	0.72	29	0.17	0.05	0.77
12	0.27	0.09	0.75	30	0.17	0.05	0.77
13	0.26	0.09	0.74	31	0.17	0.05	0.77
14	0.18	0.05	0.80	32	0.20	0.06	0.76
15	0.26	0.14	0.65	33	0.18	0.04	0.82
16	0.15	0.05	0.77	34	0.17	0.04	0.83
17	0.27	0.05	0.86	35	0.19	0.04	0.82
18	0.22	0.03	0.87				

Como era de esperarse los valores indican más fuentes del Na que la halita.

Mg y Ca

En el caso de la meteorización de silicatos, la razón $\frac{Mg^{2+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$ se puede utilizar para determinar si hay mayor meteorización de minerales ferromagnesianos o de minerales graníticos. El punto de división entre estos es mayor a 0.5 para los primeros y menor a 0.5 para los segundos.

Tabla 14. Valores de la razón $Mg/(Ca+Mg)$ por cada muestra. Calculados en las unidades que se muestran.

Punto de muestreo	Ca	Mg	$\frac{Mg^{2+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$	Punto de muestreo	Ca	Mg	$\frac{Mg^{2+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$
	meq/L				meq/L		
1	0.22	0.14	0.38	19	0.53	0.41	0.43
2	0.22	0.13	0.38	20	0.78	0.45	0.37
3	0.22	0.12	0.36	21	0.32	0.17	0.34
4	0.12	0.05	0.30	22	0.30	0.27	0.47
5	0.21	0.16	0.44	23	0.59	0.25	0.30
6	0.34	0.28	0.46	24	0.26	0.15	0.36
7	0.23	0.10	0.29	25	0.48	0.28	0.37
8	0.29	0.14	0.32	26	0.32	0.30	0.48
9	0.26	0.14	0.35	27	0.45	0.27	0.37
10	0.12	0.07	0.35	28	0.25	0.15	0.38
11	0.28	0.16	0.36	29	0.25	0.15	0.37
12	0.30	0.21	0.41	30	0.25	0.15	0.37
13	0.44	0.29	0.40	31	0.26	0.14	0.36
14	0.29	0.18	0.38	32	0.30	0.16	0.35
15	0.26	0.15	0.36	33	0.40	0.17	0.29
16	0.22	0.12	0.36	34	0.26	0.17	0.40
17	0.45	0.30	0.40	35	0.27	0.17	0.39
18	0.36	0.23	0.38				

Los datos indican que hay presencia de minerales ferromagnesianos, pero no alcanzan a superar el aporte de minerales graníticos. De todas formas, no hay que descartar la presencia de anortita que podría aumentar el Ca. Se deduce de la razón $\frac{HCO_3^-}{SiO_2}$ que la meteorización es principalmente de silicatos, pero los altos valores de SiO_2 indican que hay vidrio volcánico que afecta esta razón, por lo que no se puede concluir con seguridad sobre la anortita.

Ca y SO_4

La razón $\frac{Ca^{2+}}{Ca^{2+} + SO_4^{2-}}$ se puede utilizar para determinar el proceso principal en el origen del Ca. Valores sobre 0.5 indican una fuente de silicatos o carbonatos, mientras que valores bajo 0.5 pueden indicar disolución de yeso, precipitación de calcita, u oxidación de pirita.

Tabla 15. Valores de la razón $Ca/(Ca+SO_4)$ por cada muestra. Calculados en las unidades que se muestran.

Punto de muestreo	Ca meq/L	SO ₄ ²⁻ meq/L	$\frac{Ca^{2+}}{Ca^{2+} + SO_4^{2-}}$	Punto de muestreo	Ca meq/L	SO ₄ ²⁻ meq/L	$\frac{Ca^{2+}}{Ca^{2+} + SO_4^{2-}}$
1	0.22	0.02	0.90	19	0.53	0.02	0.96
2	0.22	0.02	0.92	20	0.78	0.02	0.97
3	0.22	0.05	0.82	21	0.32	0.15	0.69
4	0.12	0.05	0.72	22	0.30	0.01	0.96
5	0.21	0.18	0.53	23	0.59	0.49	0.55
6	0.34	0.01	0.99	24	0.26	0.03	0.90
7	0.23	0.02	0.91	25	0.48	0.02	0.97
8	0.29	0.05	0.85	26	0.32	0.01	0.96
9	0.26	0.04	0.86	27	0.45	0.02	0.96
10	0.12	0.01	0.90	28	0.25	0.03	0.89
11	0.28	0.01	0.97	29	0.25	0.03	0.89
12	0.30	0.01	0.98	30	0.25	0.04	0.86
13	0.44	0.01	0.99	31	0.26	0.04	0.87
14	0.29	0.01	0.98	32	0.30	0.06	0.84
15	0.26	0.01	0.97	33	0.40	0.01	0.98
16	0.22	0.01	0.97	34	0.26	0.01	0.96
17	0.45	0.02	0.96	35	0.27	0.01	0.96
18	0.36	0.02	0.96				

Todos los valores se encuentran sobre 0.5, y sólo uno es cercano a 0.5. Las fuentes de Ca de la zona de estudio son distintas al yeso.

Cl, SO₄ y HCO₃

Se compara la cantidad de Cl y la de HCO₃ con la suma de los demás aniones. En el caso del Cl es para determinar si el agua está más relacionada al agua de lluvia o la de meteorización de roca, es decir, puede ser un indicador de qué tan madura es el agua; cuántos procesos han ocurrido desde que ha sido evaporada del mar. En el caso del HCO₃ es para ver si la meteorización producida es de silicatos o carbonatos, de disolución de yeso o intrusión marina. En ambos casos el valor que separa aguas de una u otra condición es 0.8.

Tabla 16. Valores de las razones $Cl/(suma\ aniones)$ y $HCO_3/(suma\ aniones)$ por cada muestra. Calculados en las unidades que se muestran.

Punto de muestreo	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	$\frac{Cl^-}{suma\ aniones}$	$\frac{HCO_3^-}{suma\ aniones}$
	meq/L	meq/L	meq/L		
1	0.10	0.02	0.41	0.19	0.76
2	0.03	0.02	0.38	0.07	0.88
3	0.04	0.05	0.39	0.08	0.83
4	0.01	0.05	0.13	0.06	0.67
5	0.08	0.18	0.40	0.13	0.60
6	0.03	0.01	0.82	0.03	0.96
7	0.03	0.02	0.37	0.07	0.88
8	0.04	0.05	0.45	0.08	0.82
9	0.08	0.04	0.45	0.15	0.78
10	0.03	0.01	0.20	0.11	0.84
11	0.09	0.01	0.46	0.17	0.82
12	0.09	0.01	0.65	0.12	0.87
13	0.09	0.01	0.84	0.10	0.90
14	0.05	0.01	0.58	0.07	0.92
15	0.14	0.01	0.50	0.22	0.77
16	0.05	0.01	0.40	0.10	0.89
17	0.05	0.02	0.92	0.05	0.94
18	0.03	0.02	0.72	0.04	0.94
19	0.06	0.02	1.20	0.04	0.94
20	0.08	0.02	1.46	0.05	0.93
21	0.04	0.15	0.50	0.05	0.73
22	0.04	0.01	0.74	0.05	0.93
23	0.23	0.49	1.06	0.13	0.60
24	0.05	0.03	0.43	0.10	0.84
25	0.08	0.02	0.85	0.08	0.90
26	0.05	0.01	0.79	0.05	0.93
27	0.06	0.02	0.84	0.06	0.92
28	0.05	0.03	0.45	0.09	0.85
29	0.05	0.03	0.43	0.10	0.84
30	0.05	0.04	0.35	0.11	0.79
31	0.05	0.04	0.35	0.11	0.80
32	0.06	0.06	0.49	0.10	0.81
33	0.04	0.01	0.67	0.05	0.94
34	0.04	0.01	0.49	0.07	0.92
35	0.04	0.01	0.49	0.08	0.90

La razón entre Cl y la suma de aniones inferior a 0.8 indica que el principal proceso es la meteorización de roca. Un valor mayor a 0.8 indica intrusión marina o agua de lluvia, dependiendo del contenido de sólidos disueltos totales.

La razón entre el HCO_3 y la suma de aniones mayor a 0.8 indica meteorización de silicato o carbonatos. Una razón inferior podría indicar disolución de yeso o intrusión marina pero estos procesos no pueden ocurrir en la zona de estudio, por lo que una explicación a esto es un aumento relativo en la concentración de SO_4 o de Cl .

Análisis estadístico de elementos

Matriz de correlación

Se hizo una matriz de correlación para comparar los elementos.

Tabla 17. Matriz de correlación con datos seleccionados. Se muestran sólo los datos que arrojan correlaciones significativas y con más de una correlación con otros elementos.

	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SiO ₂	B	V	Ni	Zn	As	Sr	NO ₃ ⁻
F ⁻	1															
Cl ⁻	0.53	1														
SO ₄ ²⁻	0.65	0.67	1													
HCO ₃ ⁻	0.40	0.35	0.16	1												
Na ⁺	0.69	0.72	0.55	0.79	1											
K ⁺	0.44	0.43	0.24	0.89	0.78	1										
Ca ²⁺	0.34	0.41	0.26	0.95	0.75	0.86	1									
Mg ²⁺	0.35	0.21	0.01	0.96	0.74	0.86	0.88	1								
SiO ₂	0.18	0.25	-0.03	0.82	0.60	0.84	0.76	0.81	1							
B	0.76	0.75	0.96	0.31	0.67	0.39	0.37	0.16	0.11	1						
V	0.51	0.32	0.17	0.79	0.69	0.68	0.71	0.75	0.69	0.34	1					
Ni	0.13	0.21	0.01	0.81	0.58	0.77	0.83	0.78	0.76	0.10	0.49	1				
Zn	0.01	-0.07	-0.15	0.23	0.16	0.28	0.19	0.31	0.27	-0.09	0.10	0.24	1			
As	0.78	0.74	0.85	0.43	0.70	0.45	0.47	0.27	0.27	0.94	0.54	0.18	0.01	1		
Sr	0.12	0.41	0.19	0.84	0.63	0.79	0.90	0.78	0.69	0.26	0.43	0.79	0.20	0.29	1	
NO ₃ ⁻	-0.05	0.11	-0.16	0.39	0.24	0.43	0.41	0.41	0.45	-0.09	0.23	0.37	0.74	0.01	0.45	1

Se pueden ver distintos grupos de correlaciones:

- HCO₃, SiO₂, Na, Mg, Ca, K, V, Ni, Sr. Este grupo de variables puede relacionarse a la interacción del agua con la geología local y los distintos aportes, reflejan la interacción con los diferentes minerales de las rocas. El contenido en SiO₂ por ejemplo se asocia a la presencia de minerales de silicatos. Mientras que la presencia de V, Ni y Sr puede asociarse a las rocas andesíticas presentes en la zona.
- SO₄, F, Cl, Na, B, As. Esta asociación podría estar relacionada con las litologías y la presencia activa del volcán Villarrica cuyos gases liberados por el volcán Villarrica contienen SO₂, HF, HCl (Shinohara y Witter, 2005; Swayer et al., 2011). Sin embargo, estos mismos elementos pueden también estar asociados a las actividades antrópicas, utilizándose en fertilizantes, como el sulfato de amonio en el caso del sulfato, o el bórax o ácido bórico, en el caso del boro. Los fertilizantes fosfatados también pueden ser una fuente de F y As (Gray, 2018; Campos, 2002).
- Zn, NO₃. La correlación entre estas dos variables es relativamente alta a pesar de la alta cantidad (40%) de valores de NO₃ bajo el límite de detección. Ambos elementos son típicamente empleados en productos de uso agrícola.

Para profundizar más en las relaciones entre los datos se hará un Análisis de Componentes Principales considerando los elementos químicos relevantes y los parámetros medidos en terreno.

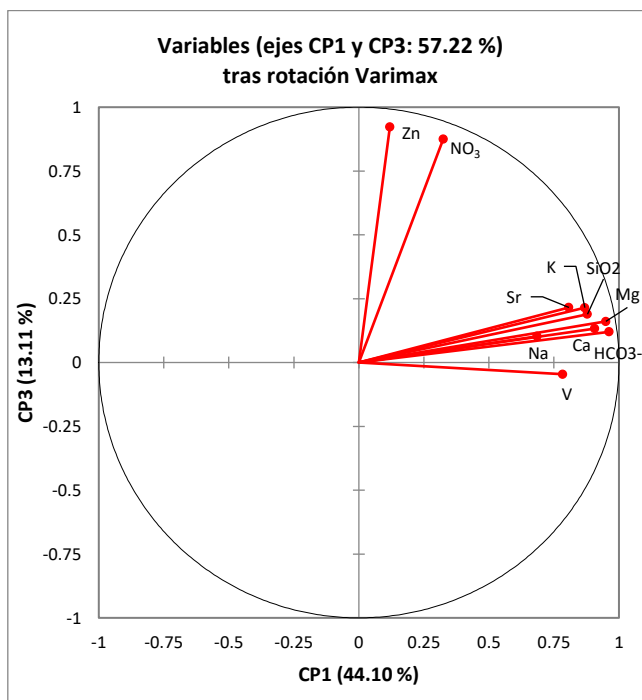
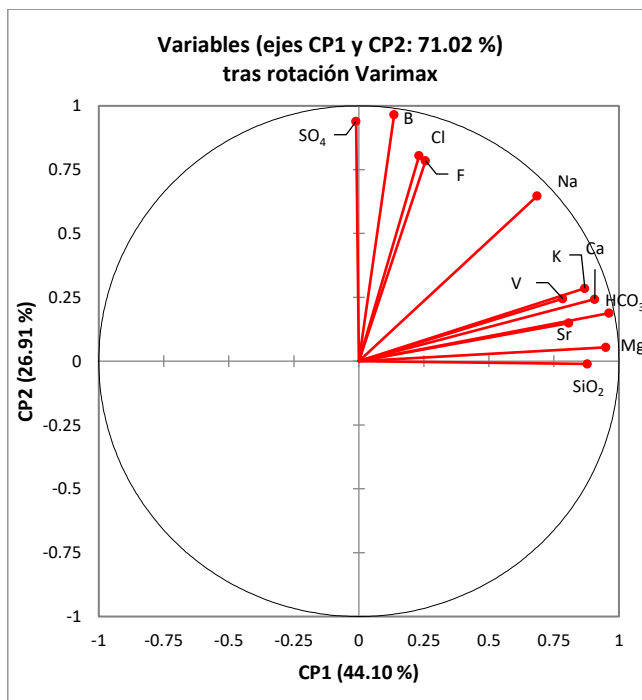
Análisis de Componentes Principales (ACP)

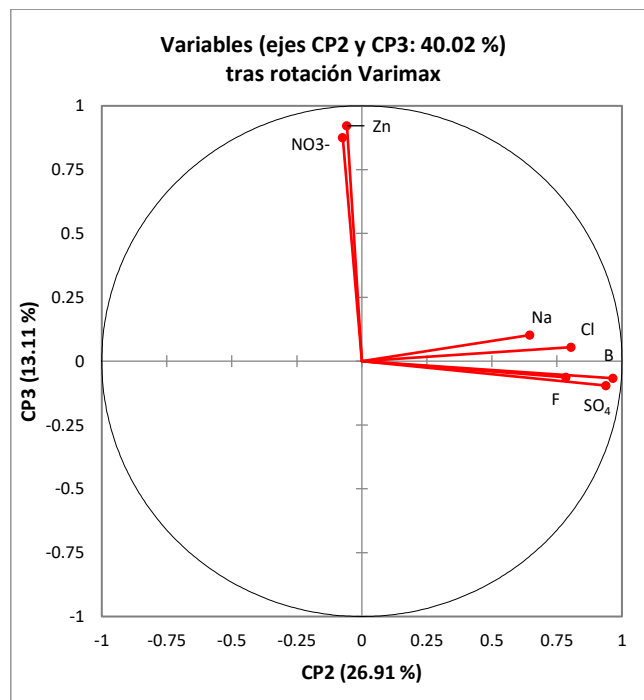
Se hizo un ACP con los elementos químicos más significativos, es decir, que fueran al menos 0.1% de la muestra utilizando XLSTAT 2018. Luego se aplicó una rotación Varimax a los factores para poder observar mejor las relaciones más significativas.

Se hizo el análisis considerando que los componentes principales calculados alcanzaran cada uno por lo menos un 10% de la varianza total.

Tabla 18. Porcentaje de la varianza y factor loadings tras la rotación Varimax de los componentes principales (CP).

	CP1	CP2	CP3
Variabilidad (%)	44.10	26.91	13.11
% acumulado	44.10	71.02	84.13
F-	0.26	0.79	-0.06
Cl-	0.23	0.81	0.05
SO42-	-0.01	0.94	-0.10
HCO3-	0.96	0.19	0.12
Na	0.69	0.65	0.10
K	0.87	0.29	0.21
Ca	0.91	0.24	0.13
Mg	0.95	0.05	0.16
SiO2	0.88	-0.01	0.19
B	0.14	0.97	-0.07
V	0.78	0.24	-0.05
Zn	0.12	-0.06	0.92
Sr	0.80	0.15	0.22
NO3-	0.32	-0.07	0.88





Este análisis multivariante ha confirmado las correlaciones determinadas en la matriz de correlación, agrupadas en diferentes componentes cuyos pesos son diferentes indicando así la importancia relativa de cada uno y, así de los procesos fisicoquímicos que se asocian a cada uno de los componentes principales determinados.

Los elementos que saturan cada componente son:

- CP1: HCO₃, Mg, Ca, SiO₂, K, V, Sr.
- CP2: SO₄, B, Cl, F.
- CP3: Zn, NO₃.

Se puede ver que el Na participa de manera significativa en los componentes CP1 y CP2.

Si se realizan los análisis para las muestras subterráneas y superficiales por separado se tienen componentes muy similares (Tabla 19). Este hecho indica la estrecha relación entre los dos grupos de aguas, así como que los procesos que originan la composición química son comunes.

Tabla 19. Porcentaje de la varianza y factor loadings tras la rotación Varimax de los componentes principales (CP) calculados con datos de agua superficial y de agua subterránea por separado.

Superficial	CP1	CP2	CP3	Subterránea	CP1	CP2	CP3
Variabilidad (%)	38.84	22.47	18.33	Variabilidad (%)	37.35	32.02	14.79
% acumulado	38.84	61.31	79.64	% acumulado	37.35	69.37	84.15
F ⁻	0.06	0.82	-0.16	F ⁻	0.23	0.76	-0.32
Cl ⁻	0.33	0.37	0.44	Cl ⁻	0.22	0.97	0.05
SO ₄ ²⁻	-0.23	0.91	-0.20	SO ₄ ²⁻	-0.12	0.96	-0.09
HCO ₃ ⁻	0.97	-0.03	0.19	HCO ₃ ⁻	0.95	0.22	-0.13
Na	0.66	0.57	0.31	Na	0.46	0.81	-0.18
K	0.82	0.42	0.22	K	0.88	0.27	0.16
Ca	0.90	-0.06	0.27	Ca	0.85	0.33	0.03
Mg	0.96	0.06	0.16	Mg	0.92	-0.09	-0.10
SiO ₂	0.63	-0.12	0.52	SiO ₂	0.88	-0.15	0.05
B	0.02	0.95	0.01	B	0.02	0.98	-0.13
V	0.34	0.06	0.78	V	0.61	0.21	-0.57
Zn	-0.03	-0.22	0.56	Zn	-0.05	-0.16	0.78
Sr	0.95	-0.15	0.01	Sr	0.68	0.28	0.40
NO ₃ ⁻	0.24	-0.10	0.91	NO ₃ ⁻	0.21	-0.12	0.87

Análisis espacial de componentes principales

Los valores de puntuación de componentes para cada punto de muestreo son graficados en ArcMap. Se agruparon los valores por intervalo de cuartil.

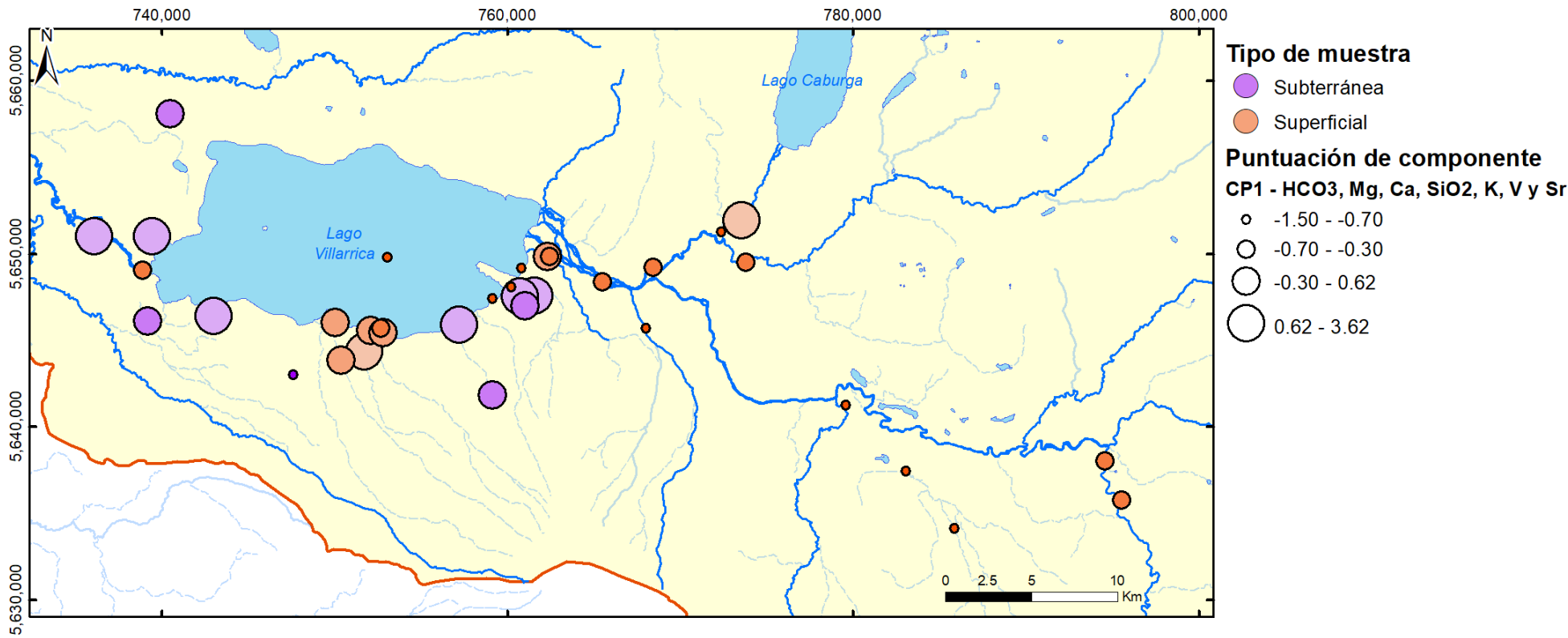


Figura 12. Mapa de factor scores para el primer componente principal (CP1). Los valores de puntuación de componente corresponden a los rangos de cada cuartil.

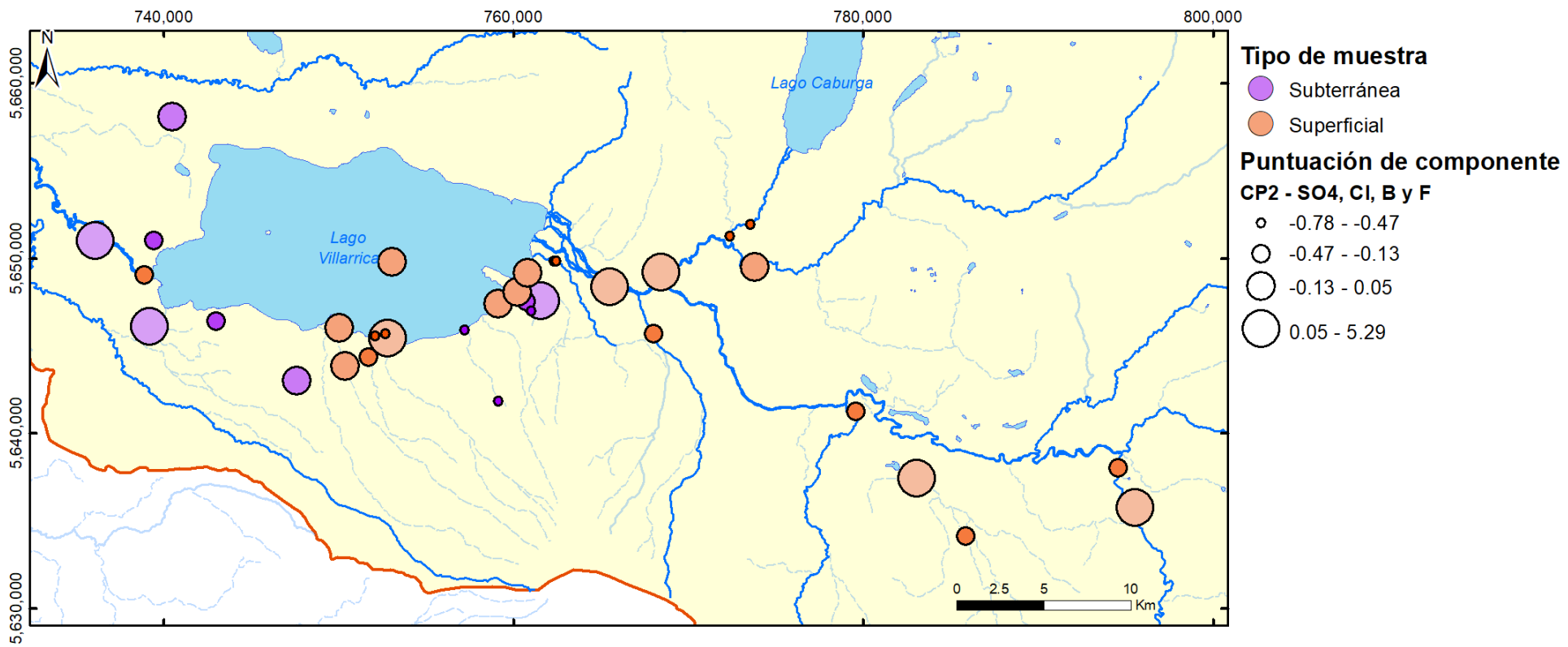


Figura 13. Mapa de factor scores para el segundo componente principal (CP2). Los valores de puntuación de componente corresponden a los rangos de cada cuartil.

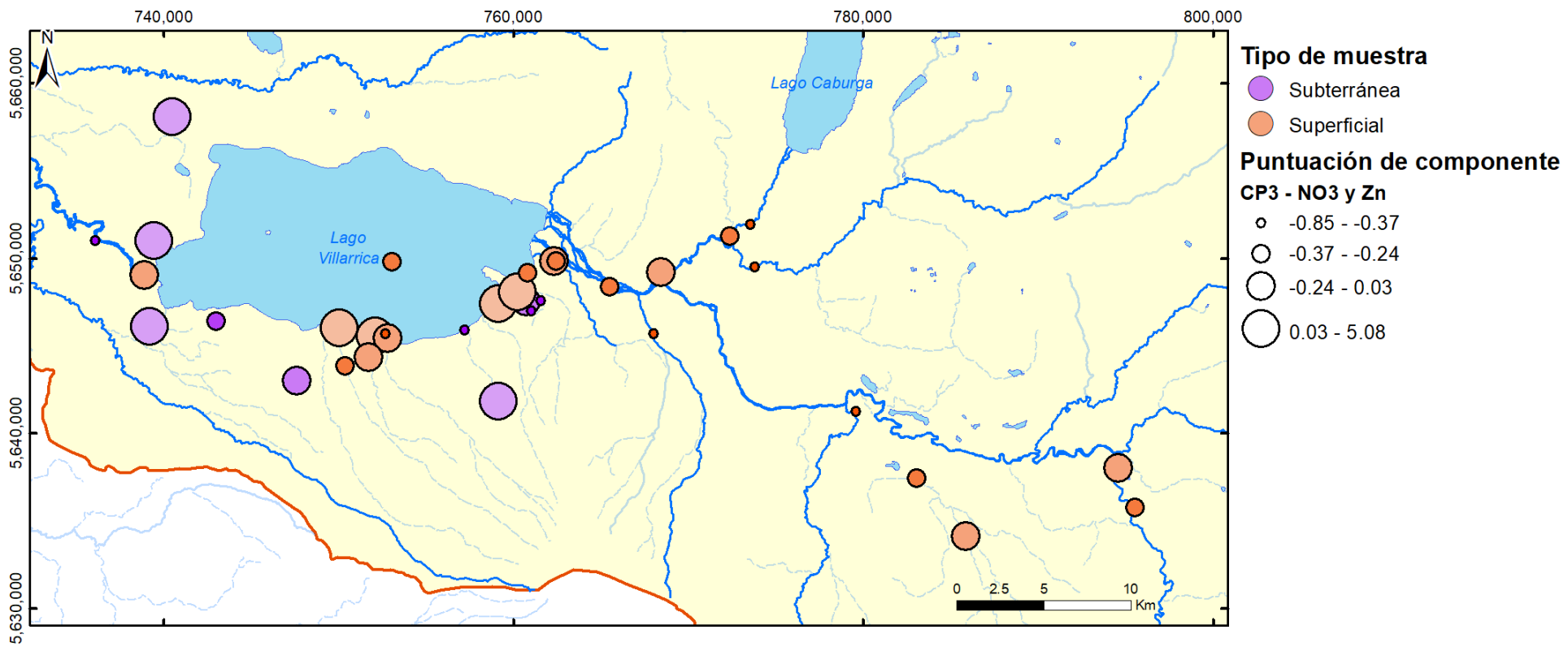


Figura 14. Mapa de factor scores para el tercer componente principal (CP3). Los valores de puntuación de componente corresponden a los rangos de cada cuartil.

Discusión

Los resultados son abordados desde el enfoque de los objetivos, intentando responder a la problemática planteada en ellos.

Proliferaciones de algas en el lago

Uno de los problemas que generan los aportes de nitrógeno y fósforo es el aumento de los nutrientes, y subsecuente eutrofización, la cual se expresa en proliferaciones o florecimientos algales, visibles en el lago Villarrica principalmente en verano (Figura 15). Estos florecimientos no sólo se componen de algas, sino también de cianobacterias.



Figura 15. Proliferación cianobacterial de *Dolichospermum* sp. en playa La Poza del lago Villarrica en verano de 2012 (Nimptsch, 2015). Foto tomada por Víctor Durán.

El nitrógeno puede entrar a los cuerpos de agua por diferentes vías. Éste puede ser lixiviado del suelo o de aguas servidas no tratadas, o que no incluyan denitrificación, y cuando está disuelto puede ser utilizado como alimento por el fitoplancton. No siempre es limitante, ya que el género *Dolichospermum* puede fijar el nitrógeno atmosférico y multiplicarse en condiciones de baja concentración de nitrógeno inorgánico disuelto, lo que hace que dominen bajo este tipo de condiciones. La fijación de nitrógeno atmosférico

requiere una alta cantidad de luz solar, por lo que este proceso ocurre más en verano (WHO, 1999).

De manera similar, el fósforo puede entrar a cuerpos de agua mediante aguas servidas tratadas o no tratadas que no incluyan procesos para eliminarlo específicamente, pero además, cuando se encuentra como fosfato (su forma biodisponible) se adhiere a partículas de suelo más fácilmente que el nitrato, por lo que puede entrar por escorrentía de suelo y erosión. Otro posible mecanismo de ingreso a las aguas es la erosión de minerales fosfatados, como el apatito (Holtzman y Lehman, 1998). Típicamente es limitante para el fitoplancton, aunque los organismos necesitan un séptimo de fósforo en comparación con la cantidad de nitrógeno. Las cianobacterias y otros organismos fitoplanctónicos pueden almacenar suficiente fósforo para 3 a 4 divisiones celulares, por lo que pueden aumentar su biomasa en un 1000% aun cuando el sistema se encuentra completamente desprovisto de fósforo (WHO, 1999).

Las proliferaciones algales si bien están vinculadas a las concentraciones de nitrógeno o fósforo son fenómenos complejos, afectados por varios parámetros, como la temperatura, la radiación solar, la presión, el viento y las precipitaciones. En la Figura 16 se grafican algunos de estos parámetros analizados en el área de estudio comparándolos con cuatro eventos de proliferación algal. Se observa que, a pesar de asociarse estos eventos con mayor temperatura, mayor radiación solar, menor presión, menor velocidad de viento y menores precipitaciones, se tiene un evento que ocurre contrario a la tendencia establecida para los otros tres eventos.

Estas proliferaciones, además del detrimento estético que producen, tienen ciertos riesgos asociados ya que pueden conllevar un aumento de las poblaciones de cianobacterias. Las cianobacterias generan cianotoxinas, las cuales pueden tener efectos adversos en la salud de personas y animales. Algunas son neurotóxicas (anatoxina a, saxotoxinas) o hepatotóxicas (microcistinas, nodularina). Se estima que en condiciones naturales 1 µg de Clorofila a cianobacterial puede contener 1 µg de microcistinas, aunque si hay una proliferación algal se pueden tener valores más altos de microcistinas (WHO, 1999).

La Organización Mundial de la Salud (OMS), recomienda ciertos procedimientos de acuerdo a la cantidad de algas, medida en células por mililitro (cel/ml) o en µg/L de Clorofila a cianobacterial, dependiendo del uso que se les da a las aguas afectadas (WHO, 1999). Para aguas recreativas se tienen tres niveles de orientación (Tabla 20).

Estas guías no están tomadas en cuenta en la normativa chilena. De hecho, como se puede ver en la Figura 17, hay gente bañándose en aguas con presencia de un florecimiento algal, el cual fue posteriormente determinado por Nimptsch (2015) como uno dominado principalmente por cianobacterias posiblemente tóxicas.

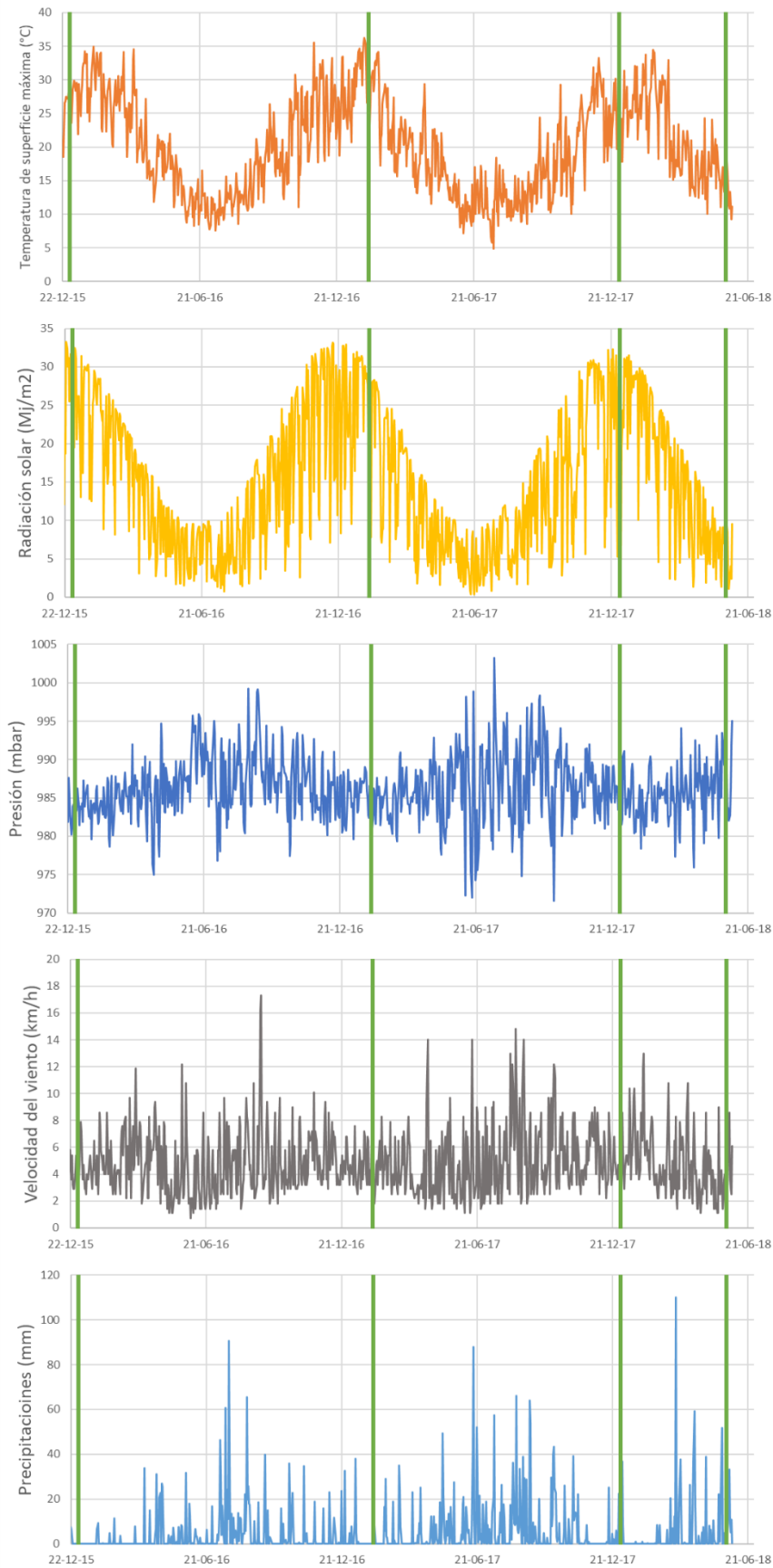


Figura 16. Distintos parámetros con las proliferaciones algales de enero de 2016, enero de 2017, enero de 2018 y mayo de 2018 (líneas verticales en verde). Se ve claramente que a pesar de seguir una tendencia de la aparición de proliferaciones de algas cuando hay mayor temperatura de superficie, mayor radiación solar, menor presión, menor velocidad del viento y ocurrencias en estación seca, se tiene una proliferación que no se comporta como las otras. Registros de proliferaciones tomados de Fundación Red Nuevas Ideas (2015). Datos de parámetros climáticos tomados de la Red Agrometeorológica del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) <http://agromet.inia.cl/>.

Tabla 20. Tabla con niveles de orientación para la toma de decisiones en distintas situaciones de presencia de cianobacterias en aguas recreativas. Tomado de WHO (1999).

Nivel de orientación	Situación	Información para construir el nivel de orientación	Riesgos para la salud	Acción recomendada
3	Escoria cianobacterial formada en áreas de baño	<ul style="list-style-type: none"> - Envenenamientos letales de animales por ingestión - Casos históricos de humanos afectados 	<ul style="list-style-type: none"> - Potencial de envenenamiento agudo - Enfermedades crónicas - Efectos adversos en el corto plazo (irritación de la piel, enfermedades gastrointestinales) 	<ul style="list-style-type: none"> - Prevenir inmediatamente el contacto con la escoria (posible prohibición de uso de aguas recreativas) - Investigación de salud pública - Informar a las autoridades
2	100,000 cel/ml o 50 µg/L de Clorofila <i>a</i> cuando predominan cianobacterias	Guía provisional de agua potable para cianotoxinas	<ul style="list-style-type: none"> - Enfermedades crónicas - Efectos adversos en el corto plazo (irritación de la piel, enfermedades gastrointestinales) 	<ul style="list-style-type: none"> - Vigilar desarrollo de escorias cianobacteriales - Restringir baño e investigar riesgo - Informar a las autoridades
1	20,000 cel/ml o 10 µg/L de Clorofila <i>a</i> cuando predominan cianobacterias	Estudio epidemiológico en uso de aguas recreativas	Efectos adversos en el corto plazo (irritación de la piel, enfermedades gastrointestinales)	Investigar riesgo e informar a las autoridades



Figura 17. Fotos tomadas en el lago Villarrica durante el verano de 2012, donde se muestra gente bañándose a pesar de la proliferación de algas. Siguiendo las guías de la OMS para aguas recreativas (WHO, 1999) no se debería permitir el contacto entre la gente y la escoria algal o cianobacterial. Foto tomada de la presentación 'Cianobacterias-Toxinas-Síntomas-Efectos' del Dr. Jorge Nimptsch.

Se han hecho monitoreos del lago desde 1978 hasta la actualidad (Figura 18, Tabla 21, y Figura 19), midiendo distintos parámetros, como temperatura, oxígeno disuelto, nitrato, fosfato, clorofila *a*, entre otros.

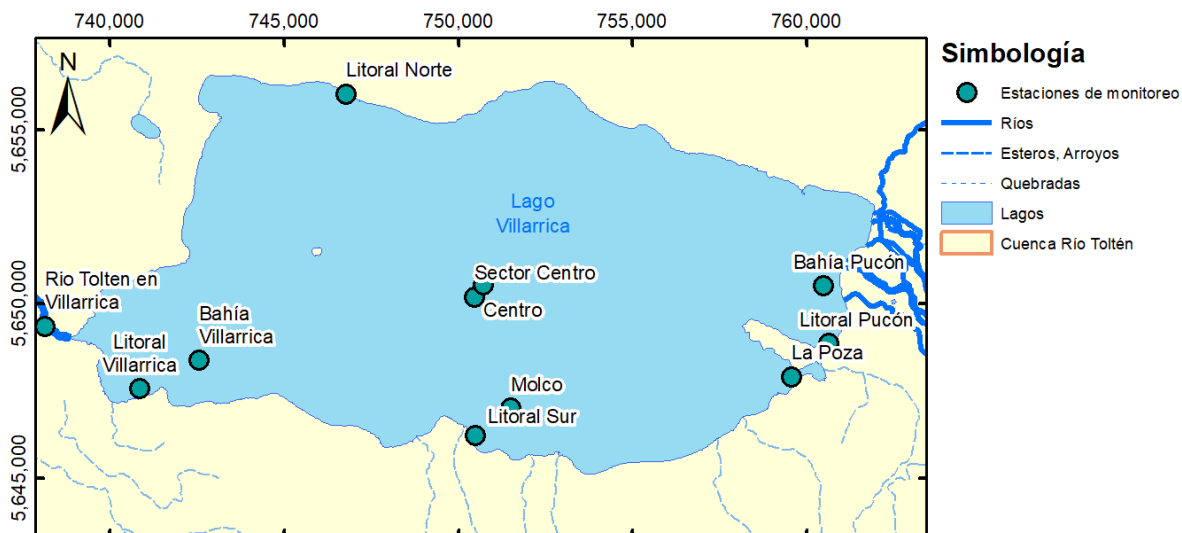


Figura 18. Mapa de estaciones de monitoreo en el lago Villarrica.

Tabla 21. Estaciones de monitoreo del lago Villarrica con sus respectivos períodos de vigencia.

Estación de Monitoreo	Vigencia
Centro	1978-1979, 1984-1987, 2007-2008
Bahía Villarrica	1986-1987, 1989-1991, 1993-1998, 2000-2017
La Poza	1986-1987, 1989-1991, 1993-1998, 2000-2017
Molco	1986-1987, 1990-1991, 1993-1998, 2000-2010
Bahía Pucón	1986-1987, 1990-1991, 1993-1998, 2000-2010
Sector Centro	2010-2017
Litoral Villarrica	2010-2017
Litoral Sur	2010-2017
Río Pucón Pasarela Queulle	2010-2017
Río Tolten en Villarrica	2010-2017
Litoral Norte	2011-2017
Litoral Pucón	2011-2017

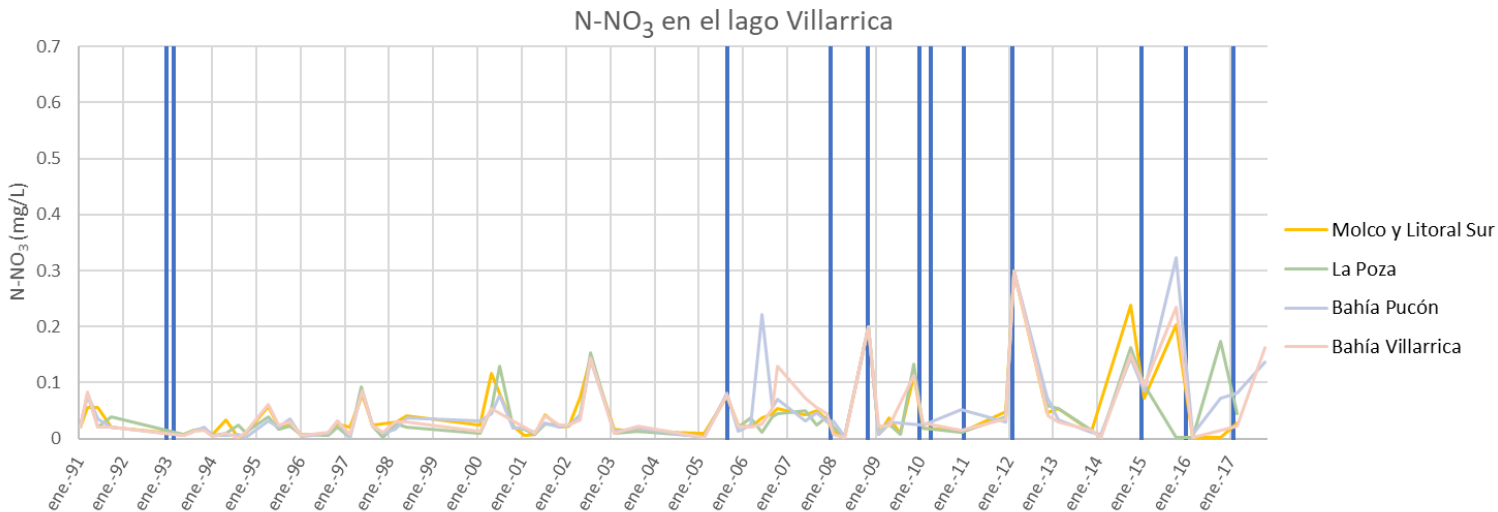


Figura 19. Gráfico que muestra valores de N-NO₃ en distintas estaciones de monitoreo del lago Villarrica. Las líneas azules verticales indican un evento de proliferación de algas, según lo registrado en el informe de la Fundación Red de Nuevas Ideas (2018).

Durante el monitoreo establecido por el DS N° 19/2013, que cuenta con cuatro campañas de monitoreo realizadas entre noviembre de 2013 y enero 2015, se constata un fuerte aumento de los bioindicadores durante la campaña de 2015, lo cual concuerda con un evento de proliferación algal.

Durante este evento, hubo un aumento significativo en la cantidad de Cyanophyceae (cianobacterias) comparado con los períodos anteriores, sobrepasando las 150000 cel/L en la zona generalmente más afectada por los eventos de proliferación algal, la playa de La Poza. Incluso, en el monitoreo anterior, de octubre de 2014, en esta área se tenía más de 5000 cel/L. Aún más, un estudio realizado por Nimptsch (2015) encontró valores de cianobacterias de 1.4×10^6 cel/ml en este sector durante la proliferación algal del verano de 2012. La cianobacteria corresponde a *Dolichospermum* sp.

La lejanía de las estaciones de monitoreo de las playas de uso recreativo no permite disponer de estos datos en los lugares donde las personas podrían estar en contacto con este potencial riesgo. Además, los datos no son continuos en el tiempo y en los parámetros medidos, lo que hace muy difícil el análisis de los datos.

Las especies encontradas pueden fijar nitrógeno atmosférico por lo que se hace difícil su manejo limitando los aportes de nitrógeno. De acuerdo con la OMS (WHO, 1999), la biomasa que pueden alcanzar las cianobacterias en un cuerpo de agua está limitado superiormente por la cantidad de fósforo que se encuentra ligado dentro de las células, por lo que debe medirse el fósforo total del fosfato (P-PO₄) para un adecuado manejo de la biomasa. Además, este mismo organismo recomienda alcanzar concentraciones bajo 0.05 mg/L de P-PO₄ (equivalente a 0.15 mg/L PO₄) en las aguas para reducir las proliferaciones y escorias generadas por este género (*Dolichospermum*) de cianobacterias.

Calidad del agua en la zona de estudio

Hay una baja concentración general de los elementos o compuestos disueltos. Es por esto que el BI es mayor a 5% en la mayoría de las muestras (Tabla 7). Se está en un rango aceptable de BI de acuerdo con la conductividad medida en terreno (Custodio y Llamas, 1976).

Debido a esto la calidad del agua muestreada es bastante buena, encontrándose dentro de los límites de las normas NCh409 y NCh1333 que regulan el agua potable y de riego respectivamente.

Las aguas se clasifican en el diagrama de Piper como aguas bicarbonatadas mixtas (Figura 20), donde las propiedades químicas del agua están dominadas por metales alcalinotérreos y ácidos débiles.

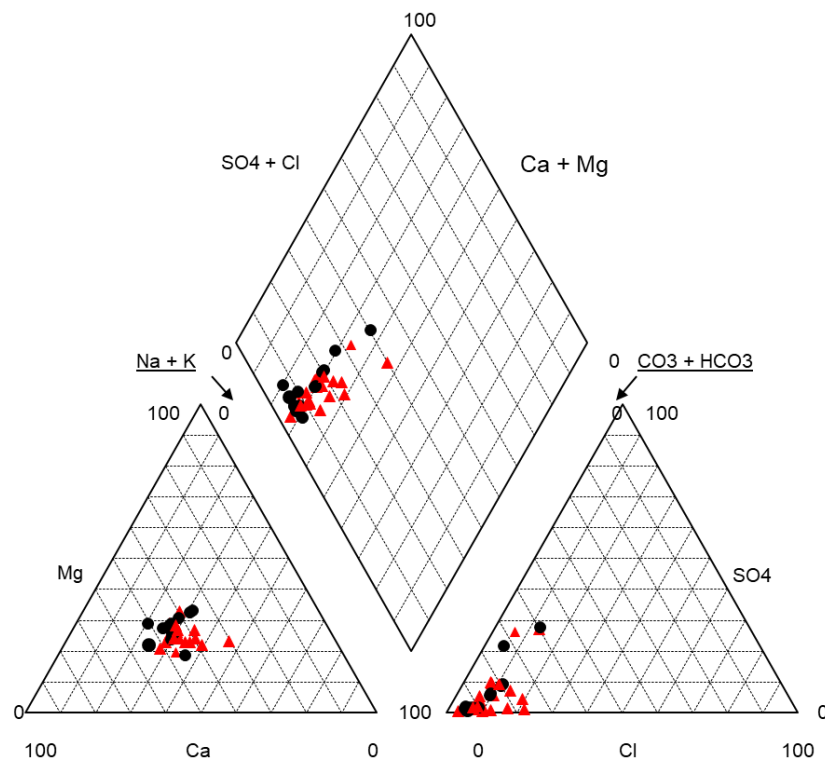


Figura 20. Diagrama Piper de las aguas del muestreo de enero 2018. Los círculos negros representan muestras de agua subterránea mientras que los triángulos rojos representan muestras de agua superficial. Todas caen en el área 5 definida por Piper (1944), que corresponde a aguas bicarbonatadas sin ningún catión dominante en este caso.

Al considerar los datos de DGA (2016), con muestras tomadas en el área de estudio, se ve que también se encuentran mayormente en la misma zona de clasificación, aunque con una dispersión mayor (Figura 21).

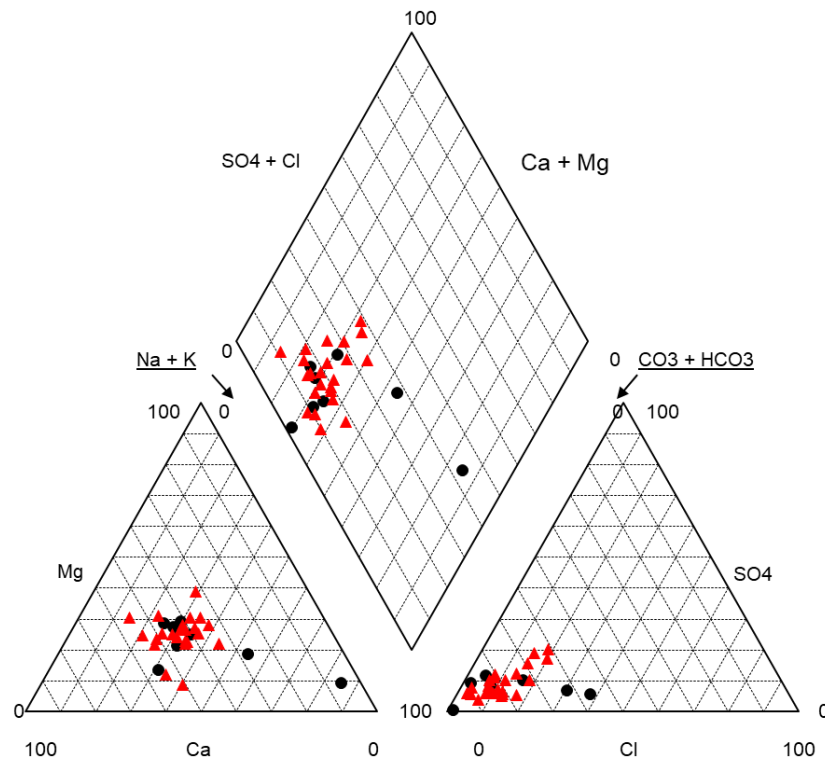


Figura 21. Diagrama Piper de muestras tomadas para el informe de la DGA (2016) durante los años 2014-2015, en cuatro campañas de muestreo. Los círculos negros representan muestras de agua subterránea mientras que los triángulos rojos representan muestras de agua superficial. Todas las aguas grafican en el área 5 definida por Piper (1944) excepto dos, pertenecientes a pozos de la zona. Estas dos muestras se encuentran en el área 9 definida por Piper (1944).

Se ve que la química es bastante homogénea entre el lago y las aguas superficiales y subterráneas.

Relación entre lago, agua superficial y agua subterránea

La relación entre distintos cuerpos de agua puede analizarse a través de los datos de cota hidráulica en la zona. Con un detallado análisis de este parámetro se pueden determinar los movimientos y aportes entre el agua superficial y la subterránea y ayuda a entender las direcciones de los flujos subterráneos.

La dirección de flujo subterráneo general, en el área de estudio es hacia el lago desde la ribera sur, desde el flanco del volcán Villarrica, y la ribera oeste (Figura 22). Esto se puede ver a partir de los datos de cota hidráulica de los anexos de DGA (2016).

No hay datos de pozos actuales, excepto de una estación de la DGA en que se mide nivel estático, pero inició la toma de datos desde el 01/07/2018 por lo que no permite un análisis riguroso. Los únicos datos de cota hidráulica proceden de expedientes de la DGA, pero el número es escaso para el área estudiada y la ventana temporal es muy amplia por lo cual no son apropiados para crear una carta piezométrica. Las

incoherencias en las posibles direcciones pueden deberse a que el nivel estático fue afectado por un descenso producido por bombeos.

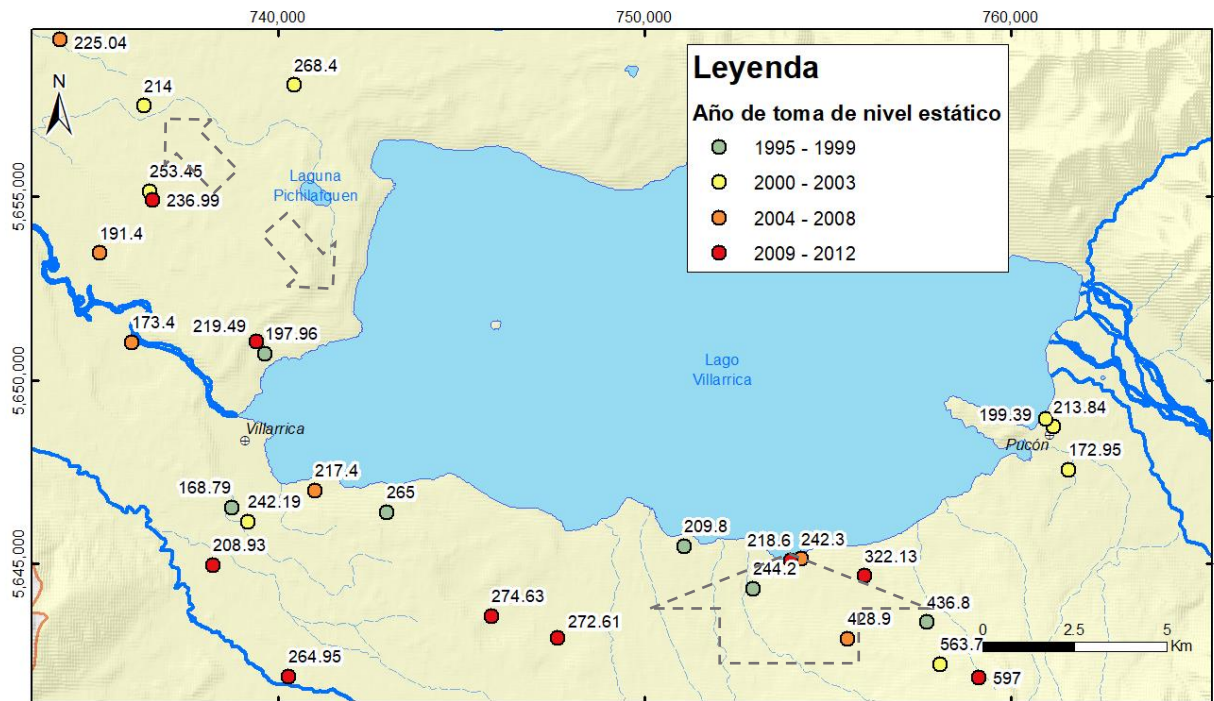


Figura 22. Pozos con valores de cota hidráulica, tomado de DGA (2016) y modificado. Se muestran los años en que se midió el nivel estático de los pozos. Las flechas indican la dirección general de flujo estimada.

Además de la homogeneidad fisicoquímica, otro parámetro a considerar, que avala la estrecha relación entre el agua superficial y la subterránea, es la alta transmisividad de la zona calculada a partir de las pruebas de bombeo recopiladas en los expedientes de la DGA (Figura 23).

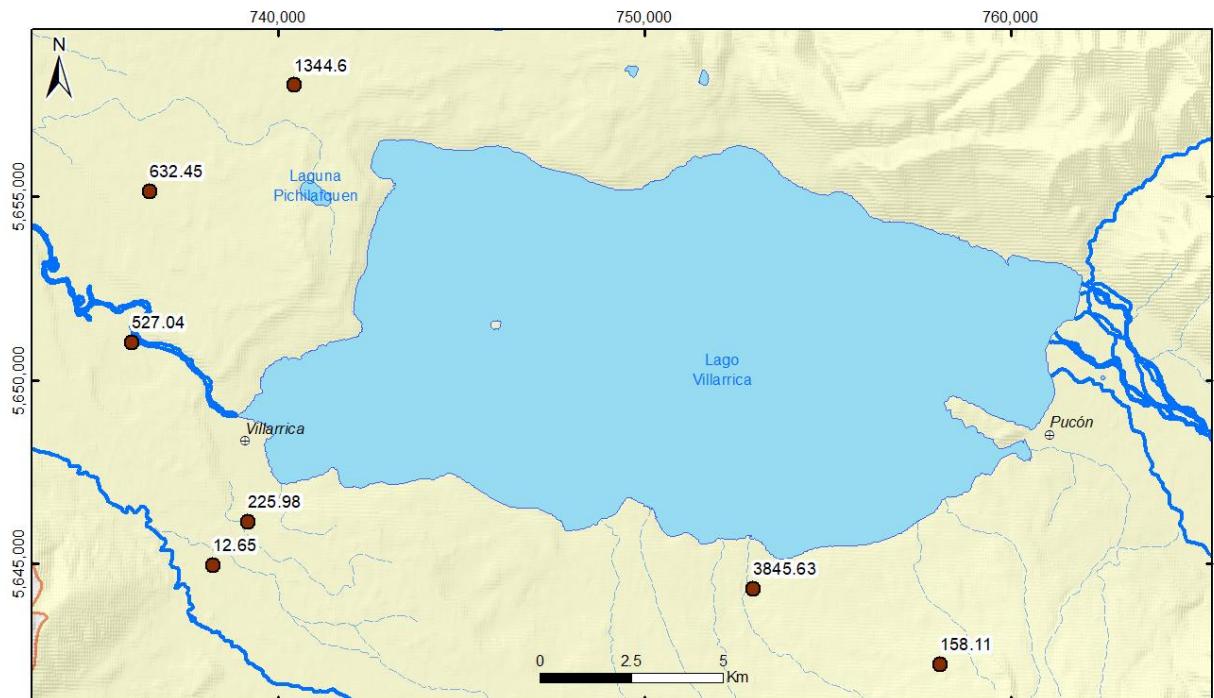


Figura 23. Mapa con pozos con valores de transmisividad, elaborado con datos de DGA (2016).

Es esta química predominantemente bicarbonatada la que, junto a la alta transmisividad y, a la dirección de flujo, permite suponer que los flujos siguen sistemas no muy profundos, con tiempos de residencia cortos como sugiere la baja mineralización de las aguas analizadas.

El acuífero en la zona de estudio es altamente heterogéneo. Comprende depósitos morrénicos (Plm1) y piroclásticos (PIHdp), con granulometría, porosidad y permeabilidad muy variadas que pueden pasar hasta a ser impermeables

Los aportes de nitrógeno y fósforo

De acuerdo con la OMS (WHO, 1999), las fuentes más importantes de nutrientes externos son la escorrentía y erosión de predios agrícolas, erosión por deforestación y aguas servidas. Pero puede ser naturalmente abundante en zonas estuarinas, en algunos lagos volcánicos y en algunos lagos alimentados por agua subterránea. Las concentraciones medidas en este trabajo se presentan en la Figura 24 y la Figura 25.

En las aguas subterráneas se encontraron las concentraciones de nitrato y fosfato más altos del área de estudio, lo que sugiere que los aportes de nutrientes al lago por esta vía son significativos.

En las aguas superficiales, los valores más altos de nitrato (1.13 mg/L) se encontraron en la ribera sur, donde se concentran actividades económicas como, por ejemplo, las pisciculturas. No se midieron valores de fosfato sobre el nivel de detección en estas aguas.

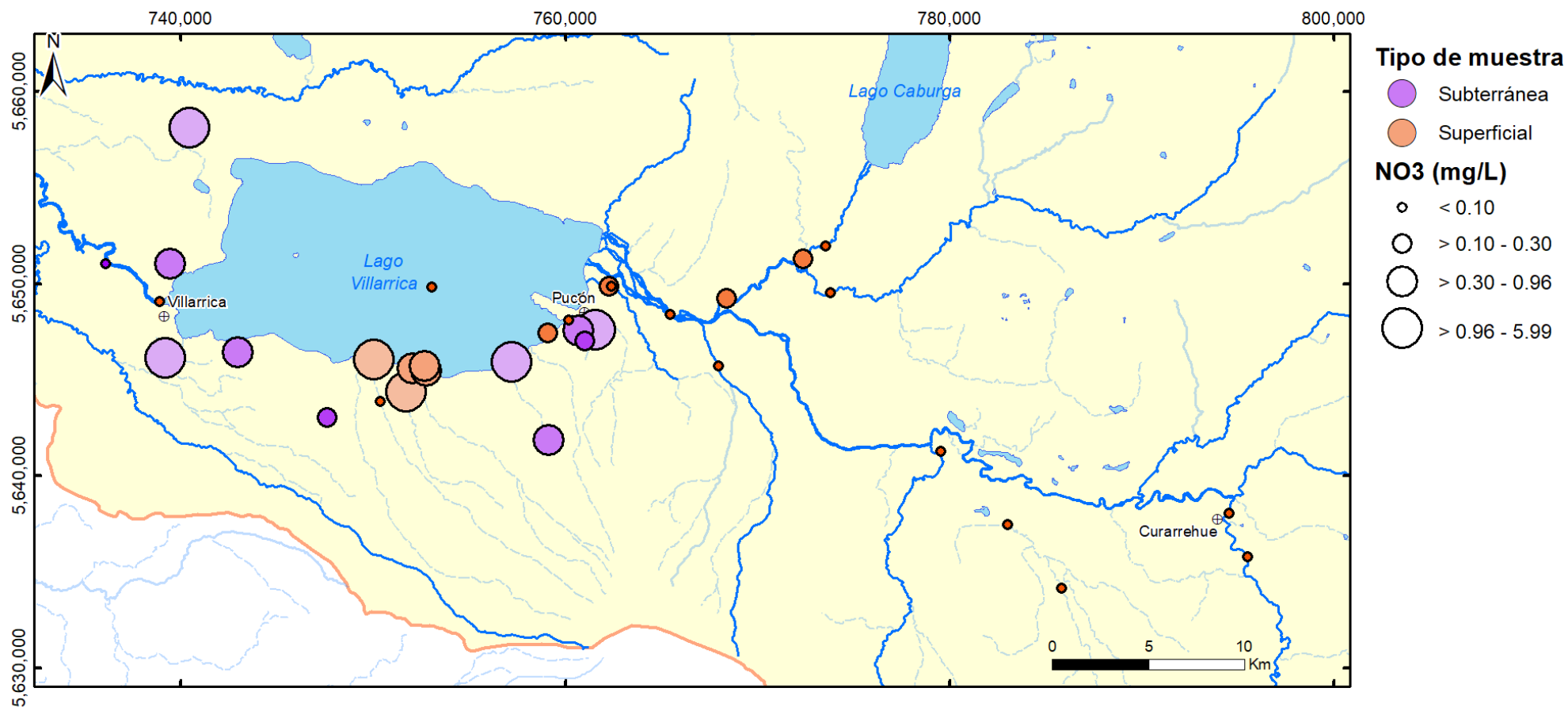


Figura 24. Mapa con las concentraciones de NO₃ medidas en las muestras de la campaña de muestreo de enero 2018.

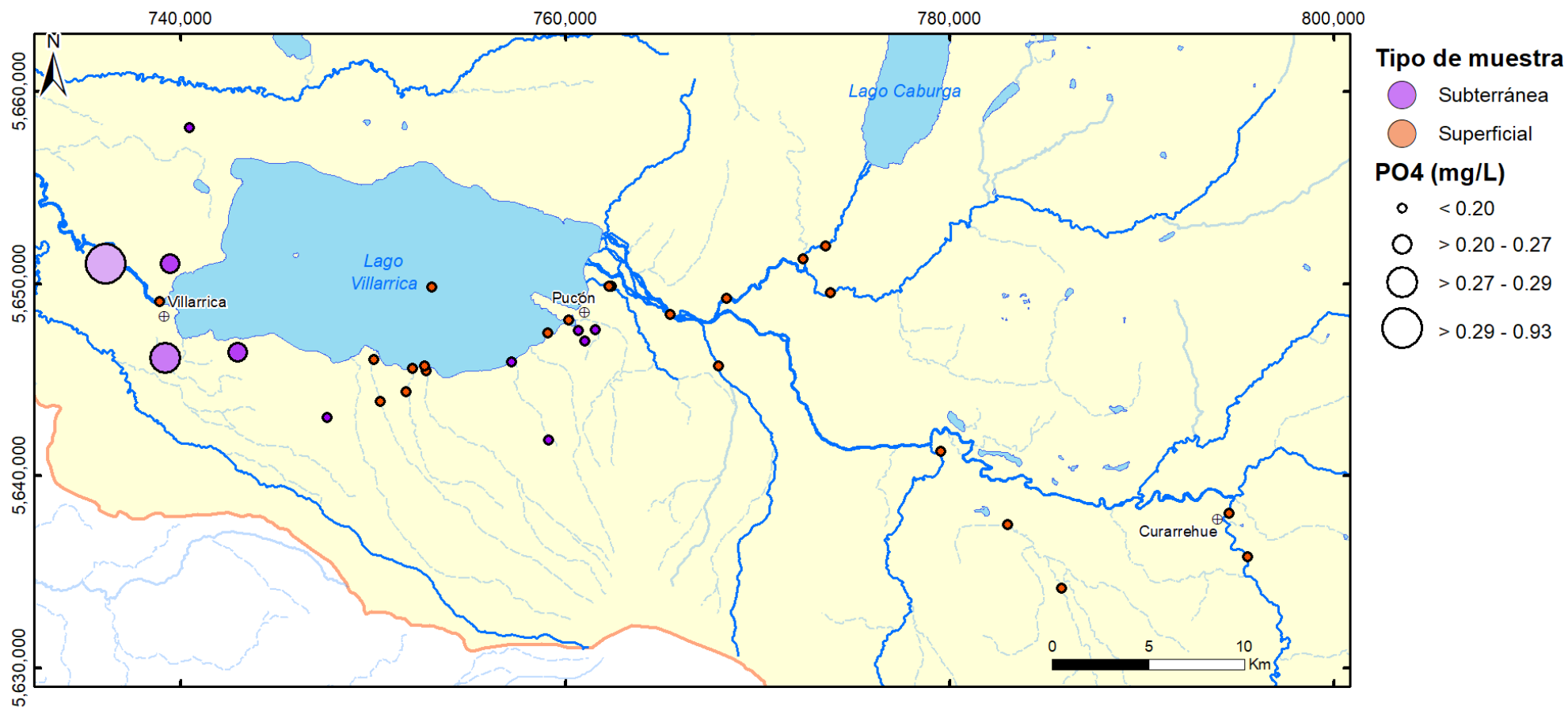


Figura 25. Mapa con las concentraciones de PO₄ medidas en las muestras de la campaña de enero de 2018.

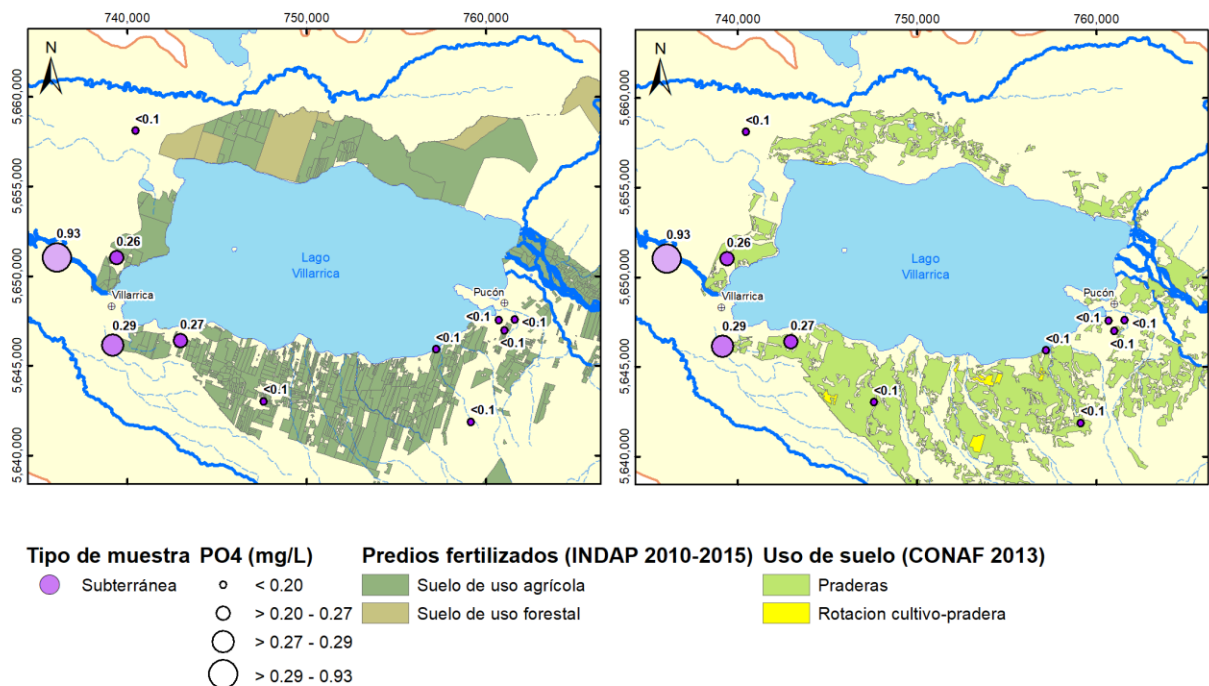


Figura 27. Mapa de predios fertilizados (datos INDAP 2010-2015) y de uso de suelo (datos CONAF 2013), junto a las concentraciones de PO₄ medidas en pozos cercanos al lago Villarrica.

Hay una tendencia al aumento de las concentraciones de NO₃ a medida que los pozos se acercan al lago, pero la baja densidad de los puntos de muestreo no permite definir una tendencia detallada que ayude a la interpretación. Aunque es necesario considerar que la alta permeabilidad y el nivel freático extremadamente superficial en la zona (se sabe de manera informal que hay vertientes, y además se constató en terreno que se utilizan norias poco profundas, como en el punto n° 21) son unos elementos que sugieren que estos aportes pueden ser importantes ya que cualquier percolación o malfuncionamiento vertería directamente en el acuífero y, de éste al lago. Se requieren estudios detallados en la zona para establecer además de lo anteriormente expuesto, la relación del acuífero con el lago.

Una fuente aún no estudiada es el mineral apatito (Ca₅(PO₄)₃(F, Cl, OH)), el cual podría encontrarse en tefras o lahares del volcán, u otro material ígneo. Hasta que no se tengan análisis mineralógicos no se puede descartar o confirmar su presencia, pero es posible que la erosión de minerales fosfatados pueda contribuir fósforo al lago (Holtzman y Lehman, 1998). Las concentraciones de fosfato encontradas en agua subterránea pueden indicar un posible blanco para encontrar este mineral. Aunque hay que tener en cuenta que la unidad de depósitos piroclásticos posglaciales (PIHdp) cubre toda el área de estudio (Moreno y Lara, 2008), y esta sí podría contener apatito.

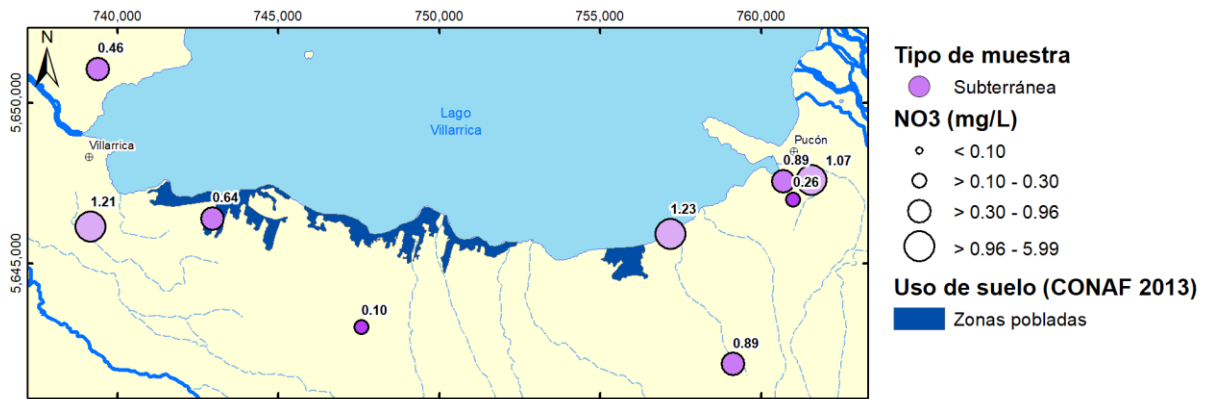


Figura 28. Mapa con la extensión de zonas pobladas, donde no hay alcantarillado y se utilizan fosas sépticas (CONAF, 2013), en azul y los valores de nitrato medidos en agua subterránea.

En la ribera sur, se tienen valores significativos de agua subterránea para el nitrato y fosfato, y las mayores concentraciones de nitrato en agua superficial. Aparte de los predios fertilizados en esta zona, se tiene el uso de fosas séptica debido a la falta de alcantarillado en la zona poblada (Figura 28). Además, hay varias pisciculturas que utilizan los esteros que llegan al lago por esta ribera (Figura 29).

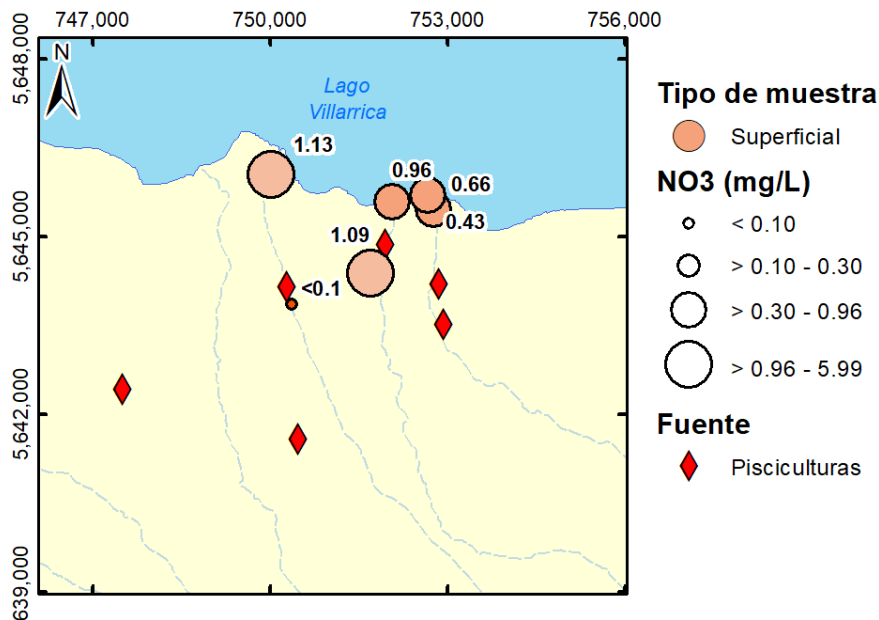


Figura 29. Mapa de la ribera sur del lago Villarrica, con los valores medidos de NO₃ en agua superficial y la ubicación de las distintas pisciculturas. Los esteros en la imagen fluyen hacia el norte, llegando al lago.

Hacia el oeste, aguas abajo de la desembocadura del lago, se encuentra la PTAS y el relleno sanitario de Villarrica. No se midieron valores de nitrato sobre el límite de detección, pero se tiene la mayor concentración de fosfato del área de estudio (0.96 mg/L) justo bajo esta planta (Figura 30).

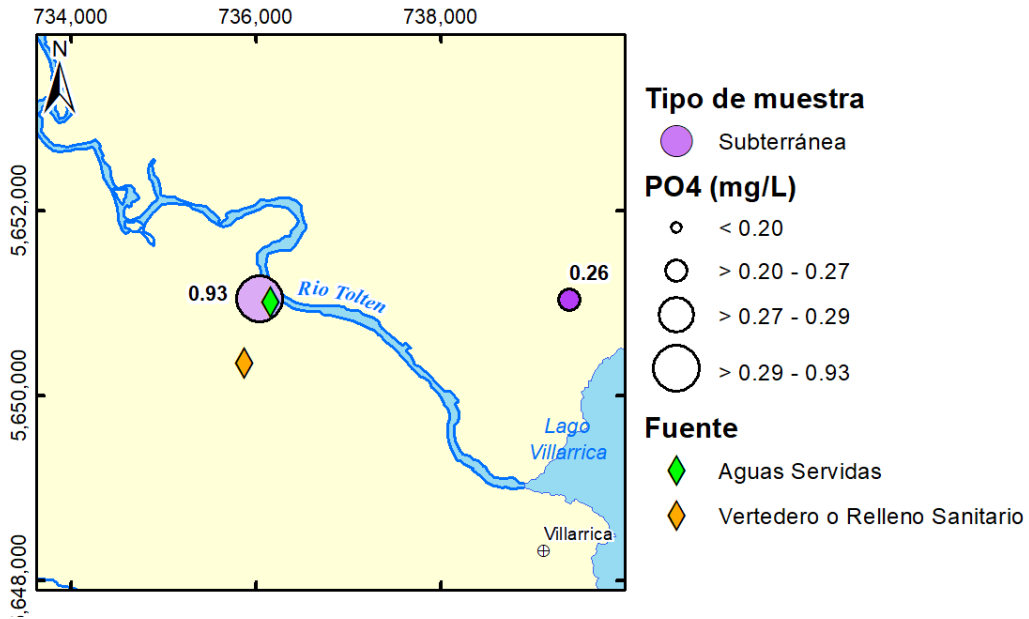


Figura 30. Mapa con concentración de PO_4 en el pozo de la PTAS Villarrica, donde se tiene el valor máximo.

Hacia la ribera este, en el río Claro, se encuentra la PTAS de Pucón. Se tomaron muestras antes y después de la descarga que hace la PTAS en el río Claro, en su tramo final hacia el lago. Se observa que es posible medir el nitrato, aunque con muy bajos valores sobre el nivel de detección (Figura 31).

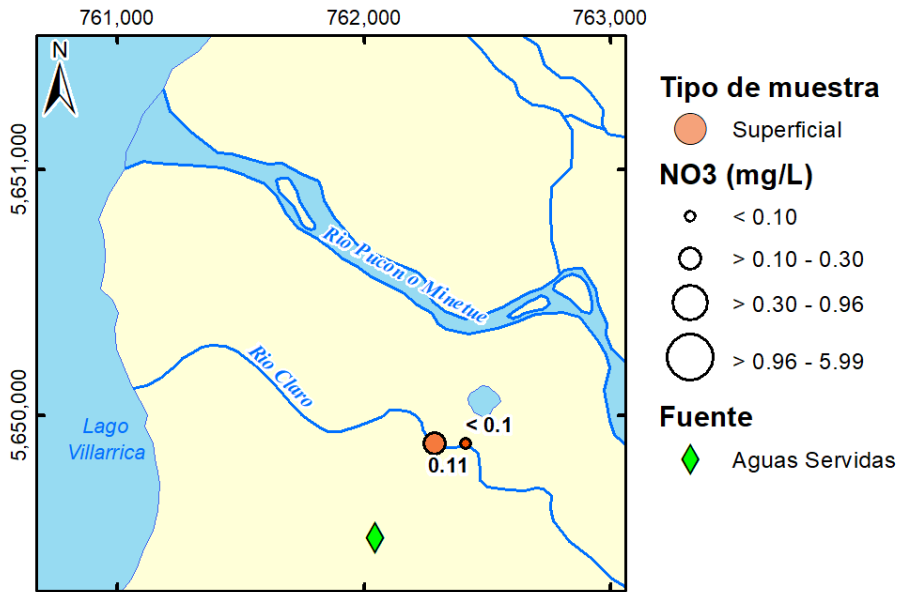


Figura 31. Mapa mostrando puntos de muestreo aguas arriba y abajo de la descarga de la PTAS de Pucón (rombo verde) en el río Claro. En el mapa se encuentra la ubicación de la planta, pero la descarga se hace entre los puntos de muestreo.

Hacia el este, aguas arriba por los tributarios del lago se encuentran pisciculturas y descargas de aguas servidas sin tratamiento.

Las pisciculturas se encuentran en el río Caburga (Figura 32) y en los esteros tributarios del río Cavisañi (Figura 33). Sólo en las pisciculturas que se encuentran en la zona del río Caburga tienen valores de nitrato sobre el límite de detección, relativamente bajos comparados con otras zonas.

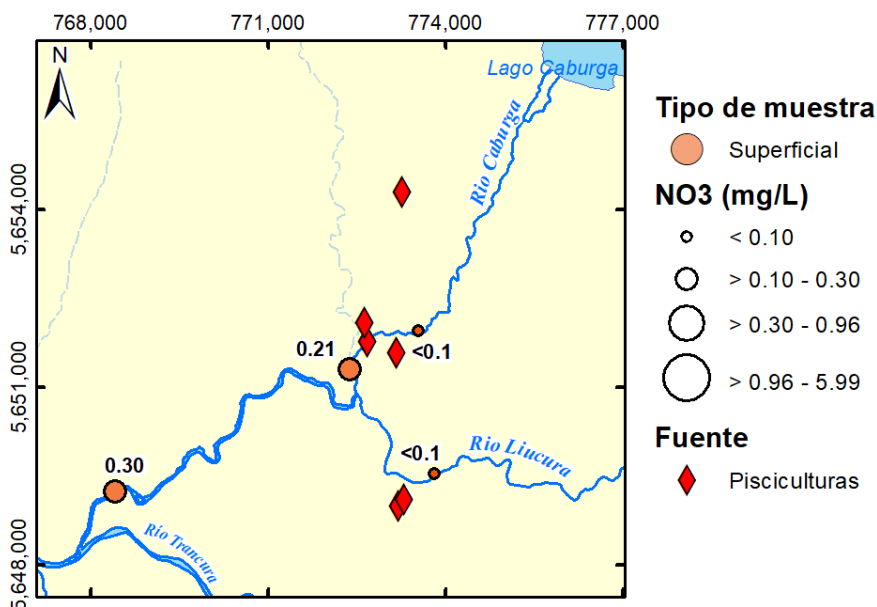


Figura 32. Mapa del sector sur del lago Caburga, con los valores medidos de NO₃ y la ubicación de las distintas pisciculturas. Los ríos en la imagen fluyen hacia el suroeste.

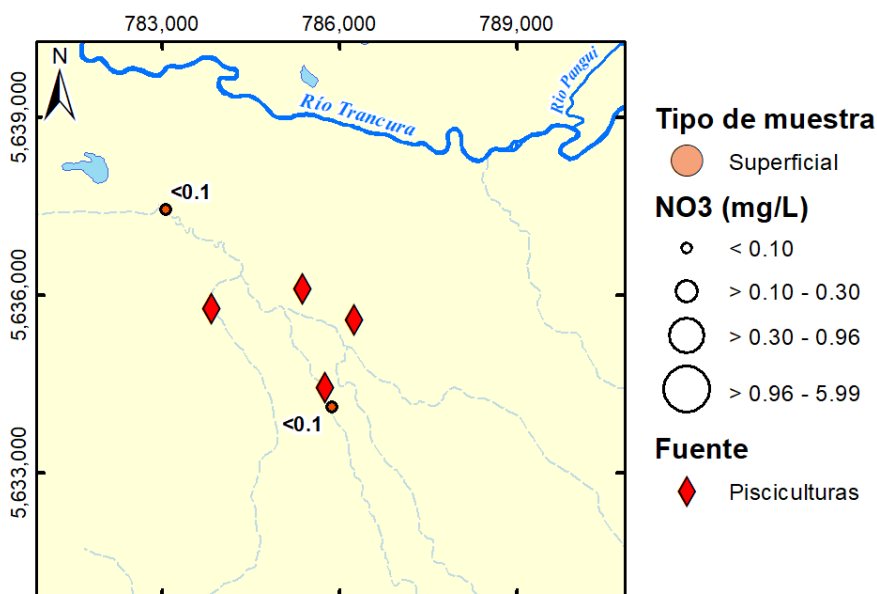


Figura 33. Mapa del sector del río Cavisañi, el cual es tributado por los esteros donde se encuentran las pisciculturas en la imagen. Los valores medidos de NO₃ no superaron el límite de detección. Los ríos y esteros en la imagen fluyen hacia el oeste.

Las descargas de agua servida en Curarrehue no cuentan con tratamiento. A pesar de esto no se encontró nitrato sobre el nivel de detección instrumental y se puede considerar

que esta fuente no aporta muchos nutrientes al sistema de aguas superficiales y al lago (Figura 34).

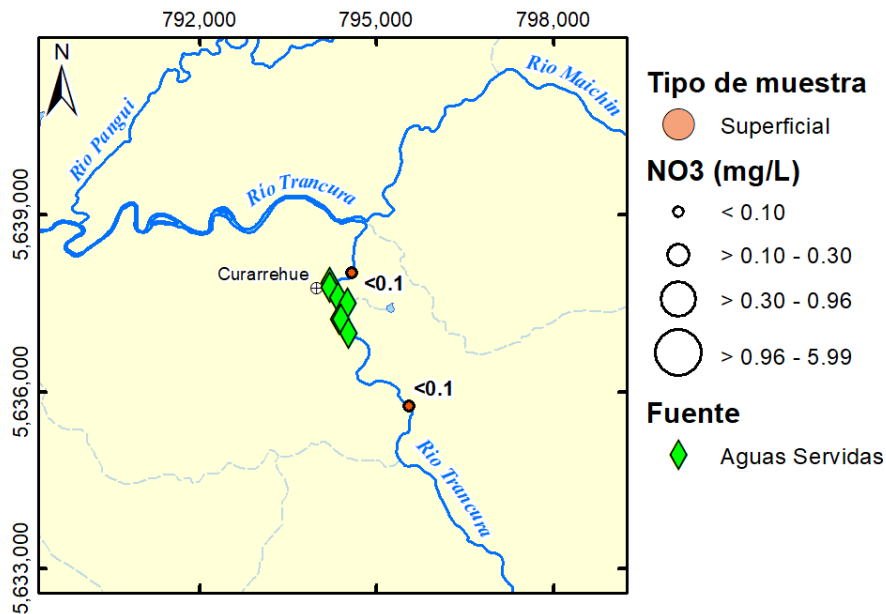


Figura 34. Mapa con las siete descargas de aguas servidas en Curarrehue, con los puntos de muestreo y sus valores correspondientes de NO₃ (mg/L).

Cuantificación de aportes

Se hicieron estimaciones de los aportes de nitrógeno total del nitrato (N-NO₃) y de fósforo total del fosfato (P-PO₄) en base a las concentraciones de nitrato y fosfato medidas en este trabajo y en el estudio realizado por la UFRO (2018). Se asume que estas son las principales moléculas de nitrógeno y fósforo que entran al lago debido a las condiciones oxidantes del ambiente. Los cálculos de las estimaciones se han realizado por separado para las aguas superficiales y las subterráneas.

Aguas superficiales

En el área de estudio hay estaciones fluviométricas de la DGA en los ríos Trancura, Liucura y Toltén (Figura 35). También hay una estación en el Río Pucón, pero la serie de datos comienza en abril del 2018, y actualmente sólo se encuentran disponibles los datos hasta julio del 2018. Los caudales medidos fluctúan bastante entre los períodos secos y húmedos, además las fluctuaciones mensuales también son considerables para algunos períodos como se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22. Mediciones de caudal en estaciones de la DGA en distintos ríos del área de estudio. En ciertos meses no se hicieron mediciones en ciertas estaciones. Se muestran los promedios mensuales, con su respectiva desviación media. Los datos se toman cada media hora en las estaciones.

		Río Liucura		Río Trancura		Río Pucón		Río Toltén	
		Promedio (m ³ /s)	D _m	Promedio (m ³ /s)	D _m	Promedio (m ³ /s)	D _m	Promedio (m ³ /s)	D _m
2017	Septiembre	35.44	7.59	136.12	28.74	-	-	320.87	40.89
	Octubre	50.93	13.19	199.95	48.87	-	-	366.36	34.34
	Noviembre	37.25	7.47	161.61	22.55	-	-	319.52	21.95
	Diciembre	17.36	3.40	96.22	15.51	-	-	215.89	21.20
2018	Enero	12.81	3.79	68.52	11.98	-	-	179.16	20.51
	Febrero	7.20	0.47	47.00	2.11	-	-	125.89	5.52
	Marzo	6.42	0.00	48.25	7.51	-	-	126.68	12.29
	Abril	17.80	9.09	-	-	150.92	48.30	174.47	27.10
	Mayo	17.99	7.56	114.10	22.41	164.13	43.51	181.19	21.59
	Junio	38.72	28.24	157.87	89.46	243.16	97.97	251.12	37.14
	Julio	43.15	14.65	193.52	65.63	311.87	67.07	411.04	36.25

Hay mediciones del caudal del río Pucón hechas por la UFRO entre septiembre de 2017 y enero de 2018 (Tabla 23), donde también se hicieron mediciones de las concentraciones de nitrato y fosfato. Se puede ver que hay una gran variabilidad en los datos, tanto de los caudales como de las concentraciones de nitrato y fosfato medidos. No se podrá utilizar la medida de la concentración de nitrato en el río Pucón de esta memoria ya que los valores están bajo el límite de detección.

Tabla 23. Mediciones hechas por la UFRO (2018) en el Río Pucón, con las proyecciones del flujo másico utilizando el valor medido para el mes y para el año, asumiendo que se tiene el mismo caudal y concentración.

Fecha	Caudal (m ³ /s)	NO ₃ (mg/L)	PO ₄ (mg/L)	Flujo másico proyectado (kg N-NO ₃)		Flujo másico proyectado (kg P-PO ₄)	
				Mensual	Anual	Mensual	Anual
26-09-17	296.57	0.15	0.04	26730	325217	9855	119906
22-11-17	285.16	0.22	0.02	36957	449640	4374	53212
19-12-17	201.40	0.04	0.06	4390	53409	9782	119010
23-01-18	166.60	0.20	0.06	19432	236425	8943	108809

Esto, expresado en términos de incertidumbre a través de la ecuación $\frac{|\Delta F_M|}{F_M} = \frac{|\Delta F_S|}{F_S} + \frac{|\Delta C|}{\bar{C}}$, donde C es la concentración, F_S es el flujo superficial y F_M es el flujo másico, Δ es la desviación media y $\bar{\quad}$ es el promedio, indica que se tienen 258665 ± 156061 kg N-NO₃/a y 108919 ± 63279 kg P-PO₄/a. Esto es una muestra de la alta incertidumbre que se tiene para los aportes, siendo un 60% aproximadamente para los flujos másicos.

También hay mediciones en la ribera sur del lago, pero los caudales son considerablemente menores comparados con el río Pucón (Tabla 24).

Tabla 24. Mediciones hechas por la UFRO (2018) en los esteros de la ribera sur del lago Villarrica en enero de 2018, con las proyecciones de flujo másico utilizando el valor medido para el mes y para el año, asumiendo que se tiene el mismo caudal y concentración. Además, a modo de comparación, incluye los datos de las concentraciones medidas en este trabajo, en muestras tomadas en enero de 2018.

	Caudal (m ³ /s)	NO ₃ (mg/L) (UFRO 2018)	Flujo másico proyectado (kg N-NO ₃)		NO ₃ (mg/L) (Este trabajo)	Flujo másico proyectado (kg N-NO ₃)	
			Mensual	Anual		Mensual	Anual
Estero Molco	1.18	1.96	1362	16576	1.13	785	9557
Estero Loncotraro	0.85	0.92	462	5623	0.96	481	5848
Estero Los Chilcos	0.98	0.87	500	6083	0.66	381	4636
Estero Correntoso	0.68	0.56	222	2705	0.43	172	2096

Como se ve en las tablas 23 y 24, así como varían los caudales y concentraciones, varían los flujos másicos estimados y no es simple considerar un solo valor para estimaciones a largo plazo.

Además, no es importante solamente lo que entra al lago, sino que hay que monitorear el río Toltén de la misma manera, para poder hacer un balance de nutrientes más preciso en el lago Villarrica.

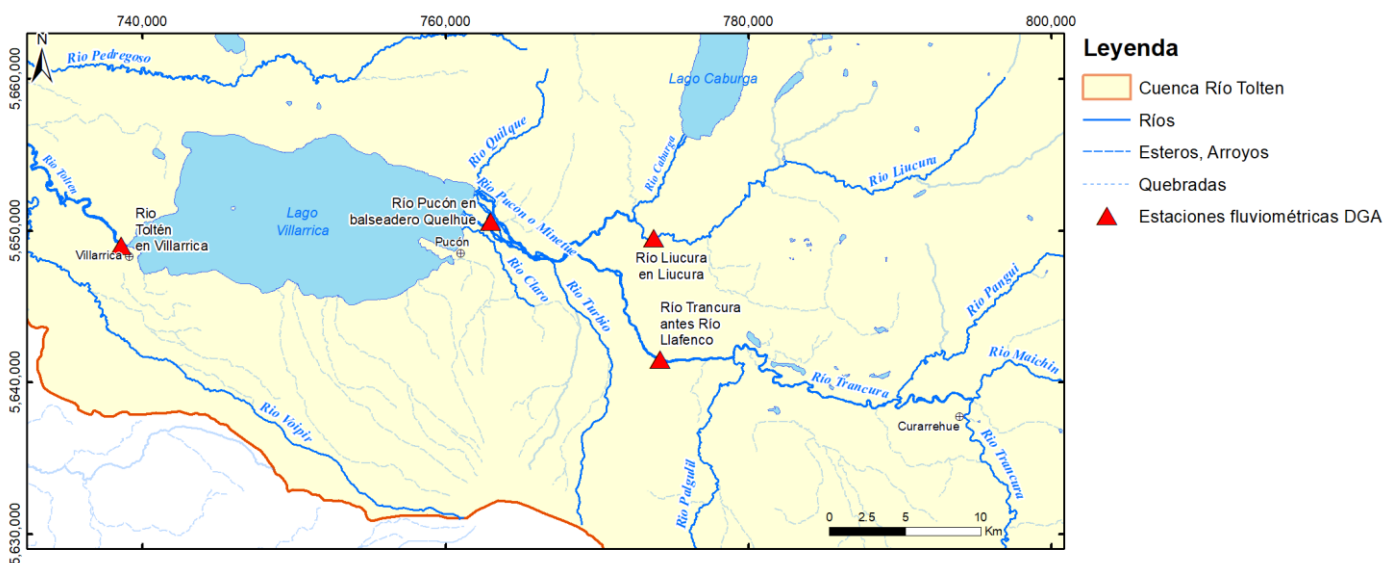


Figura 35. Mapa con estaciones fluviométricas de la DGA. Nótese que la estación que mide el caudal de flujo en el río Pucón tiene datos recién desde abril de 2018 hasta julio de 2018.

En resumen, según los datos recopilados, el principal aporte al lago procede del Río Pucón, y su variabilidad en caudal y concentración tanto de nitrato como de fosfato hace difícil una correcta estimación. Se pueden conocer bien los aportes que se hacen a través de los otros afluentes, pero el sistema está dominado principalmente por este río, con aportes de uno a dos órdenes de magnitud superiores a los otros.

Es necesario, entonces, realizar un monitoreo continuo de la concentración de nitrato en el río Pucón, su principal afluente, y en el río Toltén, su principal efluente. Un ejemplo de esto es el estudio realizado por el Servicio Geológico de Estados Unidos

(USGS) en Illinois (USGS, 2013). Los datos discretos se correlacionan bien con las mediciones continuas. Pero, mediante mediciones discretas no se podría haber detectado un peak de concentración que ocurrió entre ellas, detectado por el aparato de monitoreo continuo.

Para poder planificar adecuadamente, es necesario saber en qué períodos los aportes aumentan y disminuyen, por lo que este tipo de monitoreo es vital.

Este tipo de monitoreo podría ser el indicado para aguas como las que se encuentran en el área de estudio, con una condición bastante diluida, lo que podría facilitar el uso y mantenimiento de equipos.

Aguas subterráneas

El aporte fue estimado de acuerdo a las concentraciones medidas y a los caudales estimados a partir de valores del gradiente y de la transmisividad de la DGA (2016) (Tabla 25).

Tabla 25. Datos de transmisividad de pozos de la DGA (2016) en el área de estudio y los valores de las concentraciones de nitrato en las aguas subterráneas de este trabajo.

	T (m ² /d)	NO ₃ (mg/L)
	158.11	1.23
	3845.63	0.10
	12.65	0.64
	225.98	0.05
	527.04	5.99
	632.45	1.21
	1344.60	0.46
Promedio	963.78	0.89
Desviación media	932.19	0.26
		1.07
		0.89
		Promedio
		1.16
		Desviación media
		0.90

Utilizando la ecuación de Darcy, y modificándola para que quede en función de la transmisividad (ver Marco teórico), se pueden estimar los flujos máxicos de nitrógeno y fósforo que aportan las aguas subterráneas.

El gradiente hidráulico i tiene un valor de 0.002 en la zona (DGA, 2016). Utilizando este valor, el flujo subterráneo en la zona es de 1927 ± 1864 L/d por metro lineal.

Se puede obtener el flujo máxico con su incertidumbre asociada utilizando, al igual que para el agua superficial, la ecuación $\frac{|\Delta F_M|}{F_M} = \frac{|\Delta F_S|}{F_S} + \frac{|\Delta C|}{\bar{C}}$. Se asume que la ribera sur más la ribera oeste, donde están los pozos con mediciones de concentración de nitrato, mide 48.30 km (Figura 36 A). Esto resulta entonces en un aporte de 8980 ± 15624 kg N-NO₃/a, lo que da un rango de 0 a 24603 kg N-NO₃/a.

En el caso del fosfato, sólo hay cuatro valores sobre el nivel de detección, los cuales son 0.93, 0.29, 0.27 y 0.26. Con esto y el largo de la sección correspondiente a los pozos donde se midieron estas concentraciones, correspondiente a 13.61 km (Figura

36 B), se tiene un aporte de 1347 ± 2061 kg P-PO₄/a, es decir, un rango de 0 a 3409 kg P-PO₄/a.

Ninguno de estos valores es útil ya que podrían ser cero, y son una muestra de que se requieren más datos, pero indican que los aportes subterráneos podrían ser significativos, siendo hasta aproximadamente un 25% para el N-NO₃ si se compara esta estimación con el caso de menor aporte superficial.

Si se mejora la descripción de la hidrogeología y cómo se definen las distintas unidades hidrogeológicas se podría tener una estimación más certera de estos aportes.

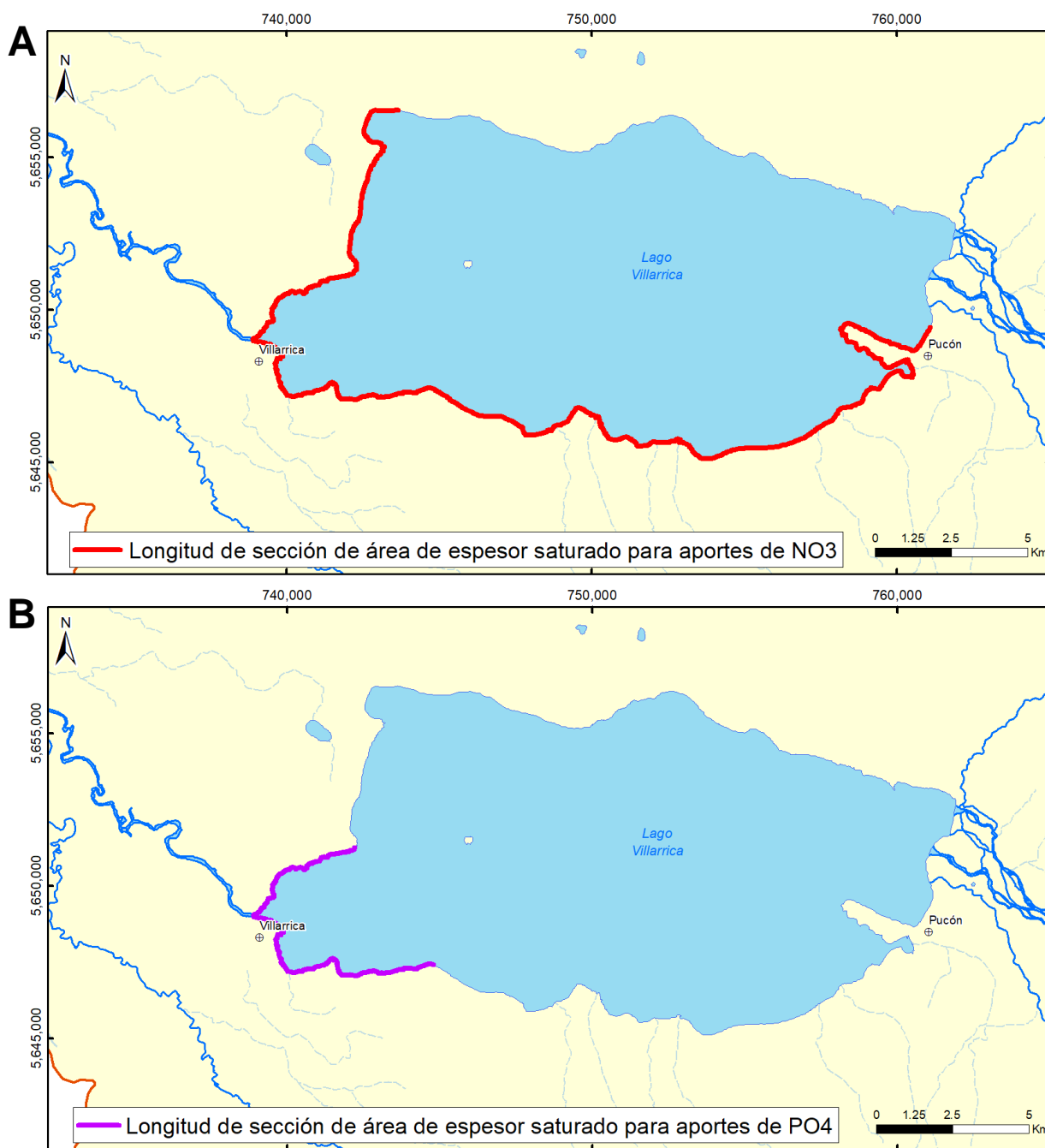


Figura 36. Mapa con la longitud de la sección de área de espesor saturado para los aportes de NO_3 (A) y para los aportes de PO_4 (B). La longitud se calculó en base a la extensión de los pozos donde se tomaron muestras. En el caso de los aportes de PO_4 (B) se hizo sólo en base a pozos con concentraciones sobre el límite de detección.

Modelo hidrogeoquímico general

En base a los análisis realizados se constató el origen de los componentes disueltos en el agua, y su significado en relación a la geología y a actividades antrópicas.

Origen de los componentes disueltos

El ACP fue utilizado de forma exploratoria para tener una noción de los grupos de elementos más importantes, y en base a esto determinar qué procesos son los que dan origen a los distintos grupos.

El primer componente principal, refleja la interacción con la roca, y evidencia la influencia de rocas volcánicas y plutónicas de la zona, con los elementos HCO_3 , Mg, Ca, SiO_2 , K, Sr y V con altos valores de cosenos cuadrados.

En los valores obtenidos por las razones recomendadas por Hounslow (1995) para el estudio del agua, la razón $\frac{\text{HCO}_3^-}{\text{SiO}_2}$ indica meteorización de silicatos, aunque esta razón no considera la presencia de vidrio volcánico, el cual puede contener gel de sílice, que libera SiO_2 a bajas temperaturas. La razón $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-}$ indica meteorización de basaltos, con minerales ferromagnesianos dominantes, sin embargo, la razón $\frac{\text{Mg}^{2+}}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}$ indica también meteorización de minerales graníticos. Adicionalmente, la presencia de anortita en esta zona (Moreno y Clavero, 2006) podría contribuir a las concentraciones de Ca en el agua.

El segundo componente principal muestra procesos que podrían estar relacionados a la actividad del volcán Villarrica, aunque sin una clara evaluación de las posibles contribuciones del uso de fertilizantes no se puede descartar la influencia de actividades antrópicas en este componente.

El primer y segundo componente no presentan una clara distribución espacial, ya que son característicos de toda la zona de estudio.

El tercer componente principal refleja los aportes de NO_3 , y se encuentra asociado espacialmente a las posibles fuentes de estos aportes.

En las aguas subterráneas se encuentran mayores valores que en el agua superficial, lo que podría relacionarse al uso de fertilizantes, especialmente en la zona oeste del lago y, a las fosas sépticas en la ribera sur. Cabe recordar que las aguas superficiales están muy relacionadas con las subterráneas y, este hecho podría llevar parte de los nutrientes generados en superficie, vía acuífero.

En las aguas superficiales los valores más altos medidos están cercanos a las pisciculturas (puntos n°4 y 14), en la zona de La Poza donde ha habido problemas por proliferaciones algales (puntos n°28 y 29), y en general, en la zona oeste de la zona de estudio, inmediata al lago. Hay que considerar que también el punto n°14 está en una zona de influencia de fosas sépticas, aunque su efecto no está constatado, sólo estimado (UACH, 2009; Bruning, 2018).

En el caso del PO_4 sólo en cuatro pozos se midieron concentraciones sobre el límite de detección, por lo que se necesitan más estudios para caracterizar

satisfactoriamente la distribución de este compuesto en las aguas. No obstante, en base a la información obtenida se podría considerar los fertilizantes como fuente de fosfato, aunque aún es necesario confirmar la presencia de otras fuentes como la del apatito en las unidades geológicas del área de estudio.

Conclusiones

Esta memoria se enfocó en determinar el origen de los componentes disueltos en las aguas afluentes del lago Villarrica mediante el análisis químico de 35 muestras de estas aguas, 24 superficiales y 11 subterráneas.

La calidad del agua es buena en la cuenca, ya que ninguna muestra se encuentra sobre los valores de las normas NCh409 y NCh1333. Prueba de esto es su baja mineralización, con conductividad eléctrica promedio de 80 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sin embargo, aunque no se sobrepasen los niveles de las normas, la concentración de nutrientes en las aguas entrantes al lago podría ser suficiente para producir los problemas de eutrofización que tiene el lago.

Todas las aguas muestreadas se clasifican en el mismo tipo, bicarbonatadas mixtas, y no hay grandes variaciones entre ellas, incluso entre las superficiales y subterráneas. Esto junto a la alta transmisividad en el área de estudio parece indicar un sistema superficial-subterráneo estrechamente interconectado con tiempos cortos de residencia en la cuenca. Sin embargo, la heterogeneidad de la geología en la cuenca estudiada, incluso dentro de una misma secuencia o depósito, sugiere una circulación del agua subterránea compleja ya que la litología influye en el comportamiento hidrogeológico. Entonces, se requiere estudiar la zona en más detalle para poder establecer los distintos parámetros hidrogeológicos de las capas donde se encuentra el lago y sus afluentes.

Con relación al origen de los componentes disueltos en el agua, el mayor aporte se genera en la interacción roca-agua, y en las rocas asociadas a la actividad volcánica que se ha dado a lo largo del tiempo en la cuenca. Los nutrientes parecen asociados a fuentes antrópicas, aunque queda definir exactamente la importancia relativa de cada una.

El problema de proliferación de algas, no se limita sólo a concentraciones de NO_3 y PO_4 en el agua, sino que la temperatura, el pH y el clima son factores que regulan su aparición e intensidad. Además, algunas de las especies de cianobacterias encontradas pueden fijar nitrógeno atmosférico, lo que indica que el nutriente limitante sería el fósforo, aunque hay que considerar que algunas especies pueden multiplicarse a pesar de que se encuentre agotado el fósforo biodisponible, gracias a su capacidad de almacenarlo.

Otro punto importante es que Chile no está siguiendo las acciones sugeridas por la OMS frente a estos eventos. El hecho de que no se midan los parámetros en las playas donde la gente puede tener contacto con las cianobacterias no ayuda a la gestión del riesgo por parte de las autoridades.

Dado que los nutrientes están relacionados con este problema, hay que señalar la necesidad de medir en continuo las concentraciones de nitrato y de fosfato en el río Pucón, ya que es el principal afluente del lago Villarrica. También se debería medir de esta manera en el río Toltén, para poder hacer un balance más certero de las cantidades de nutrientes en el lago, lo que ayudaría significativamente en la determinación de los umbrales que activan con mayor fuerza la proliferación de algas.

Estimando la cantidad de N-NO₃ y P-PO₄ que puede entrar al lago a partir de las concentraciones medidas se plantea la posibilidad de que los aportes de aguas subterráneas sean relevantes. Sin embargo, se requieren más estudios para establecer el rol de las aguas subterráneas en el funcionamiento del lago y, en la proliferación de algas. Es necesario destacar que, si bien este aspecto ha sido minimizado en estudios anteriores, en este trabajo de título adquiere un rol principal que evidencia la necesidad de estudiar mejor los recursos hídricos de esta zona.

El valor de NO₃ encontrado en las aguas subterráneas de la zona oeste del lago Villarrica indica como una de las posibles fuentes los fertilizantes. Para corroborar la presencia de esta fuente es necesario un análisis del nitrato del suelo y calcular la infiltración en los predios para poder realizar cálculos acotados. El área de los predios fertilizados debe ser actualizada, ya que los datos son de hace por lo menos 4 años, y se necesita conocer la cantidad y tipo de fertilizante utilizado en cada uno.

Es difícil establecer la influencia de las fosas sépticas, aunque dependiendo de la relación entre el aguas superficial y subterránea en las proximidades del lago, éstas podrían ser una fuente a considerar en el cálculo de los aportes de nutrientes al lago.

Para determinar en qué proporción las distintas fuentes aportan al lago, el siguiente paso a dar es realizar un análisis isotópico de nitrógeno en las aguas, incluyendo una caracterización de las fuentes, como bien demuestran los numerosos trabajos realizados para caracterizar las posibles fuentes (Cravotta, 1995; Vitòria et al., 2004 y Curt et al., 2004).

El fosfato alcanza valores más altos en aguas subterráneas, en la zona cercana al efluente del lago Villarrica. La alta permeabilidad de la zona podría favorecer su llegada desde los fertilizantes, pero no se dispone de suficiente información que permita descartar otras posibles fuentes como, por ejemplo, la presencia del apatito en la mineralogía de suelos y rocas de la zona.

A través de este estudio se han respondido satisfactoriamente a las interrogantes sobre la hidrogeoquímica del lago y sus aguas. Se ha puesto de manifiesto la complejidad del sistema y se sugiere realizar ulteriores estudios orientados a definir mejor las relaciones entre las aguas superficiales y las subterráneas. En el marco del proyecto Res. Ex. 0905 01/10/2018 del MMA quedan pendientes los resultados de los isótopos que pueden aportar información para el cálculo de la proporción de las diferentes fuentes.

Bibliografía

- Bruning González, M. B. (2018). *Estudio de aporte de carga de nutrientes por fuentes contaminantes y análisis de escenarios de descontaminación mediante un modelo de calidad de aguas en el lago Villarrica*. (Tesis de Magíster, Memoria de Título), Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Química, Biotecnología y Materiales.
- Campos, V. (May de 2002). Arsenic in groundwater affected by phosphate fertilizers at São Paulo, Brazil. *Environmental Geology*, 42(1), 83-87. doi:<https://doi.org/10.1007/s00254-002-0540-0>
- Cravotta III, C. (1995). *Use of stable isotopes of carbon, nitrogen, and sulfur to identify sources of nitrogen in surface waters in the Lower Susquehanna River basin, Pennsylvania*. US Geological Survey.
- Curt, M. D., Aguado, P., Sánchez, G., Bigeriego, M., & Fernández, J. (2004). Nitrogen isotope ratios of synthetic and organic sources of nitrate water contamination in Spain. *Water, air, and soil pollution*, 151(1-4), 135-142.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1976). *Hidrología subterránea*. Omega Barcelona.
- Departamento de Economía Ambiental, Ministerio del Medio Ambiente. (2011). *Análisis general de impacto económico y social del Anteproyecto de Normas Secundarias de Calidad Ambiental para la protección de las aguas del lago Villarrica*.
- Dirección General de Aguas. (2016). *Estudio hidrogeológico, Región de la Araucanía*. Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Realizado por ARCADIS, Santiago.
- Fundación Red de Nuevas Ideas. (2018). *Informe blooms lago Villarrica (1993-2018). Una contribución desde la ciencia ciudadana*. Fundación Red de Nuevas Ideas.
- Gray, C. W. (2018). Fluorine in soils under pasture following long-term application of phosphate fertiliser in New Zealand. *Geoderma Regional*, 14, e00183. doi:10.1016/j.geodrs.2018.e00183
- Holtzman, J., & Lehman, J. T. (1998). Role of apatite weathering in the eutrophication of Lake Victoria. En *Environmental Change and Response in East African Lakes* (págs. 89-98). Springer.
- Hounslow, A. (1995). *Water quality Data: Analysis and Interpretations*. Lewis Publisher, CRC Press.
- Jara, C., Moreno, H., Mella, M., & Duhart, P. (2011). *Geología del Área Villarrica-Huiscapi, Regiones de La Araucanía y de Los Ríos*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 128: 35 p., 1 mapa escala 1:100.000, Santiago.
- Komor, S. C., & Anderson Jr, H. W. (1993). Nitrogen isotopes as indicators of nitrate sources in Minnesota sand-plain aquifers. *Groundwater*, 31(2), 260-270.

- MacLeod, N. (2005). *PalaeoMath 101: Principal Components Analysis (Eigenanalysis & Regression 5)*. Palaeontology Newsletter N°59. Obtenido de <https://www.palass.org/publications/newsletter/palaeomath-101/palaeomath-part-5-pca-eigenanalysis-regression-v>
- Moreno, H., & Clavero, J. (2006). *Geología del volcán Villarrica, Regiones de La Araucanía y de Los Lagos*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 98, 35 p., 1 mapa escala 1:50.000.
- Moreno, H., & Lara, L. (2008). *Geología del Área Pucón-Curarrehue, Regiones de La Araucanía y de Los Ríos*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 115: 36 p., 1 mapa escala 1:100.000, Santiago.
- Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 25(6), 914-928.
- Ravikumar, P., & Somashekar, R. K. (2017). Principal component analysis and hydrochemical facies characterization to evaluate groundwater quality in Varahi river basin, Karnataka state, India. *Applied Water Science*, 7(2), 745-755.
- Salmaso, N., Capelli, C., Shams, S., & Cerasino, L. (2015). Expansion of bloom-forming *Dolichospermum lemmermannii* (Nostocales, Cyanobacteria) to the deep lakes south of the Alps: colonization patterns, driving forces and implications for water use. *Harmful Algae*, 50, 76-87.
- Sánchez, J. (2012). *Evolución geoquímica*. Universidad de Salamanca, Departamento de Geología.
- Sawyer, G. M., Salerno, G. G., Le Blond, J. S., Martin, R. S., Sampinato, L., Roberts, T. J., . . . Oppenheimer, C. (2011). Gas and aerosol emissions from Villarrica volcano, Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 203(1-2), 62-75.
- Seiler, R. L. (1996). *Methods for identifying sources of nitrogen contamination of ground water in valleys in Washoe County, Nevada*. US Geological Survey; Branch of Information Services [distributor],.
- Shinohara, H., & Witter, J. B. (2005). Volcanic gases emitted during mild Strombolian activity of Villarrica volcano, Chile. *Geophysical Research Letters*, 32(20).
- Suárez, M., & Empanan, C. (s.f.). *Hoja Curacautín, Regiones de la Araucanía y Biobío*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, No. 71, 105p., 1 mapa 1:250.000 (realizado por C. Empanan, M. Suárez, y J. Muñoz, 1992).
- Universidad Austral de Chile. (2009). *Diagnóstico de la calidad de las aguas del lago Villarrica*.
- Universidad Católica de Temuco. (2012). *Análisis de la Carga de Nutrientes (Nitrógeno y Fósforo) de las principales subcuencas aportantes del Lago Villarrica*.
- Universidad de La Frontera. (2018). *Determinación de las concentraciones de nutrientes en los principales cauces aportantes al lago Villarrica, estimación de su carga y propuesta de medidas para su reducción*.

- Universidad del Desarrollo. (2016). *Instrumentos Económicos para el Control de la Contaminación en la Cuenca del Lago Villarrica*.
- Vitória, L., Otero, N., Soler, A., & Canals, À. (2004). Fertilizer characterization: isotopic data (N, S, O, C, and Sr). *Environmental science & technology*, 38(12), 3254-3262.
- Warner, K. L., Terrio, P. J., Straub, T. D., Roseboom, D., & Johnson, G. P. (2013). Real-time continuous nitrate monitoring in Illinois in 2013. *U.S. Geological Survey Fact Sheet 2013–3109*, 4. doi:<https://dx.doi.org/10.3133/fs20133019>
- World Health Organization (WHO). (1999). *Toxic Cyanobacteria in Water: A guide to their public health consequences, monitoring and management*. St Edmundsbury Press, Bury St Edmunds, Suffolk: E & FN Spon.

Anexo A

Mediciones en terreno

Se adjuntan las mediciones de parámetros realizadas en terreno.

Punto de muestreo	Huso	X	Y	Tipo	T (°C)	pH	C. E. (μS/cm)	Eh (mV)
1	19 S	278709	5638226	Superficial	17.9	7.02	48.6	180.9
2	19 S	277595	5640415	Superficial	18.3	7.03	49.5	181.2
3	19 S	262403	5642658	Superficial	15.8	7.21	51.1	202.4
4	19 S	269165	5635949	Superficial	14.5	6.77	24.3	215.7
5	19 S	266147	5639086	Superficial	18.5	6.96	75.6	107.1
6	19 S	255687	5652932	Superficial	20.5	7.54	90.0	203.0
7	19 S	254573	5652192	Superficial	17.7	7.16	47.1	216.9
8	19 S	256108	5650529	Superficial	20.3	7.46	62.3	220.7
9	19 S	250747	5649870	Superficial	20.5	7.30	65.5	235.5
10	19 S	250578	5646316	Superficial	20.1	6.41	29.0	216.1
11	18 S	750008	5646060	Superficial	13.0	7.29	67.5	221.4
12	18 S	750357	5643871	Superficial	14.8	7.00	79.8	213.6
13	18 S	751691	5644387	Superficial	14.5	7.00	99.8	224.8
14	18 S	752057	5645588	Superficial	14.2	7.31	68.7	228.5
15	18 S	752760	5645471	Superficial	15.0	7.32	71.9	218.3
16	18 S	752668	5645700	Superficial	13.5	7.06	59.5	226.7
17	19 S	243155	5647693	Subterránea	12.4	7.14	110.1	596.9
18	19 S	243509	5647145	Subterránea	15.8	7.06	84.8	237.5
19	19 S	244023	5647784	Subterránea	15.7	7.32	140.5	240.1
20	18 S	757183	5645921	Subterránea	18.8	6.83	175.1	236.2
21	18 S	747574	5643026	Subterránea	16.4	6.22	76.5	196.4
22	18 S	742948	5646406	Subterránea	15.2	7.56	89.2	236.0
23	18 S	736039	5651052	Subterránea	16.3	7.94	219.0	166.2
24	18 S	738855	5649056	Superficial	22.3	8.73	68.5	171.8
25	18 S	740441	5658110	Subterránea	17.5	8.73	112.2	203.5
26	18 S	739155	5646144	Subterránea	17.5	7.19	112.2	203.5
27	18 S	739393	5651044	Subterránea	16.4	7.68	109.9	138.1
28	19 S	242624	5648182	Lago	22.1	8.43	64.6	141.9
29	19 S	241587	5647467	Lago	22.7	8.66	63.4	110.2
30	19 S	243139	5649341	Lago	22.2	8.80	63.6	91.7
31	18 S	753044	5649832	Lago	21.2	8.92	62.2	96.0
32	19 S	247875	5648856	Superficial	19.6	7.56	68.4	91.1
33	19 S	241972	5641911	Subterránea	14.7	6.67	78.3	81.7
34	19 S	244726	5650123	Superficial	15.6	7.21	59.1	131.2
35	19 S	244601	5650115	Superficial	14.3	7.14	62.7	119.9

Anexo B

Informes de laboratorio

Se adjuntan los datos de los análisis realizados en las muestras por el laboratorio.

RESULTADOS CATIONES MAYORES

Muestra N°	Na (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Muestra N°	Na (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)
C01-AVM	4,65	0,98	4,35	1,62	C20-AVM	7,28	2,86	15,6	5,44
C02-AVM	3,45	0,90	4,33	1,57	C21-AVM	4,75	0,64	6,46	2,02
C03-AVM	3,58	1,02	4,34	1,44	C22-AVM	5,80	1,50	6,05	3,24
C04-AVM	2,00	0,48	2,47	0,62	C23-AVM	11,0	2,16	11,8	2,97
C05-AVM	7,20	1,54	4,10	1,90	C24-AVM	4,05	0,95	5,24	1,77
C06-AVM	5,40	1,63	6,78	3,40	C25-AVM	5,95	1,81	9,53	3,36
C07-AVM	2,95	0,84	4,68	1,16	C26-AVM	6,45	1,92	6,42	3,61
C08-AVM	3,90	0,75	5,74	1,63	C27-AVM	6,50	1,31	8,98	3,21
C09-AVM	4,75	0,89	5,22	1,67	C28-AVM	3,85	0,89	5,01	1,82
C10-AVM	1,68	0,33	2,37	0,78	C29-AVM	3,80	0,86	4,91	1,76
C11-AVM	5,45	1,01	5,59	1,86	C30-AVM	3,85	0,88	5,06	1,78
C12-AVM	6,25	1,12	5,97	2,53	C31-AVM	3,80	0,82	5,13	1,71
C13-AVM	5,95	1,86	8,70	3,44	C32-AVM	4,55	1,05	5,92	1,90
C14-AVM	4,20	1,21	5,87	2,20	C33-AVM	4,10	1,61	8,04	2,00
C15-AVM	5,95	1,06	5,10	1,74	C34-AVM	3,90	0,78	5,09	2,04
C16-AVM	3,50	0,87	4,31	1,48	C35-AVM	4,35	0,85	5,40	2,04
C17-AVM	6,30	1,59	8,90	3,54	Solución de Referencia* (STD Control)	1,04 (1,0)	2,55 (2,5)	10,5 (10,0)	1,04 (1,0)
C18-AVM	4,95	1,17	7,21	2,70	LOD	0,03	0,12	0,02	0,004
C19-AVM	8,45	1,59	10,6	4,86	LOQ	0,10	0,40	0,08	0,07

RESULTADOS CATIONES TRAZAS

Muestra N°	Li (µg/L)	Be (µg/L)	B (µg/L)	Al (µg/L)	V (µg/L)	Cr (µg/L)	Fe (µg/L)	Mn (µg/L)	Co (µg/L)	Ni (µg/L)
T01-AVM	4,20	< 0,01	4,92	5,32	1,56	< 0,07	61	5,47	0,049	0,35
T02-AVM	2,33	< 0,01	3,51	7,69	1,50	< 0,07	65	5,00	0,042	0,23
T03-AVM	1,57	< 0,01	10,3	9,53	6,56	< 0,07	11	0,67	< 0,02	0,20
T04-AVM	0,57	< 0,01	1,74	39,3	1,93	< 0,07	26	1,01	< 0,02	0,15
T05-AVM	4,72	< 0,01	37,1	10,3	6,35	< 0,07	43	2,79	0,037	0,22
T06-AVM	0,44	< 0,01	3,76	13,6	9,81	< 0,07	38	2,86	0,047	0,34
T07-AVM	0,82	< 0,01	5,36	5,40	3,91	< 0,07	146	0,67	0,023	0,19
T08-AVM	1,28	< 0,01	8,94	10,0	4,87	< 0,07	26	2,37	0,036	0,22
T09-AVM	1,11	< 0,01	8,72	8,46	6,75	< 0,07	17	0,98	0,026	0,23
T10-AVM	< 0,06	< 0,01	3,60	61,9	5,94	< 0,07	25	1,79	0,033	< 0,10
T11-AVM	0,62	< 0,01	6,44	15,4	16,6	< 0,07	34	1,08	0,033	0,39
T12-AVM	0,56	< 0,01	6,23	7,75	6,28	< 0,07	57	3,73	0,045	0,34
T13-AVM	0,54	< 0,01	8,83	16,6	12,4	< 0,07	27	0,50	0,036	0,33
T14-AVM	< 0,06	< 0,01	6,36	14,9	10,1	< 0,07	28	0,79	0,031	0,32
T15-AVM	< 0,06	< 0,01	5,87	11,5	8,21	< 0,07	13	1,13	0,029	0,21
T16-AVM	0,59	< 0,01	5,63	5,15	11,0	< 0,07	< 3	0,22	< 0,02	< 0,10
T17-AVM	0,70	< 0,01	10,4	5,90	24,2	< 0,07	7	0,37	0,035	0,38
T18-AVM	1,01	< 0,01	9,04	2,44	19,2	< 0,07	< 3	< 0,01	< 0,02	0,26
T19-AVM	0,97	< 0,01	13,5	3,00	20,7	< 0,07	< 3	< 0,01	0,035	0,51
T20-AVM	0,79	< 0,01	10,4	12,8	21,7	< 0,07	8	0,45	0,054	0,77

Muestra N°	Li (µg/L)	Be (µg/L)	B (µg/L)	Al (µg/L)	V (µg/L)	Cr (µg/L)	Fe (µg/L)	Mn (µg/L)	Co (µg/L)	Ni (µg/L)
T21-AVM	0,02	< 0,01	11,0	3,79	1,13	< 0,07	19	7,88	0,074	0,35
T22-AVM	0,97	< 0,01	8,22	4,54	17,8	< 0,07	10	0,28	< 0,02	0,40
T23-AVM	1,10	< 0,01	118	7,37	21,1	< 0,07	12	7,98	0,033	0,37
T24-AVM	1,20	< 0,01	9,67	7,83	3,85	< 0,07	9	0,51	< 0,02	0,26
T25-AVM	0,60	< 0,01	6,29	7,68	7,80	< 0,07	10	1,29	0,040	0,41
T26-AVM	0,71	< 0,01	12,7	8,99	12,8	< 0,07	12	2,01	0,027	0,38
T27-AVM	0,76	< 0,01	6,70	11,4	13,7	< 0,07	9	0,45	0,030	0,42
T28-AVM	1,20	< 0,01	9,43	9,51	4,64	< 0,07	12	0,96	0,025	0,25
T29-AVM	1,19	< 0,01	9,32	15,5	4,26	< 0,07	13	1,25	0,026	0,24
T30-AVM	1,18	< 0,01	9,32	9,70	4,12	< 0,07	11	0,46	< 0,02	0,24
T31-AVM	1,19	< 0,01	9,24	6,21	3,72	< 0,07	6	0,37	< 0,02	0,22
T32-AVM	1,71	< 0,01	12,3	11,2	6,48	< 0,07	48	1,77	0,029	0,25
T33-AVM	0,33	< 0,01	6,06	3,59	4,16	< 0,07	104	77,3	0,25	0,63
T34-AVM	0,30	< 0,01	4,56	11,5	5,05	< 0,07	21	2,01	0,034	0,25
T35-AVM	0,31	< 0,01	4,67	11,4	5,16	< 0,07	22	2,08	0,035	0,26
Solución de Referencia* SRM 1643f	16,56 (16,59)	12,78 (13,67)	140,0 (152,3)	127,9 (133,8)	36,49 (36,07)	18,70 (18,50)	99,53 (93,44)	34,24 (37,14)	24,35 (25,30)	55,36 (59,80)
LOD	0,02	0,002	0,07	0,06	0,20	0,02	1	0,004	0,005	0,03
LOQ	0,06	0,01	0,25	0,20		0,07	3	0,01	0,02	0,10

RESULTADOS CATIONES TRAZAS

Muestra N°	Cu (µg/L)	Zn (µg/L)	As (µg/L)	Se (µg/L)	Rb (µg/L)	Sr (µg/L)	Zr (µg/L)	Mo (µg/L)	Ag (µg/L)	Cd (µg/L)
T01-AVM	0,74	6,68	0,22	< 0,30	3,35	33,1	< 0,008	0,68	< 0,003	0,067
T02-AVM	0,40	12,2	0,19	< 0,30	2,92	21,9	< 0,008	0,57	< 0,003	< 0,004
T03-AVM	0,97	10,4	0,86	< 0,30	2,66	18,9	< 0,008	0,26	< 0,003	< 0,004
T04-AVM	< 0,20	11,7	0,41	< 0,30	1,12	7,71	< 0,008	< 0,006	< 0,003	< 0,004
T05-AVM	2,12	7,96	1,10	< 0,30	4,63	17,7	< 0,008	0,58	< 0,003	< 0,004
T06-AVM	< 0,20	6,29	0,20	< 0,30	3,35	41,4	< 0,008	< 0,006	< 0,003	< 0,004
T07-AVM	< 0,20	9,98	< 0,06	< 0,30	1,62	24,5	< 0,008	0,55	< 0,003	< 0,004
T08-AVM	< 0,20	8,55	0,84	< 0,30	1,50	30,8	< 0,008	0,99	< 0,003	< 0,004
T09-AVM	< 0,20	8,82	0,67	< 0,30	1,90	25,9	< 0,008	0,73	< 0,003	< 0,004
T10-AVM	< 0,20	5,16	0,56	< 0,30	0,94	10,4	< 0,008	< 0,006	< 0,003	< 0,004
T11-AVM	< 0,20	22,4	1,49	< 0,30	2,60	21,8	< 0,008	0,21	< 0,003	< 0,004
T12-AVM	< 0,20	15,0	0,41	< 0,30	3,01	32,8	< 0,008	< 0,006	< 0,003	< 0,004
T13-AVM	< 0,20	9,58	0,84	< 0,30	4,18	45,4	< 0,008	< 0,006	< 0,003	< 0,004
T14-AVM	< 0,20	25,0	0,75	< 0,30	3,08	29,1	< 0,008	< 0,006	< 0,003	< 0,004
T15-AVM	< 0,20	4,83	0,66	< 0,30	2,94	26,4	< 0,008	< 0,006	< 0,003	< 0,004
T16-AVM	< 0,20	4,94	0,85	< 0,30	2,59	20,0	< 0,008	< 0,006	< 0,003	< 0,004
T17-AVM	0,60	29,5	1,63	< 0,30	3,87	35,2	< 0,008	0,25	< 0,003	< 0,004
T18-AVM	6,11	9,53	1,23	< 0,30	3,15	23,9	< 0,008	< 0,006	< 0,003	< 0,004
T19-AVM	0,68	14,0	1,41	< 0,30	3,47	36,5	< 0,008	0,31	< 0,003	< 0,004
T20-AVM	1,44	7,04	1,14	< 0,30	4,16	67,1	< 0,008	< 0,006	< 0,003	< 0,004

Muestra N°	Cu (µg/L)	Zn (µg/L)	As (µg/L)	Se (µg/L)	Rb (µg/L)	Sr (µg/L)	Zr (µg/L)	Mo (µg/L)	Ag (µg/L)	Cd (µg/L)
T21-AVM	< 0,20	16,1	< 0,06	< 0,30	1,55	37,9	< 0,008	< 0,006	< 0,003	< 0,004
T22-AVM	0,72	16,3	1,93	< 0,30	0,65	23,1	< 0,008	0,74	< 0,003	< 0,004
T23-AVM	< 0,20	7,21	10,1	< 0,30	0,57	47,6	< 0,008	1,72	< 0,003	< 0,004
T24-AVM	< 0,20	15,5	0,50	< 0,30	2,16	23,5	< 0,008	0,46	< 0,003	< 0,004
T25-AVM	< 0,20	85,1	0,94	< 0,30	1,39	49,5	< 0,008	0,21	< 0,003	< 0,004
T26-AVM	0,54	76,5	1,53	< 0,30	1,14	29,4	< 0,008	0,27	< 0,003	< 0,004
T27-AVM	< 0,20	32,2	1,83	< 0,30	0,80	33,2	< 0,008	0,34	< 0,003	< 0,004
T28-AVM	< 0,20	24,7	0,53	< 0,30	2,17	24,1	< 0,008	0,43	< 0,003	< 0,004
T29-AVM	< 0,20	28,3	0,52	< 0,30	2,12	24,0	< 0,008	0,42	< 0,003	< 0,004
T30-AVM	< 0,20	9,31	0,51	< 0,30	2,08	25,0	< 0,008	0,43	< 0,003	< 0,004
T31-AVM	< 0,20	9,40	0,47	< 0,30	2,05	23,7	< 0,008	0,43	< 0,003	< 0,004
T32-AVM	< 0,20	13,4	0,75	< 0,30	2,49	25,2	< 0,008	0,61	< 0,003	< 0,004
T33-AVM	< 0,20	15,2	0,33	< 0,30	4,23	38,5	< 0,008	< 0,006	< 0,003	< 0,004
T34-AVM	< 0,20	14,7	0,35	< 0,30	1,72	28,9	< 0,008	< 0,006	< 0,003	< 0,004
T35-AVM	< 0,20	15,6	0,35	< 0,30	1,82	28,6	< 0,008	< 0,006	< 0,003	< 0,004
solución de Referencia* SRM 1643f	19,92 (21,66)	67,1 (74,4)	57,39 (57,42)	10,541 (11,700)	12,89 (12,64)	312 (314)	n.r.	112,7 (115,3)	0,8636 (0,9703)	5,92 (5,89)
LOD	0,05	0,2	0,02	0,08	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001
LOQ	0,20	0,7	0,06	0,30	0,004	0,004	0,008	0,006	0,003	0,004

RESULTADOS CATIONES TRAZAS

Muestra N°	Sn (µg/L)	Sb (µg/L)	Cs (µg/L)	Ba (µg/L)	W (µg/L)	Hg (µg/L)	Pb (µg/L)	U (µg/L)
T01-AVM	< 0,01	< 0,009	0,378	5,23	< 0,01	< 0,004	1,67	0,014
T02-AVM	< 0,01	< 0,009	0,226	5,06	< 0,01	< 0,004	< 0,008	0,020
T03-AVM	< 0,01	< 0,009	0,162	1,51	< 0,01	< 0,004	< 0,008	0,007
T04-AVM	< 0,01	< 0,009	0,019	0,90	< 0,01	< 0,004	< 0,008	< 0,001
T05-AVM	< 0,01	< 0,009	0,570	1,85	< 0,01	< 0,004	< 0,008	< 0,001
T06-AVM	< 0,01	< 0,009	0,052	2,20	< 0,01	< 0,004	< 0,008	0,015
T07-AVM	< 0,01	< 0,009	0,065	1,90	< 0,01	< 0,004	< 0,008	< 0,001
T08-AVM	< 0,01	< 0,009	0,187	2,48	0,18	< 0,004	< 0,008	0,037
T09-AVM	< 0,01	0,23	0,125	1,87	< 0,01	< 0,004	< 0,008	0,008
T10-AVM	< 0,01	< 0,009	0,033	0,77	< 0,01	< 0,004	< 0,008	< 0,001
T11-AVM	< 0,01	0,30	0,110	1,30	< 0,01	< 0,004	< 0,008	< 0,001
T12-AVM	< 0,01	< 0,009	0,108	2,19	< 0,01	< 0,004	< 0,008	< 0,001
T13-AVM	< 0,01	< 0,009	0,059	1,78	< 0,01	< 0,004	< 0,008	< 0,001
T14-AVM	< 0,01	< 0,009	0,087	1,51	< 0,01	< 0,004	< 0,008	< 0,001
T15-AVM	< 0,01	< 0,009	0,096	1,46	< 0,01	< 0,004	< 0,008	< 0,001
T16-AVM	< 0,01	< 0,009	0,115	0,81	< 0,01	< 0,004	< 0,008	< 0,001
T17-AVM	< 0,01	< 0,009	0,137	1,39	< 0,01	< 0,004	< 0,008	0,025
T18-AVM	< 0,01	< 0,009	0,243	0,72	< 0,01	< 0,004	< 0,008	0,019
T19-AVM	< 0,01	< 0,009	0,138	1,53	< 0,01	< 0,004	< 0,008	0,043
T20-AVM	< 0,01	< 0,009	0,023	2,19	< 0,01	< 0,004	0,107	0,029

Muestra N°	Sn (µg/L)	Sb (µg/L)	Cs (µg/L)	Ba (µg/L)	W (µg/L)	Hg (µg/L)	Pb (µg/L)	U (µg/L)
T21-AVM	< 0,01	< 0,009	0,059	4,74	< 0,01	< 0,004	< 0,008	< 0,001
T22-AVM	< 0,01	0,25	< 0,001	0,80	0,16	< 0,004	0,103	0,026
T23-AVM	< 0,01	0,28	< 0,001	1,05	1,07	< 0,004	< 0,008	0,053
T24-AVM	0,51	< 0,009	0,127	2,19	< 0,01	< 0,004	< 0,008	0,011
T25-AVM	< 0,01	< 0,009	< 0,001	1,42	< 0,01	< 0,004	0,152	0,046
T26-AVM	< 0,01	< 0,009	< 0,001	1,01	< 0,01	< 0,004	0,198	0,021
T27-AVM	< 0,01	< 0,009	< 0,001	0,84	< 0,01	< 0,004	< 0,008	0,088
T28-AVM	< 0,01	< 0,009	0,123	2,01	< 0,01	< 0,004	< 0,008	0,011
T29-AVM	< 0,01	< 0,009	0,126	2,05	< 0,01	< 0,004	< 0,008	0,011
T30-AVM	< 0,01	< 0,009	0,124	2,04	< 0,01	< 0,004	< 0,008	0,011
T31-AVM	< 0,01	< 0,009	0,124	2,09	< 0,01	< 0,004	< 0,008	0,010
T32-AVM	< 0,01	< 0,009	0,180	2,42	< 0,01	< 0,004	< 0,008	0,023
T33-AVM	1,47	< 0,009	0,081	1,36	< 0,01	< 0,004	< 0,008	< 0,001
T34-AVM	< 0,01	< 0,009	0,060	2,94	< 0,01	< 0,004	< 0,008	< 0,001
T35-AVM	< 0,01	< 0,009	0,060	2,57	< 0,01	< 0,004	< 0,008	< 0,001
Solución de Referencia* SRM 1643f	n.r.	58,22 (55,45)	n.r.	517,3 (518,2)	n.r.	n.r.	17,601 (18,488)	n.r.
LOD	0,004	0,003	0,0004	0,01	0,004	0,002	0,002	0,0002
LOQ	0,01	0,009	0,001	0,02	0,01	0,004	0,008	0,001

RESULTADOS ANIONES

Muestra Nº	Fluoruro (mg/L)	Cloruro (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Bromuro (mg/L)	Nitrato (mg/L)	Fosfato (mg/L)
A01-AVM	0,053	3,66	1,15	< 0,05	< 0,10	< 0,20
A02-AVM	0,054	1,12	0,87	< 0,05	0,088	< 0,20
A03-AVM	0,052	1,24	2,25	< 0,05	< 0,10	< 0,20
A04-AVM	0,048	0,41	2,34	< 0,05	< 0,10	< 0,20
A05-AVM	0,089	2,98	8,71	< 0,05	< 0,10	< 0,20
A06-AVM	0,063	0,91	0,23	< 0,05	< 0,10	< 0,20
A07-AVM	0,035	0,98	1,08	< 0,05	0,21	< 0,20
A08-AVM	0,055	1,53	2,53	< 0,05	< 0,10	< 0,20
A09-AVM	0,050	2,96	1,96	< 0,05	0,30	< 0,20
A10-AVM	0,060	0,91	0,64	< 0,05	< 0,10	< 0,20
A11-AVM	0,050	3,31	0,42	< 0,05	1,13	< 0,20
A12-AVM	0,046	3,21	0,30	< 0,05	< 0,10	< 0,20
A13-AVM	0,054	3,26	0,31	< 0,05	1,09	< 0,20
A14-AVM	0,040	1,63	0,32	< 0,05	0,96	< 0,20
A15-AVM	0,041	4,93	0,33	< 0,05	0,66	< 0,20
A16-AVM	0,040	1,58	0,30	< 0,05	0,43	< 0,20
A17-AVM	0,065	1,60	0,87	< 0,05	0,89	< 0,20
A18-AVM	0,050	1,16	0,81	< 0,05	0,26	< 0,20
A19-AVM	0,11	1,98	0,98	< 0,05	1,07	< 0,20
A20-AVM	0,045	2,84	1,13	< 0,05	1,23	< 0,20

Muestra Nº	Fluoruro (mg/L)	Cloruro (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Bromuro (mg/L)	Nitrato (mg/L)	Fosfato (mg/L)
A21-AVM	< 0,03	1,32	7,10	< 0,05	0,10	< 0,20
A22-AVM	0,072	1,39	0,62	< 0,05	0,64	0,27
A23-AVM	0,15	8,13	23,7	< 0,05	< 0,10	0,93
A24-AVM	0,031	1,82	1,46	< 0,05	< 0,10	< 0,20
A25-AVM	0,045	2,77	0,75	< 0,05	5,99	< 0,20
A26-AVM	0,077	1,59	0,69	< 0,05	1,21	0,29
A27-AVM	0,067	2,04	0,82	< 0,05	0,46	0,26
A28-AVM	0,054	1,75	1,47	< 0,05	< 0,10	< 0,20
A29-AVM	0,055	1,73	1,52	< 0,05	0,10	< 0,20
A30-AVM	0,053	1,75	1,95	< 0,05	< 0,10	< 0,20
A31-AVM	0,062	1,72	1,88	< 0,05	< 0,10	< 0,20
A32-AVM	0,068	2,18	2,71	< 0,05	< 0,10	< 0,20
A33-AVM	0,036	1,35	0,34	< 0,05	0,89	< 0,20
A34-AVM	0,032	1,26	0,47	< 0,05	< 0,10	< 0,20
A35-AVM	0,034	1,52	0,55	< 0,05	0,11	< 0,20
Solución de Referencia* Multi-Anion	10,6 (10,0)	9,50 (10,0)	10,6 (10,0)	10,3 (10,0)	9,88 (10,0)	11,0 (10,0)
LOD	0,002	0,01	0,025	0,02	0,02	0,07
LOQ	0,03	0,03	0,07	0,05	0,10	0,20

OTROS RESULTADOS

Muestra N°	Carbonato (mg/L)	Bicarbonato (mg/L)	Temperatura (°C)	pH	Muestra N°	SiO ₂ (mg/L)
B01-AVM	n.d.	24,8	23,9	7,188	S01-AVM	31,0
B02-AVM	n.d.	23,2	24,2	7,833	S02-AVM	40,0
B03-AVM	n.d.	23,5	25,3	7,669	S03-AVM	29,0
B04-AVM	n.d.	7,6	24,7	7,344	S04-AVM	31,0
B05-AVM	n.d.	24,4	25,4	7,174	S05-AVM	30,0
B06-AVM	n.d.	50,1	25,5	7,562	S06-AVM	41,0
B07-AVM	n.d.	22,4	26,5	7,75	S07-AVM	21,0
B08-AVM	n.d.	27,2	26,0	7,548	S08-AVM	26,0
B09-AVM	n.d.	27,6	26,4	7,525	S09-AVM	28,0
B10-AVM	n.d.	12,2	26,6	7,358	S10-AVM	19,5
B11-AVM	n.d.	28,0	27,2	7,566	S11-AVM	40,0
B12-AVM	n.d.	39,5	26,0	7,338	S12-AVM	38,0
B13-AVM	n.d.	51,4	24,8	7,454	S13-AVM	56,0
B14-AVM	n.d.	35,5	25,7	7,382	S14-AVM	42,0
B15-AVM	n.d.	30,5	25,7	7,388	S15-AVM	40,0
B16-AVM	n.d.	24,6	25,9	7,369	S16-AVM	36,0
B17-AVM	n.d.	56,3	25,6	7,834	S17-AVM	47,0
B18-AVM	n.d.	43,8	24,1	7,438	S18-AVM	40,0

Muestra N°	Carbonato (mg/L)	Bicarbonato (mg/L)	Temperatura (°C)	pH	Muestra N°	SiO ₂ (mg/L)
B19-AVM	n.d.	73,2	26,1	7,555	S19-AVM	46,0
B20-AVM	n.d.	88,9	25,1	6,983	S20-AVM	72,0
B21-AVM	n.d.	30,4	25,5	6,496	S21-AVM	29,0
B22-AVM	n.d.	45,1	25,7	7,305	S22-AVM	51,0
B23-AVM	n.d.	64,6	26,0	7,981	S23-AVM	45,0
B24-AVM	n.d.	26,4	24,3	8,380	S24-AVM	24,0
B25-AVM	n.d.	52,1	26,3	7,540	S25-AVM	47,0
B26-AVM	n.d.	48,3	26,4	7,540	S26-AVM	53,0
B27-AVM	n.d.	51,4	25,6	8,000	S27-AVM	46,0
B28-AVM	n.d.	27,3	23,3	8,40	S28-AVM	22,0
B29-AVM	n.d.	26,2	26,6	7,929	S29-AVM	23,0
B30-AVM	1,42	21,1	25,3	8,559	S30-AVM	21,0
B31-AVM	1,03	21,6	25,4	8,654	S31-AVM	23,0
B32-AVM	n.d.	29,6	25,6	7,481	S32-AVM	21,0
B33-AVM	n.d.	40,7	25,2	7,076	S33-AVM	50,0
B34-AVM	n.d.	30,1	26,3	7,261	S34-AVM	34,5
B35-AVM	n.d.	29,8	25,5	8,235	S35-AVM	33,0